



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

PROPUESTA DE DISEÑO ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN PARA CALETA DE PESCADORES ARTESANALES DE ARICA

Pablo Ignacio Vera Gallegos

Agosto 2019

PROPUESTA DE DISEÑO DE ESTRUCTURA PROTECCIÓN PARA CALETA DE PESCADORES ARTESANALES ARICA

Pablo Ignacio Vera Gallegos

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Carlos Cárdenas Martínez

Profesor guía
GSI Ingenieros Consultores Ltda.

Mauricio Molina Pereira

Docente
Universidad de Valparaíso

Jorge Gómez Mena

Ingeniero Civil Oceánico
GSI Ingenieros Consultores Ltda.

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 exclusivo de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre la 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 académicos.

Alumno, Pablo Vera Gallegos

P. Guía, Carlos Cárdenas Martínez

AGRADECIMIENTOS

Son variadas las personas a las cuales podría agradecer, algunas por el apoyo que prestaron para poder completar este proceso, por la paciencia, las buenas vibras y por último la comprensión.

Me gustaría comenzar con mi familia; madre, padre, hermana y abuela, donde cada uno de ellos comprendió y tuvo la paciencia para esperar taaaantos años a que terminara este proceso. A ellos les doy gracias porque de alguna u otra forma hicieron que mi rumbo se demarcara finalmente. Pero como siempre pensé, todo tiene su tiempo.

Agradezco también a mis amigos y compañeros, esos que siempre dieron la mano cuando la necesité y sin pedir nada a cambio, José, Camilo, Reinaldo y el último que se incorporó a la línea de ayuda, Rodrigo. Gracias a todos, por entregar conocimiento, discusiones y comprensión.

Quisiera agradecer también a Carlos, profesor guía, por prestar su apoyo y dirección a este proceso, a Jorge Gómez y a GSI Ingenieros Ltda.

Agradecer también a mis compañeros de trabajo, por el apoyo y cooperación cuando necesitaba entregar más tiempo a este proyecto personal.

...

"We are come from sea, but we are not all of the sea. Those of us who are, we children of the tides, must return to it again and again, until the day we don't come back leaving only that which was touched along the way."

Chasing Mavericks

CONTENIDOS

CONTENIDO	PÁG.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3. ALCANCES	6
4. MARCO TEÓRICO.....	7
4.1. OLEAJE IRREGULAR ENFOQUE ESPECTRAL	8
4.2. METODOLOGÍAS PARA LA TRANSFERENCIA DE OLEAJE	9
4.2.1. Método de transferencia de parámetros de resumen	9
4.2.2. Método de transferencia cuasi purista	10
4.2.3. Método de transferencia cuasi purista modificado	11
4.2.4. Método de transferencia purista	11
4.3. ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS.....	12
4.3.1. Determinación de valores extremos.....	12
4.3.2. Distribuciones teóricas candidatas	13
4.3.3. Métodos de ajuste y procedimiento	13
4.3.4. Fórmula de posición para el trazado.....	14
4.3.5. Extrapolación de valores extremos	16
4.4. DISEÑO DE ROMPEOLAS EN TALUD.....	17
4.4.1. Diseño hidráulico	18
4.4.2. Diseño estructural	22
4.5. MODELOS NUMÉRICOS	29
4.5.1. Mike 21 Spectral Waves	29
4.5.2. Mike 21 Boussinesq Wave.....	32
5. FUENTES DE DATOS	35
5.1. BATIMETRÍAS.....	35
5.1.1. Cartas náuticas Electrónicas	35
5.1.2. Levantamiento batimétrico multihaz.....	36
5.1.3. Línea de costa	37
5.2. OLEAJE	38
5.2.1. Oleaje medido en terreno	38
5.2.2. Oleaje de modelos globales.....	39
5.3. NIVEL DEL MAR	40
6. METODOLOGÍA.....	41
6.1. BASES DE DISEÑO	42
6.2. ANÁLISIS DE DATOS DISPONIBLES	43
6.2.1. Análisis de oleaje	43
6.2.2. Análisis de mareas.....	43
6.3. TRANSFERENCIA DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS	45
6.3.1. Definición del sitio de interés	45
6.3.2. Transferencia de parámetros resumen al sitio de interés	45
6.3.3. Metodología alternativa de calibración.....	49

6.3.4.	Clima de oleaje en aguas profundas con datos ajustados.....	51
6.3.5.	Modelación para obtener coeficientes de transferencia.....	51
6.3.6.	Aplicación de coeficientes a datos de aguas profundas	53
6.4.	CLIMA DE OLAJE EXTREMO	53
6.4.1.	Selección de eventos extremos	56
6.4.2.	Identificación de distribuciones extremas candidatas	56
6.4.3.	Selección de distribución óptima	57
6.4.4.	Extrapolación de valores extremos	57
6.5.	PROPUESTA DE LAYOUT	58
6.5.1.	Alternativas de layout estructura de protección	59
6.5.2.	Verificación de las alternativas	60
6.5.3.	Selección de alternativa óptima de layout.....	63
6.6.	CLIMA DE OLAJE EN ZONA EXPUESTA A LA ESTRUCTURA	63
6.7.	DISEÑO DE ALTERNATIVA DE LAYOUT	64
6.7.1.	Periodo de retorno y probabilidad de encuentro	64
6.7.2.	Niveles de diseño	66
6.7.3.	Diseño hidráulico	67
6.7.4.	Diseño estructural.....	68
7.	RESULTADOS.....	69
7.1.	BASES DE DISEÑO	69
7.2.	ANÁLISIS DE DATOS	73
7.2.1.	Oleaje medido en terreno	73
7.2.2.	Oleaje en aguas profundas.....	76
7.2.3.	nivel del mar	79
7.3.	TRANSFERENCIA DE OLAJE HASTA SITIO DE INTERÉS	84
7.3.1.	Estimación del sitio de interés	84
7.3.2.	Transferencia de parámetros resumen	85
7.3.3.	Clima de oleaje aguas profundas con datos ajustados.....	100
7.3.4.	Modelación para obtenCIÓN DE COEFICIENTES DE AGITACIÓN	103
7.3.5.	Aplicación de coeficientes a datos de aguas profundas	106
7.3.6.	Clima de oleaje en sitio de interés	107
7.4.	CLIMA DE OLAJE EXTREMO	111
7.5.	PROPUESTA DE ALTERNATIVA DE ABRIGO	113
7.5.1.	Alternativas	113
7.5.2.	Verificación de las alternativas	114
7.5.3.	Selección de alternativa de layout	133
7.6.	CLIMA DE OLAJE EN ZONA EXPUESTA DEL ROMPEOLAS.....	135
7.6.1.	Metodología 1	136
7.6.2.	Metodología 2	142
7.6.3.	Oleaje de diseño	145
7.7.	DISEÑO DE LA ESCOLLERA.....	147
7.7.1.	Nivel de diseño	147
7.7.2.	Diseño hidráulico	149
7.7.3.	Sobrepaso Admisible	150
7.7.4.	Sobrepaso Estimado.....	151
7.7.5.	Escollera de protección.....	159
8.	DISCUCIONES Y RECOMENDACIONES	173
9.	CONCLUSIONES.....	182
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	185

INDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PÁG.
Figura 1-1: XV Región de Chile, Arica y Parinacota.....	3
Figura 1-2: Localización del proyecto.....	4
Figura 4-1: Oleaje aleatorio, superposición de ondas.	8
Figura 4-2: Densidad espectral en función de la frecuencia y dirección.	8
Figura 4-3: Determinación de F_t	15
Figura 4-4: Esquema de la cota de coronamiento.	18
Figura 4-5: Valores críticos de caudales de sobrepaso medio.....	19
Figura 4-6: Geometrías de estructuras relacionadas con el sobrepaso.....	20
Figura 4-7: Valores factores de rugosidad, estructuras permeables de pendiente suave.....	21
Figura 4-8: Modos de falla típicos en los elementos de la coraza.....	23
Figura 4-9: Área erosionada.....	24
Figura 4-10: Partes principales del rompeolas.	28
Figura 4-11: Sección típica de rompeolas sin sobrepaso.	29
Figura 5-1: Sondas provenientes de cartas náuticas electrónicas utilizadas.....	36
Figura 5-2: Levantamiento batimétrico de precisión Multihaz.	37
Figura 5-3: Digitalización de la línea de costa.	38
Figura 5-4: Posición del ADCP que registró el oleaje de terreno.	39
Figura 5-5: Ubicación de nodo de extracción de oleaje NOAA.	40
Figura 6-1: Esquema metodológico en base a los objetivos específicos.....	41
Figura 6-2: Planos mareales del nivel del mar.....	44
Figura 6-3: Coeficientes de agitación, sector Quiane, Arica.	52
Figura 6-4: Coeficientes de cambio en la dirección, sector Quiane, Arica.....	52
Figura 6-5: Curvas H_{m0} en aguas profundas y Tr a la cuadra de Valparaíso.....	55
Figura 6-6: Curvas H_{m0} en aguas profundas y Tr XV Región de Arica y Parinacota.	56
Figura 6-7: Ajuste de las distribuciones extremas para T periodo de retorno en años.....	58
Figura 6-8: Ejemplo de agitación, dentro y fuera de la zona abrigada.....	59
Figura 6-9: $F(x)$ en función de X	64
Figura 7-1: Excedencia para n periodos de retorno en función de la vida útil.	71
Figura 7-2: Rosa de oleaje en función de H_s mediciones de terreno.	75
Figura 7-3: Rosa de oleaje en función de T_p mediciones de terreno.....	76
Figura 7-4: Rosa de oleaje en función de H_s datos modelo global.	78
Figura 7-5: Rosa de oleaje en función de T_p datos modelo global.	79
Figura 7-6: Comparación entre serie medida y pronosticada.....	80
Figura 7-7: Residuos asociados a efectos meteorológicos.	80
Figura 7-8: Regresión lineal entre serie medida y pronosticada.	81
Figura 7-9: Señal de marea medida referida al nivel de reducción de sondas.....	83
Figura 7-10: Ubicación nodo coeficientes de agitación y cambio en la dirección.	84
Figura 7-11: Consideraciones del dominio de implementación del modelo.	86
Figura 7-12: Forzantes utilizadas en modelo de transferencia de oleaje.....	87
Figura 7-13: Malla batimétrica para modelo de transferencia de parámetros resumen.	89
Figura 7-14: Malla batimétrica en detalle en zona de proyecto.....	90
Figura 7-15: Comparación de series de tiempo, medidas versus simuladas.....	96
Figura 7-16: Regresión lineal de alturas significativas, modelo de transferencia de oleaje. ..	97
Figura 7-17: Regresión lineal de periodos peaks, modelo de transferencia de oleaje.	97

Figura 7-18: Regresión lineal de direcciones peaks, modelo de transferencia de oleaje.....	98
Figura 7-19: Errores absolutos durante toda la serie de tiempo simulada.....	99
Figura 7-20: Rosa de oleaje en función de Hs, datos NOAA ajustado.	102
Figura 7-21: Rosa de oleaje en función de Tp, datos NOAA ajustado.....	103
Figura 7-22: Coeficientes de agitación en "sitio de interés".	104
Figura 7-23: Coeficientes de cambio en la dirección en "sitio de interés".....	105
Figura 7-24: Rosa de oleaje en función Hs, datos transferidos al sitio de interés.	109
Figura 7-25: Rosa de oleaje en función de Tp, datos transferidos al sitio de interés.	109
Figura 7-26: Alternativa de layout 1, propuesta por GSI a DOP.	113
Figura 7-27: Alternativa de layout 2, propuesta elaborada por el autor.	114
Figura 7-28: Dominio para situación 225 [°].....	117
Figura 7-29: Condiciones de borde, situación 225[°].....	118
Figura 7-30: Sondas utilizadas en modelos de agitación, fuentes de información varias. ...	119
Figura 7-31: Malla de cálculo, situación 225[°].	120
Figura 7-32: Esponja numérica, situación 225[°].	121
Figura 7-33: Coeficientes de reflexión/Coeficientes de porosidad, para 8[s].....	121
Figura 7-34: Coeficientes de porosidad, situación 225[°].	123
Figura 7-35: Ubicación nodo agitación dentro de zona abrigada.	124
Figura 7-36: Puntos de control, verificación convergencia.	125
Figura 7-37: Puntos verificación Hs, convergencia de valores.....	126
Figura 7-38: Probabilidades de excedencia de alturas de Hs, dársena, layout 1.	129
Figura 7-39: Probabilidades de excedencia de alturas de Hs, dársena, layout 2.	132
Figura 7-40: Tramos de secciones estructura de protección principal.	135
Figura 7-41: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 1.....	136
Figura 7-42: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 2.....	137
Figura 7-43: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 3.....	138
Figura 7-44: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 4.....	139
Figura 7-45: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 5.....	140
Figura 7-46: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 6.....	141
Figura 7-47: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 225[°].....	143
Figura 7-48: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 240[°].....	144
Figura 7-49: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 255[°].....	144
Figura 7-50: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 270[°].....	145
Figura 7-51: Probabilidad de excedencia 30 años de oleaje pie de la obra.	152
Figura 7-52: Caudales de sobrepaso Tramo 11 cota +5,5 mNRS Rocas.....	153
Figura 7-53: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,0 mNRS Rocas.	153
Figura 7-54: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,5 mNRS Rocas.	154
Figura 7-55: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +5,5 mNRS Cubos.	154
Figura 7-56: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,0 mNRS Cubos.	155
Figura 7-57: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,5 mNRS Cubos.	155
Figura 7-58: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +5,5 mNRS Cubípodos.....	156
Figura 7-59: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,0 mNRS Cubípodos.....	156
Figura 7-60: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,5 mNRS Cubípodos.....	157
Figura 7-61: Secciones típicas de enrocados de protección costera.	159
Figura 7-62: M50 Van der Meer (1998) para olas tipo Plunging, elementos tipo roca.	161
Figura 7-63: M50 Van der Meer (1998) para olas tipo Surging, elementos tipo roca.	162
Figura 7-64: M50 Van der Meer (1988b) para elementos tipo cubos de hormigón.	163
Figura 7-65: M50 Hudson (1974) para elementos tipo cubípodos.	165
Figura 7-66: Planta Layout Rompeolas y dársena proyectada.	170

Figura 7-67: Sección Transversal Cabezo.....	170
Figura 7-68: Sección Transversal Tramo 11'.....	171
Figura 7-69: Sección Transversal Tramo 22'.....	171
Figura 7-70: Sección Transversal Tramo 33'.....	171
Figura 7-71: Sección Transversal Tramo 44'.....	172
Figura 8-1: Tormenta Julio 2013, Hs para aguas profundas y someras.	175
Figura 8-2: Marejada del 4 de Julio 2013, sector cercano a Playa Brava.....	176
Figura 8-3: Marejada del 4 de Julio 2013, sector Playa el Laucho.	176
Figura 8-4: Tormentas Agosto 2015, Hs aguas profundas y someras.....	177
Figura 8-5: Marejada 9 Agosto 2015, sector norte Puerto de Arica.	177
Figura 8-6: Ola el Buey, marejada 9 Agosto 2015, Arica.	178
Figura 8-7: Ejercicio alturas de olas de retorno.	179

INDICE DE TABLAS

CONTENIDO	PÁG.
Tabla 1-1: Cuadro de coordenadas UTM Huso 19 S-WGS84.	4
Tabla 4-1: Ensayos para obtención de coeficientes de estabilidad.	27
Tabla 5-1: Posición geográfica del instrumento ADCP con el que se midió oleaje.	38
Tabla 5-2: Posición de extracción de datos modelos globales NOAA.	39
Tabla 5-3: Posición geográfica UTM -19S del instrumento.	40
Tabla 6-1: Información sobre bases de datos y métodos de análisis de valores extremos. ..	54
Tabla 6-2: Metodología de determinación de vida útil de obras marítimas.	65
Tabla 6-3: Corrección del nivel del mar debido a la presión atmosférica local.	67
Tabla 7-1: Vida útil para estructuras marítimas.	69
Tabla 7-2: ERI, SERI y vida útil mínima para diferentes tipos de zonas protegidas.	70
Tabla 7-3: Riesgos máximos admisibles para determinación de periodo de retorno.	72
Tabla 7-4: Distribución de Hs y Tp medición de terreno.	73
Tabla 7-5: Distribución de Dp y Hs medición de terreno.	74
Tabla 7-6: Distribución de Dp y Tp medición de terreno.	74
Tabla 7-7: Distribución de Hs y Tp datos NOAA.	77
Tabla 7-8: Distribución de Dp y Hs datos NOAA.	77
Tabla 7-9: Distribución de Dp y Tp datos NOAA.	78
Tabla 7-10: Constituyentes armónicos de la marea, cph=ciclos por hora.	82
Tabla 7-11: Planos mareales referidos al NRS.	83
Tabla 7-12: Posición nodo de extracción de Coeficientes.	84
Tabla 7-13: Área máxima de elementos dentro de cada transición.	88
Tabla 7-14: Discretización de alturas significativas.	92
Tabla 7-15: Discretización de periodos peaks.	93
Tabla 7-16: Error absoluto medio por clases de periodos.	93
Tabla 7-17: Error absoluto medio por clases de alturas significativas.	94
Tabla 7-18: Factor de ajuste para las alturas de olas significativas por clase.	94
Tabla 7-19: Factor de ajuste para los periodos peaks por clase.	95
Tabla 7-20: Distribución de Hs y Tp, datos NOAA ajustado.	100
Tabla 7-21: Distribución de Dp y Hs, datos NOAA ajustado.	101
Tabla 7-22: Distribución de Dp y Tp, datos NOAA ajustado.	101
Tabla 7-23: Límites de data de oleaje NOAA ajustada.	103
Tabla 7-24: Límites de las combinaciones de propagaciones unitarias.	104
Tabla 7-25: Rangos por clase para periodos y direcciones.	106
Tabla 7-26: Distribución de Hs y Tp, en el sitio de interés.	107
Tabla 7-27: Distribución de Dp y Hs, en el sitio de interés.	108
Tabla 7-28: Distribución de Dp y Tp, en el sitio de interés.	108
Tabla 7-29: Eventos extremos aislados por año.	111
Tabla 7-30: Extrapolación de oleaje extremo utilizando distribución Weibull.	112
Tabla 7-31: Escenarios unitarios de agitación.	115
Tabla 7-32: Coeficientes de reflexión para periodos < 20[s].	122
Tabla 7-33: Nodo de agitación dentro de zona abrigada, coordenadas UTM [m].	123
Tabla 7-34: Distribución de Hs y Tp para la dirección 225[°], alternativa 1.	127
Tabla 7-35: Distribución de Hs y Tp para la dirección 240[°], alternativa 1.	127
Tabla 7-36: Distribución de Hs y Tp para la dirección 255[°], alternativa 1.	128

Tabla 7-37: Distribución de Hs y Tp para la dirección 270[°], alternativa 1.	128
Tabla 7-38: Distribución de Hs y Tp para la dirección 225[°], alternativa 2.	130
Tabla 7-39: Distribución de Hs y Tp para la dirección 240[°], alternativa 2.	130
Tabla 7-40: Distribución de Hs y Tp para la dirección 255[°], alternativa 2.	131
Tabla 7-41: Distribución de Hs y Tp para la dirección 270[°], alternativa 2.	131
Tabla 7-42: Condiciones límites de operación naves menores y mayores.	133
Tabla 7-43: Criterio de PIANC para operación de embarcaciones en puertos.	134
Tabla 7-44: Operatividad dentro de dársena según alternativas.	134
Tabla 7-45: Oleaje para 70 años de Tr transferido al pie de la estructura.	142
Tabla 7-46: Oleaje de diseño para cada tramo.	146
Tabla 7-47: Planos Mareales.	147
Tabla 7-48: Criterios de sobrepaso admisible medio.	150
Tabla 7-49: Excedencia para caudal de sobrepaso admisible roca.	157
Tabla 7-50: Excedencia para caudal de sobrepaso admisible cubo.	157
Tabla 7-51: Excedencia para caudal de sobrepaso admisible cubípodo.	158
Tabla 7-52: Caudal medio para cada tramo de estructura, roca.	158
Tabla 7-53: Caudal medio para cada tramo de estructura, cubo.	158
Tabla 7-54: Caudal medio para cada tramo de estructura, cubípodo.	158
Tabla 7-55: Resumen estabilidad teórica coraza rompeolas principal.	166
Tabla 7-56: Elementos teóricos calculados para la composición de rompeolas, tronco.	167
Tabla 7-57: Elementos teóricos calculados para la composición de rompeolas, cabezo.	167
Tabla 7-58: Disposición final estabilidad elementos Tronco.	168
Tabla 7-59: Disposición final estabilidad elementos Cabezo.	168
Tabla 7-60: Ancho de la Berma.	169
Tabla 8-1: Alturas de olas extremas en aguas profundas, 1980 - 2009, Arica.	180

RESUMEN

El presente proyecto de título, tiene por objetivo proponer el diseño de una estructura de protección costera para la futura Caleta de Pescadores Artesanales de Arica, en la localidad de Quiane, XV Región, la cual actualmente se encuentra dentro del Puerto de Arica. Dentro de las necesidades de re-acomodar la caleta es el plan maestro de ampliación del puerto, además de generar mejores condiciones de operación a los artesanales, debido a que el alto tráfico de camiones y personas dificulta su actividad. Por tanto, en el presente trabajo se entrega analiza y entrega cada antecedente necesario para evaluar la mejor alternativa de diseño de una obra de abrigo frente al oleaje, con el fin de generar una dársena que permita la mayor parte del tiempo la actividad de pesca artesanal y todas las acciones colaterales que conlleva dicha profesión.<

Para llevar a cabo este proyecto, es primordial conocer y estudiar las condiciones naturales del sector de estudio tales como oleaje, mareas, batimetría, corrientes, vientos entre otros. Por lo tanto, es necesario recurrir a distintas fuentes de información, de carácter gratuita y a nivel de consultoría, con el fin de definir el clima de oleaje operacional, clima de oleaje extremo, clima de oleaje al pie de la futura obra de protección, niveles de diseño y diferentes criterios asociados a la operatividad para el funcionamiento de la futura caleta de pescadores.

En base a los antecedentes proporcionados por la Dirección de Obras Portuarias y GSI Ingenieros Ltda., fue posible realizar una recopilación de información de estudios básicos, de pre-factibilidad y de ingeniería de detalle, con los cuales se generaron alternativas de estructuras de protección costera para proporcionar el abrigo necesario a las actividades pesqueras. La elección de la mejor alternativa de layout estuvo condicionada por criterios de operación y climáticos proporcionados por fuentes bibliográficas tales como las Recomendaciones de Obras Marítimas y PIANC, los cuales se encuentran en el estado del arte actual.

Para llevar a cabo el análisis y recomendación de estructura óptima para la generación de condiciones de abrigo, se consideró la utilización de datos de oleaje de aguas profundas de fuente de libre acceso (datos NOAA), fuente de información que fue calibrada en base a estudios de campo en el sector de estudio mediante la utilización de modelos matemáticos para la transferencia de oleaje (en este caso MIKE 21 SW Y MIKE 21 BW). Esta información permitió conocer y determinar condiciones de oleaje operacional y de largo plazo en la zona de estudio, lo cual es primordial para poder proponer condiciones o configuraciones de obras de abrigo, evaluación de las mismas frente a las cargas producidas por las olas, variables astronómicas, meteorológicas y de batimetría, antecedentes o estudios que son de vital importancia para generar adecuadas condiciones de planimetría y diseño.

Finalmente, la estructura óptima fue evaluada mediante cargas hidráulicas con el fin de proponer la estabilidad de las obras mediante la utilización de elementos tipo roca, cubos y cubipodos. Estos últimos aún no son puestos a prueba en Chile, sin embargo, proponen coeficientes de estabilidad, relación peso/trabazón superiores a otros prefabricados de su gama. Por tanto, la introducción y utilización de elementos prefabricados con mejores estándares a nuestro país puede ser una gran solución a los desastres costeros que se han producido en los últimos eventos extremos.

1. INTRODUCCIÓN

La geografía del país muestra que los sectores más poblados corresponden a las Ciudades Puerto, urbanización cercana al borde costero. Por ejemplo, en la zona norte (desde Puerto de Arica a Puerto Valparaíso – San Antonio) las distancias entre puertos son extensas y la mejor comunicación es vía marítima, en la zona central (desde Puerto Valparaíso – San Antonio a Puerto Montt) el sistema de carreteras es adecuado y para el abastecimiento se utiliza una combinación entre el transporte marítimo y terrestre, por último, en la zona sur (desde Puerto Montt hasta Punta Arenas) el cabotaje es básicamente el único transporte que abastece y satisface las necesidades de la población. Por tanto, el borde costero y su urbanización corresponden a un recurso estratégico, el cual permite el crecimiento económico y social de nuestro país (Ocho Libros Editores, 2004).

Claramente, el que la población y las actividades económicas estén concentradas cada vez más en las zonas costeras, aumenta gran parte el riesgo a las vidas humanas, a la pérdida de bienes materiales y fuentes de trabajo. Este riesgo asociado, generalmente está provocado por eventos tales como tsunamis, terremotos, tormentas, inundaciones, marejadas, etc., los cuales deben ser disminuidos con algún tipo de estructura de protección o defensa costera que permita el tranquilo desarrollo de las actividades en las zonas costeras.

Las obras de defensa costera proveen cierta tranquilidad a las actividades que se realizan en el borde costero, dentro de los cuales existen los rompeolas, diques, espigones, revestimientos costeros, diques exentos, muros, etc., cuyo objetivo de construcción es disminuir y/o disipar la energía del oleaje, lo cual permite generar mejores condiciones de abrigo a la inversión privada y pública.

Las obras marítimas, en términos de funcionalidad, poseen cierta dependencia con la acción del oleaje, operaciones tales como estiba y desestiba en puertos, esfuerzos sobre las embarcaciones, fondeos, cargas por oleaje en las defensas costeras, etc., (Iñigo J. Losada, 2000).

Al momento de realizar Layouts¹, geometría de muelles, puertos y dársenas, etc., es importante conocer cómo se comportarán las oscilaciones fuera y dentro de ellos. La manera de afrontar estos estudios es mediante técnicas de simulaciones físicas y numéricas.

El presente proyecto de título, propone el diseño de una estructura de protección para las obras marítimas de la Caleta de Pescadores Artesanales de Arica, la que inicialmente será relocalizada al sector de Quiane (Tomando como input el estudio de pre-factibilidad desarrollado por la consultora GSI Ltda., 2013), XV Región de Arica y Parinacota. Actualmente, la actividad de la caleta antes mencionada está circunscrita al interior de la dársena del puerto de Arica, perteneciente a la empresa portuaria de Arica (EPA). El área que utiliza es de aproximadamente 10.000 [m²], donde se ubican las obras marítimas y terrestres que dan soporte a la actividad pesquera de la zona. En este sector existen actividades específicas, tales como: venta de los productos, turismo, actividades de pesca,

¹Bosquejo de estructuras a nivel de arquitectura y funcionalidad.

limpieza de productos, estiba y desestiba de las naves pesqueras, restaurantes, sindicatos, reparación de embarcaciones etc. Por tanto, junto con la actividad portuaria, la mezcla de actividades genera un ambiente crítico que dificulta las proyecciones de crecimiento del puerto de Arica.

Junto con lo anterior y las necesidades de ampliación del puerto de Arica, respaldadas por su Plan Maestro, hacen que la actividad pesquera artesanal desarrollada en sus instalaciones deba salir hacia una zona apropiada, considerando las variables ambientales, legales, técnicas y socioeconómicas. Esto, con el fin que puerto de Arica, pueda aumentar sus áreas de maniobras e incrementar las áreas de apoyo a la carga y descarga de las naves comerciales.

En el año 2013, La Dirección Regional de Obras Portuarias de Arica llamó a licitación el proyecto denominado "Construcción Obras de Relocalización Caleta Pesquera Arica" cuya finalidad es de disponer de una alternativa de infraestructura marítima y costera que permita dar continuidad a la actividad pesquera fuera del recinto portuario y que sea factible de ejecutar desde el punto de vista técnico y económico. Es por ello que basados en los resultados obtenidos por la empresa Consultora GSI Ingeniería (adjudicataria del proyecto), este proyecto de título propone realizar un re-diseño de las obras marítimas, específicamente el rompeolas principal.

En función de lo anterior, se realizará el diseño considerando los antecedentes proporcionados por la empresa Consultora aludida anteriormente, respecto a las condiciones naturales dominantes en el sector de estudio. Cabe señalar que la ubicación y optimización del layout quedaron definidas en los resultados obtenidos por GSI Ingeniería en el proyecto, por lo que el presente trabajo constituye solo el diseño de ingeniería de la obra de abrigo principal.

Adicionalmente, se utilizó este ejemplo práctico para aplicar una propuesta metodológica de todas las consideraciones utilizadas en el diseño, desde la selección del oleaje en aguas profundas para la determinación de la altura de diseño hasta la diseño propiamente tal, de las obras de protección.

Ubicación del proyecto

El proyecto, "Propuesta de Diseño Estructura de Protección para Caleta de Pescadores Artesanales de Arica", se ubica en la región XV de Arica y Parinacota, específicamente en la localidad de Quiane.

La Región XV de Arica y Parinacota, tiene una población de al menos 235.081² habitantes y una superficie total aproximada de 16.873 km², cuya capital es Arica. Su capital, es una ciudad-puerto, la cual está ubicada a solo 18 km al sur de la frontera Chile-Perú. A continuación, en la Figura 1-1 es posible observar los límites administrativos de la región incluyendo la demarcación geográfica espacial.

²Según la proyección INE 2014.

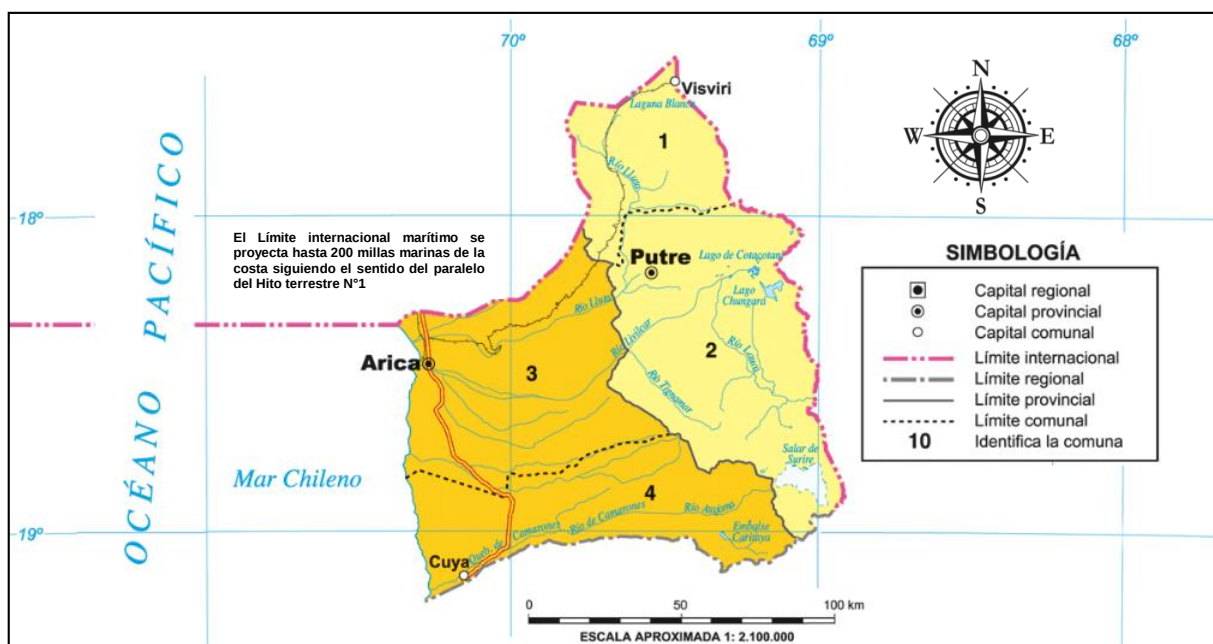


Figura 1-1: XV Región de Chile, Arica y Parinacota.

Fuente: www.educarchile.cl.

El sector específico de la futura caleta de pescadores, es en Quiane, Arica, a unos 3 km (en línea recta) al Sur del puerto de Arica. Este lugar se ubica previo a una zona industrial pesquera, CORPESCA³ (ver Figura 1-2).

³Empresa Pesquera Industrial, más información ver '<http://www.corpesca.cl/historia/>'.



Figura 1-2: Localización del proyecto.

Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

Las características hidrodinámicas del sector, generan que el oleaje sea muy apetecido por deportistas náuticos del mundo del bodyboard y del surf. Sus condiciones de rompiente son del tipo voluta debido a bancos de arena y arrecifes en el fondo marino.

En el área de intervención del proyecto, actualmente se celebran diversos campeonatos, en los cuales destaca el Circuito Internacional Copa 'Pelao Guillén'⁴, el cual es un clasificatorio al mundial de bodyboard 'Arica ChileanChallenge'.

En la imagen anterior (Figura 1-2) es posible identificar la zona demarcada con los puntos A, B, C, D y E, en la Tabla 1-1 se muestran sus coordenadas, acotando el sitio de proyecto.

Tabla 1-1: Cuadro de coordenadas UTM Huso 19 S-WGS84.

Punto	Coordenada Este	Coordenada Norte
A	360.372 m E	7.952.638 m S
B	361.028 m E	7.953.103 m S
C	360.585 m E	7.953.818 m S
D	359.894 m E	7.953.377 m S

Fuente: Elaboración propia.

⁴ Ver '<http://www.clubpelaoguillen.cl/>'.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer el diseño de una dársena para proveer abrigo a la futura caleta de pescadores artesanales de Arica.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar datos disponibles: Mediciones de oleaje y marea, datos provenientes de modelos globales.
- Realizar clima de oleaje en aguas profundas.
- Realizar transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras (sitio de interés), utilizando parámetros de resumen.
- Realizar clima de oleaje medio en sitio de interés.
- Realizar clima de oleaje extremo en sitio de interés.
- Proponer alternativas de Layout de obras de protección primaria.
- Realizar transferencia de oleaje desde el sitio de interés hacia el interior de las dársenas de las alternativas de Layout, para verificar la agitación y clima de oleaje en ellas.
- Seleccionar la alternativa de Layout de acuerdo a criterios de diseño y resultados del punto anterior.
- Realizar transferencia de oleaje desde el sitio de interés hacia la estructura del Layout seleccionado, con el fin de verificar el clima de oleaje al pie del talud de la obra de protección costera.
- Proponer diseño de estructura de protección utilizando roca de cantera, prefabricados de hormigón tipo cubos y cubípodos.

3. ALCANCES

El diseño a proponer se centra principalmente en la evaluación de las condiciones de abrigo para oleaje, generadas por el brazo principal del rompeolas del proyecto. No se considera el análisis de resonancia por ondas largas y estados de mar local, solo considera el efecto de ondas de tipo *swell* o mar de fondo completamente desarrollado.

La base de datos utilizada corresponde a la disponible gratuitamente en los servidores en línea de la NOAA, el hindcasting fue descargado del modelo Wavewatch III (1980-2009) y 2013 mes de agosto y septiembre para calibración de modelo de oleaje. Cabe destacar que las bases de datos utilizadas consideran solo parámetros resumen (Hs, Tpeak, Dpeak).

El modelo de oleaje de tipo espectral, MIKE 21 SW, solo fue calibrado en ventana de campaña de mediciones desarrollado en la estación de invierno 2013, donde las condiciones de borde fueron forzadas con datos de oleaje NOAA desde aguas profundas. El proceso de validación del modelo no se llevó a cabo debido a que no se poseen datos de campo de una segunda campaña de mediciones.

Los estudios básicos de las condiciones naturales utilizadas para el desarrollo del proyecto corresponden a oleaje, mareas, batimetría y variables meteorológicas para definir el nivel de diseño. Los datos medidos en terreno y antecedentes utilizados fueron proporcionados por la Dirección de Obras Portuarias (en adelante DOP) utilizando como apoyo a la solicitud la actual Ley de Transparencia.

Los softwares de modelamiento matemático, MIKE 21 SW – MIKE 21 BW fueron proporcionados por DHI Perú (mediante licencia gratuita de carácter académico) y GSI Ingenieros Ltda., respectivamente.

Las cartas náuticas utilizadas para generar los modelos batimétricos que fueron proporcionados por la Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, de la Universidad de Valparaíso, las cuales fueron digitalizadas a partir de su formato original en papel.

Finalmente se realiza una propuesta de diseño de la obra de protección principal, incorporando elementos de selección desde el punto de vista técnico.

4. MARCO TEÓRICO

El marco teórico que se desarrolla en este capítulo permite dar a conocer conceptos básicos sobre el tema en cuestión, los cuales son necesarios para el complemento del presente proyecto.

En primera instancia se definen conceptos tales como definición de oleaje utilizando un enfoque espectral. Posterior a ello, se detallan cuatro metodologías de transferencia de oleaje con el fin de verificar la técnica adecuada a utilizar en el proyecto, teniendo en cuenta los recursos disponibles. Además, junto con conocer definiciones, enfoques y técnicas, es necesario conocer las herramientas de modelamiento matemático más utilizadas en la actualidad.

De manera secuencial es importante conocer los distintos modos de análisis de valores extremos, debido a que es importante estimar condiciones a largo plazo y que sean consecuentes a la realidad actual.

Finalmente, debido a que el objetivo del presente proyecto es proponer un diseño de estructura de protección al oleaje para proporcionar abrigo (dársena), es necesario identificar criterios, metodologías de diseño y la mayoría de las variables asociadas, herramientas que permiten identificar el óptimo diseño de la estructura propuesta.

4.1. OLEAJE IRREGULAR ENFOQUE ESPECTRAL

El análisis espectral del oleaje consta en la suposición de que la superficie marina corresponde a una superposición de "n" ondas regulares, las cuales poseen diferentes características tales como periodos amplitudes y direcciones, en donde cada oscilación tiene cierta densidad espectral de energía (Dominguez, 2011). A continuación, en la Figura 4-1 y Figura 4-2, es posible observar lo explicado anteriormente de manera gráfica.

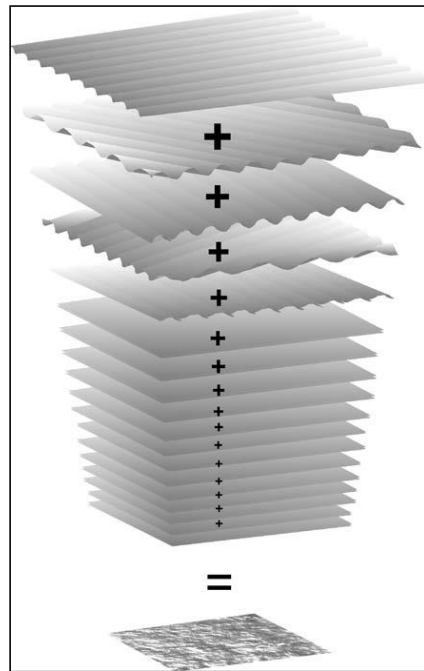


Figura 4-1: Oleaje aleatorio, superposición de ondas.
Fuente: Holthuijsen (2007).

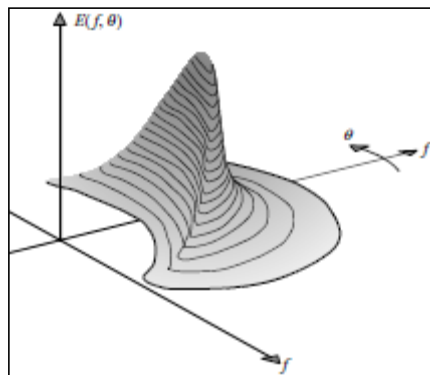


Figura 4-2: Densidad espectral en función de la frecuencia y dirección.
Fuente: Holthuijsen (2007).

Para un estado de mar, la superficie del mar representada por la superposición de infinitas ondas con periodos, direcciones y amplitudes distintas, puede representarse con la siguiente expresión.

$$\eta(t) = \eta_0 + \sum_i A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i)$$

(Ec. 4-1)

η_0 : superficie del mar inicial

A_i : amplitud de la onda

f_i : frecuencia de la onda

φ_i : dirección de la onda

El término anterior da cuenta de la sumatoria de i-ésimas ondas superpuestas con distintos periodos y direcciones sobre la superficie del mar en un periodo de tiempo t.

Cuando las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras se encuentran en pleno equilibrio, se dice que el fenómeno se encuentra en estado estacionario, lo cual se conoce como un estado de mar.

4.2. METODOLOGÍAS PARA LA TRANSFERENCIA DE OLAJE

Nicolau (2006), en su memoria para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad de Chile, evalúa diversas metodologías de transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras. El estudio se efectuó de forma teórica y práctica, mediante la aplicación metodologías de transferencia, para el presente trabajo se consideró estudiar las siguientes metodologías: Parámetros de resumen, Cuasi Purista, Cuasi Purista Modificado y Purista.

A continuación, se presentan un resumen metodologías anteriormente mencionadas.

4.2.1. MÉTODO DE TRANSFERENCIA DE PARÁMETROS DE RESUMEN

Antes de presentar este método, es necesario saber que los parámetros de resumen son extraídos desde los espectros medidos en aguas profundas mediante un clima de oleaje de corto plazo, en donde se caracterizan estados de mar mediante valores típicos. Estos valores pueden ser:

- Altura de ola significativa: H_m0
- Periodo peak: T_p
- Periodo medio: T_m
- Dirección peak: D_p
- Dirección media: D_m

Por lo tanto, para transferir el oleaje utilizando este método es necesario propagar estos datos desde aguas profundas hacia aguas someras mediante un modelo numérico.

El oleaje, en trayectoria hacia aguas someras o poco profundas cambia, es decir, su altura de ola se ve aumentada o disminuida, el periodo se mantiene constante o varía (en el caso que se consideren efectos locales) y la dirección cambia por efectos de difracción y/o refracción, lo que genera una pérdida o ganancia de energía.

Monsalve (2010) propone que la altura de ola y la dirección de la ola transferida a un sitio de interés, se define como:

$$H_{transferido} = H_{AP} * K_a(f_i, \theta_i) \quad (\text{Ec. 4-2})$$

H_{AP} : altura de la ola en aguas profundas
 $K_a(f_i, \theta_i)$: coeficiente de agitación en función de las frecuencias y direcciones del espectro

$$\theta_{transferido} = \theta_{AP} + \Delta\theta(f_i, \theta_i) \quad (\text{Ec. 4-3})$$

θ_{AP} : dirección de la ola en aguas profundas
 $\Delta\theta(f_i, \theta_i)$: cambio en la dirección producto de la propagación

Este tipo de transferencia de oleaje es aceptable utilizarlo cuando los efectos que predominan en la propagación del oleaje son la refracción y el asomeramiento, no así cuando predomina la difracción y otros efectos no lineales (Monsalve, 2010).

4.2.2. MÉTODO DE TRANSFERENCIA CUASI PURISTA

Esta metodología consiste en generar coeficientes de agitación y cambios en la dirección de la onda incidente en el sitio de interés (aguas someras), para luego ser aplicados a cada "bin" de los espectros 2D en aguas profundas.

Para la obtención de estos parámetros de cambio, es necesario realizar propagaciones de oleaje unitario ($H_{m0} = 1$ m) en un rango de direcciones y de frecuencias, que dependen del ancho del espectro en ambas variables.

En el trabajo realizado por Massel (1996), indica que las componentes espectrales (o "bines") son modificadas multiplicando cada una por el cuadrado del coeficiente de agitación asignado, considerando la variación en la dirección que pueda tener. Dicho de otra manera:

$$S(f, \theta)_{SI} = (K_a(f, \theta)_{SI})^2 \frac{dS(\theta_0)}{d\theta_{SI}} S(f, \theta_0); \quad SI: \text{sitio de interés} \quad (\text{Ec. 4-4})$$

$S(f, \theta)_{SI}$: función densidad espectral en el sitio de interés
 $(K_a(f, \theta)_{SI})$: coeficiente de agitación en sitio de interés
 $\frac{dS(\theta_0)}{d\theta_{SI}}$: cambio en la dirección de aguas profundas con respecto al sitio de interés
 $S(f, \theta_0)$: función densidad espectral en aguas profundas

Una vez transferidos los espectros, "bin" a "bin", son sometidos al proceso de clima de oleaje de corto plazo, con el fin de cuantificar su respectiva altura de ola, periodo y dirección en el sitio de interés.

Monsalve (2010), en su trabajo explica que existen ciertas ventajas y desventajas de este método. Algunas ventajas indican que es factible caracterizar todas las variaciones de energía y de dirección en el espectro, otro punto a favor es que al realizar este tipo de transferencia espectral, es posible incorporar los efectos no lineales que el método de transferencia de parámetros resumen no puede hacer (difracción, refracción y asomeramiento conjuntamente). Nicolau (2006), mediante este método obtuvo mejores correlaciones y bondad en sus resultados, con respecto a la transferencia de parámetros resumen. La desventaja es la alta complejidad con respecto al método de transferencia utilizando parámetros de resumen.

4.2.3. MÉTODO DE TRANSFERENCIA CUASI PURISTA MODIFICADO

Este método es un tanto equivalente al procedimiento anterior (Método cuasi purista), donde los espectros son transferidos desde aguas profundas hacia aguas someras incorporando la rotura de la ola, tomando en cuenta que la transferencia del oleaje estará determinada en función de la dirección, periodo y altura de la onda.

4.2.4. MÉTODO DE TRANSFERENCIA PURISTA

Nicolau (2004), define el método de transferencia de oleaje purista como la propagación del espectro completo en aguas profundas hacia aguas someras (sitio de interés). Este proceso puede ser llevado a cabo mediante modelos numéricos espectrales de oleaje. Claramente los modelos que son capaces de realizar este procedimiento son variados, algunos resuelven las ecuaciones de balance de acción de la onda, otros la ecuación de pendiente suave, y otros las ecuaciones de Boussinesq, considerando que los métodos de resolución pueden ser por elementos finitos, diferencias finitas o de volúmenes finitos. Por ende, el resultado de la transferencia del espectro completo es variable y complejo.

4.3. ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS

El clima de oleaje de diseño se basa en el análisis de oleaje extremo en aguas profundas. Este análisis se debe realizar con al menos 20 años de hindcasting, considerando un evento extremo aislado por año como mínimo, cada uno debe contar con información de su altura significativa, periodo peak, dirección peak, fecha y duración de la tormenta. Con la información obtenida, luego del aislamiento del oleaje extremo es necesario realizar un análisis estadístico considerando periodos de retorno para 5, 10, 25, 50 y 100 años (Pub. SHOA 3201).

Una vez realizado el análisis de valores extremos del oleaje, se obtiene la ola de diseño, la cual corresponde a la altura de ola para un cierto periodo de retorno de "n" años. Por tanto, para el diseño de estructuras costeras es bueno utilizar la probabilidad de excedencia de la altura de diseño dentro de la vida útil de la estructura.

A continuación se detalla el procedimiento adecuado para conocer la altura de diseño, periodo de retorno y la probabilidad de que ocurra este evento durante la vida útil de la estructura a proyectar mediante el análisis de valores extremos desarrollado por Zhou Liu (2001).

- Escoger las alturas de olas extremas en la data de oleaje de largo plazo (al menos 20 años de información).
- Escoger varias distribuciones teóricas como candidatas para determinar la distribución de olas extremas.
- Emplear las distribuciones teóricas escogidas para determinar las alturas de olas extremas.
- Escoger dentro de las distribuciones teóricas propuestas, la que tenga mejor bondad en el ajuste.
- Cálculo de la altura de ola de diseño correspondiente para cierto periodo de retorno.
- Determinación del intervalo de confianza para las alturas de diseño con el fin de tener en cuenta la variabilidad del ajuste e incertidumbre entre la medición y el retro-análisis.

4.3.1. DETERMINACIÓN DE VALORES EXTREMOS

Para la determinación de las alturas de olas extremas es necesario contar con un registro de oleaje (obtenido por retro análisis basados en información meteorológica) de largo plazo (igual o superior a 20 años de datos). Zhou Liu & Peter Frigaard (2001) propone tres metodologías:

- Utilizar el registro completo de oleaje, de tal forma de incorporar en el análisis todos los eventos ocurridos.
- Considerar el uso de la altura de ola máxima para cada año del registro de oleaje.
- Establecer un umbral de altura de ola establecido como oleaje extremo, determinando que los eventos sobre este nivel serán considerados en el análisis.

4.3.2. DISTRIBUCIONES TEÓRICAS CANDIDATAS

Se considerarán como distribuciones candidatas para el ajuste del oleaje extremo las siguientes (Zhou Liu, 2001).

$$\text{Weibull} \quad F = F_X(x) = P(X < x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k} \quad (\text{Ec. 4-5})$$

$$\text{Gumbel} \quad F = F_X(x) = P(X < x) = e^{-e^{\left(\frac{x-B}{A}\right)}} \quad (\text{Ec. 4-6})$$

X: corresponde a la altura de ola, puede ser $H_s, H_{1/10}, H_{max}$

x: realización de X

F: probabilidad de no excedencia de x

A, B, k: parámetros constantes de cada distribución

4.3.3. MÉTODOS DE AJUSTE Y PROCEDIMIENTO

Existen variados métodos de ajuste para datas de oleaje extremo, uno de los más usados es el método de los mínimos cuadrados y máximos cuadrados. A continuación se define el método de los mínimos cuadrados (Zhou Liu, 2001).

Mediante la siguiente ecuación de la recta, son reescritas las expresiones.

$$X = A Y + B \quad (\text{Ec. 4-8})$$

En donde Y es la variable reducida, definida de acuerdo a la función de distribución respectiva, A y B corresponden a la pendiente e intercepto..

$$Y = (-\ln(1 - F))^{1/k} \quad \text{Distribución Weibull} \quad (\text{Ec. 4-9})$$

$$Y = -\ln(-\ln F) \quad \text{Distribución Gumbel} \quad (\text{Ec. 4-10})$$

k: parámetro de ajuste constante

Este proceso de ajuste se reduce como:

- Ordenar la data de oleaje extrema en orden descendente, x_i , para $i = 1, 2, \dots, n$
- Asignar la probabilidad de no excedencia F_i para cada x_i mediante un método apropiado de trazado, con lo que se obtendrá el par (F_i, x_i) , para $i = 1, 2, \dots, n$
- Calcular el valor Y obteniendo un nuevo par (y_i, x_i) , para $i = 1, 2, \dots, n$
- Determinar los coeficientes de regresión de $X = A Y + B$

$$A = \frac{Cov(Y, X)}{Var(Y)} \quad B = \bar{X} - A \bar{Y} \quad (\text{Ec. 4-11})$$

$$Var(Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2 \quad (\text{Ec. 4-12})$$

$$Cov(Y, X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})(x_i - \bar{X}) \quad (\text{Ec. 4-13})$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{Ec. 4-14})$$

4.3.4. FÓRMULA DE POSICIÓN PARA EL TRAZADO

La probabilidad de no excedencia, F_i , debe ser asignada para cada x_i , puede ser determinada en base a tres principios estadísticos, el de "frecuencia de las muestras", "distribución de la frecuencia" y por último "orden estadístico" (Zhou Liu, 2001).

Frecuencia de la muestra

Es simplemente la frecuencia acumulada de las muestras.

$$F_i = 1 - \frac{i}{n} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{Ec. 4-15})$$

x_i : corresponde a la data de olas en orden descendente

F_i : probabilidad de no excedencia para x_i

n : tamaño de la muestra

Cuando i es el último valor de la data, notar que $F_i = 0$, lo cual es una desventaja.

Distribución de las frecuencias

Se asume que la variable aleatoria X tiene una función de distribución acumulativa F_X . la altura más grande i en la muestra, X_i , y por consecuencia $F_{X_i}(x_i)$, la frecuencia acumulada de x_i también es aleatoria. Este método determina la posición en el gráfico de x_i a través del promedio, de la mediana o de la moda de la variable aleatoria $F_{X_i}(x_i)$. Este método es independiente del método de distribución que se esté usando, para este caso se analizará con respecto a la distribución de Weibull, en donde se emplea el promedio de $F_{X_i}(x_i)$ para determinar la frecuencia acumulativa F_i para cada x_i .

$$F_i = 1 - \frac{i}{n+1} \quad (\text{Ec. 4-16})$$

Estadísticas de orden

Este método determina la posición de x_i por medio del promedio, la media y la moda de la variable aleatoria ordenada X_i .

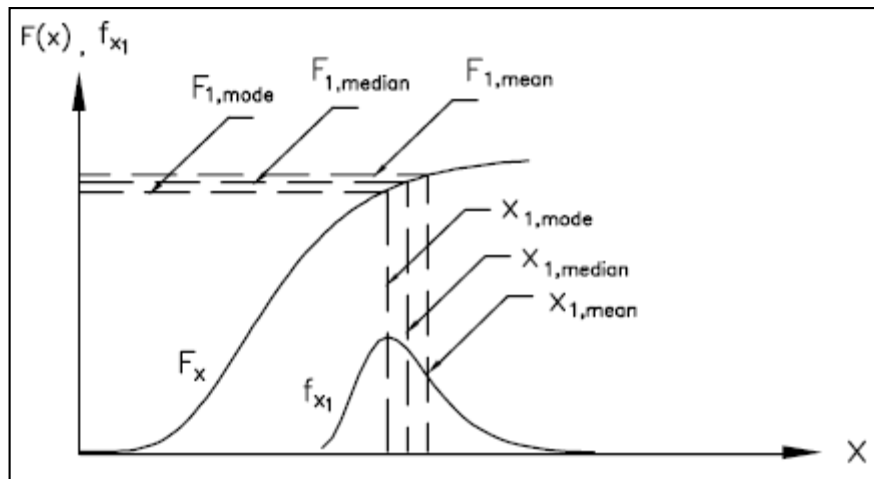


Figura 4-3: Determinación de F_i .
Fuente: (Zhou Liu, 2001).

Si se grafica la función en base a la media, se tienen las siguientes aproximaciones dependiendo de la función a usar.

$$\text{Realizada por Gringorten} \quad F_i = 1 - \frac{i - 0.44}{n + 0.12} \quad \text{Gumbel} \quad (\text{Ec. 4-17})$$

$$\text{Realizada por Goda} \quad F_i = 1 - \frac{i - 0.2 - 0.27/\sqrt{k}}{n + 0.20 + 0.23/\sqrt{k}} \quad \text{Weibull} \quad (\text{Ec. 4-18})$$

4.3.4.1. BONDAD DEL AJUSTE

Por tanto, luego de realizar ajustes con las distribuciones candidatas, se escoge la mejor. En donde el coeficiente de correlación lineal se define como (Zhou Liu, 2001):

$$\rho = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \quad (\text{Ec. 4-19})$$

La correlación lineal se usa para determinar la bondad de los ajustes. Sin embargo, otro criterio de estimación de la bondad es el error medio relativo, en donde valores cercanos a 0% indicarán un buen ajuste:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{i \text{ estimado}} - x_{i \text{ observado}}|}{x_{i \text{ observado}}} \quad (\text{Ec. 4-20})$$

4.3.5. EXTRAPOLACIÓN DE VALORES EXTREMOS

La altura de diseño, x^T , es la altura de ola correspondiente para T periodo de retorno. Las distribuciones de Weibull y Gumbel son reescritas como (Zhou Liu, 2001):

$$x = A(-\ln(1-F))^{1/k} + B \quad \text{Weibull} \quad (\text{Ec. 4-21})$$

$$x = A(-\ln(-\ln(F))) + B \quad \text{Gumbel} \quad (\text{Ec. 4-22})$$

$$\lambda = \frac{\text{número de olas extremas}}{\text{número de años de la muestra}}$$

$$T = \frac{1}{\lambda(1-F)} \quad \text{ó} \quad F = 1 - \frac{1}{\lambda T}$$

Las ecuaciones anteriores (Ec 2-19 y Ec. 2-20), pueden ser reescritas como:

$$x^T = A\left(-\ln\left(\frac{1}{\lambda T}\right)\right)^{\frac{1}{k}} + B \quad \text{Weibull} \quad (\text{Ec. 4-23})$$

$$x^T = A\left(-\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda T}\right)\right)\right) + B \quad \text{Gumbel} \quad (\text{Ec. 4-24})$$

A, B, C y k son definidos como parámetros de ajuste para cada distribución.

4.4. DISEÑO DE ROMPEOLAS EN TALUD

Para realizar el diseño de los rompeolas en talud, es necesario dividirlo en dos partes, el diseño hidráulico y el diseño estructural.

Diseño hidráulico

El diseño hidráulico consiste en que la estructura responda adecuadamente a ciertos fenómenos causados por el oleaje, corrientes, temporales, etc. Esta respuesta hidráulica será la adecuada a los requerimientos técnicos para el cual será diseñada la estructura. Este concepto se desarrolla en base al cálculo de cada uno de los responsables a la respuesta hidráulica (Coastal Engineer Manual; Part VI, 2003):

- **Run-Up:** Este fenómeno es provocado en la mayoría de las veces por la rotura del oleaje sobre las estructuras, por lo tanto esta ola rota que recorre las estructuras se le denomina Run-up, la cual puede ser calculada como la distancia vertical entre el nivel del mar y el recorrido antes mencionado. A su vez, de forma antagonista, se desencadena un segundo factor llamado Run-Down, el cual corresponde a la distancia vertical entre el nivel del mar y el recorrido de la ola rota una vez recogida. Ambos casos dependen exclusivamente de las características de la ola incidente y de la geometría y propiedades del material de la estructura recorrida.
- **Sobrepaso:** El sobrepaso del oleaje, como su nombre lo dice, ocurre cuando el run-up excede un cierto límite, el cual en este caso corresponde a la cota de coronamiento de las estructuras expuestas al oleaje. Este caudal depende nuevamente de las características geométricas y de los materiales que componen la estructura. Generalmente el sobrepaso es permitido siempre y cuando se cumplan ciertos criterios de diseño, definidos para condiciones normales de operación y para condiciones extremas dependiendo del nivel de daños permitido.
- **La transmisión del oleaje:** Este concepto toma importancia debido a que el sobrepaso de agua, cuando el nivel más alto es menor al run-up máximo, genera nuevas olas dentro de la zona protegida por la estructura. Las estructuras permeables permiten el paso del agua por medio de los elementos que la componen, esto se debe a que se diseñan con una porosidad permitida para la penetración del oleaje.
- **Reflexión del oleaje:** en ciertas estructuras tales como dársenas, paredes rompeolas, etc., las ondas se ven reflejadas parcial o completamente en ellas generando perturbaciones que dependen de sus geometrías. Estas ondas reflejadas muchas veces generan agitación, fenómeno que genera una problemática significativa en la maniobrabilidad de embarcaciones dentro y fuera de las zonas de abrigo. En ocasiones, la reflexión del oleaje se produce sin la necesidad de que las ondas se encuentren con estructuras sólidas, pudiendo generarse cuando dos o más olas chocan entre sí en un espacio no confinado.

Diseño estructural

El diseño estructural busca interpretar las condiciones de carga, esfuerzo, deformaciones y condiciones de estabilidad producidas por el oleaje y otros fenómenos con el fin de proponer el diseño adecuado. Para el caso de las estructuras en talud, algunos de estos procedimientos no pueden ser determinados dado que la carga por oleaje sobre bloques

individuales o rocas unitarias no puede ser determinada por la teoría, por modelos a escala o prototipos. Por tanto, la aproximación es usada en casos experimentales para representar las relaciones entre las características de la ola y la respuesta estructural, comúnmente expresada en términos de los movimientos esperados de las defensas. En cierto modo, se conocen algunas respuestas estructurales (movimientos) para algunos tipos de elementos con los cuales se han experimentado (bloques de concreto) pero no a ciencia cierta (Coastal Engineer Manual; Part VI, 2003).

4.4.1. DISEÑO HIDRÁULICO

Sobrepaso

El sobrepaso del oleaje ocurre cuando el run-up alcanza los *niveles más altos permitidos*, excediéndose por sobre la cresta de la estructura o el nivel de coronamiento máximo (R_c). **Por otra parte, el caudal de sobrepaso admisible** depende de la morfología de la obra en cuestión, este caudal debe ser tal que permita la seguridad de la estructura, edificios, instalaciones posteriores al talud, vehículos y peatones, además de mantener condiciones de servicio y operación en las zonas abrigadas del oleaje. En la Figura 4-4 es posible apreciar dos configuraciones de estructuras, en talud y pared vertical, identificando en cada una de ellas la cota de coronamiento.

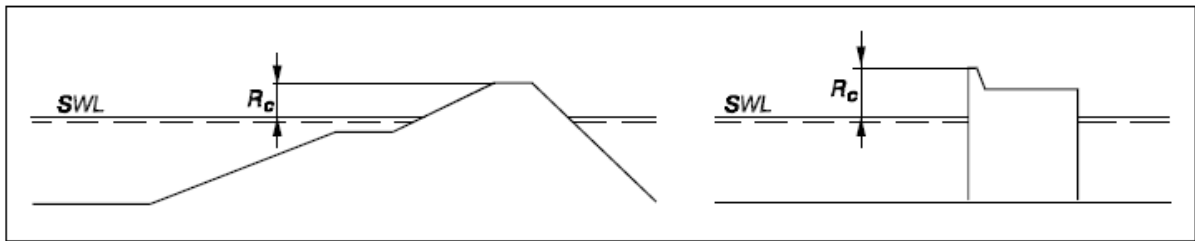


Figura 4-4: Esquema de la cota de coronamiento.

Fuente: Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 (2003).

Durante las tormentas, en donde el oleaje golpea con fuerza las costas, las ondas que alcanzan superar el run-up permitido lo hacen de una manera muy irregular, en el tiempo y el espacio, sumado a ello que no todas las olas son idénticas. Es por esto que la descarga por sobrepaso se calcula en base a un caudal medio ($q = m^3/s/m$).

Este caudal de sobrepaso medio, corresponde a estimaciones empíricas basadas en modelos físicos con geometrías específicas, por tanto las variables que influyen en este cálculo son:

$$q = \text{función} (H_s, T_{op}, \sigma, \beta, R_c, h_s, g, \text{y la geometría de la estructura}) \quad (\text{Ec. 4-25})$$

q : Caudal

H_s : Altura significativa de la ola

T_{op} : Periodo peak de la onda en aguas profundas

σ : Parámetros de dispersión de las ondas

β : Berma

h_s : Profundidad al pie del talud

g : fuerzas gravitatorias

R_c : Cota de coronación

Dicho de otra manera, esta descarga es función de características geométricas de la estructura, de la altura de la ola al pie de la obra, del periodo peak o medio (en aguas profundas), factor de dispersión de las ondas de cresta corta, ángulo de incidencia de la ola de diseño y de la profundidad del mar al pie de la estructura.

Para el cálculo del **caudal admisible** es necesario incluir la variable seguridad para vehículos, peatones y la seguridad estructural (edificios, revestimientos, etc.).

En la siguiente figura se detalla el valor medio del **caudal admisible** para cada una de las consideraciones de seguridad allí planteadas.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V_{max} (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; $H_{m0} > 5$ m	>10	$>5,000 - 30,000$
Significant damage or sinking of larger yachts; $H_{m0} = 3-5$ m	>20	$>5,000 - 30,000$
Sinking small boats set 5-10 m from wall; $H_{m0} = 3-5$ m Damage to larger yachts	>5	$>3,000-5,000$
Safe for larger yachts; $H_{m0} > 5$ m	<5	$<5,000$
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; $H_{m0} = 3-5$ m	<1	$<2,000$
Building structure elements; $H_{m0} = 1-3$ m	≤ 1	$<1,000$
Damage to equipment set back 5-10m	≤ 1	$<1,000$

Figura 4-5: Valores críticos de caudales de sobrepaso medio.

Fuente: (EurOtopII, 2018).

Al momento de disipar la energía de la onda incidente, la geometría de las estructuras juega un rol importante, del mismo modo la forma y material de los elementos que la componen y la disposición de estos sobre la estructura. Un elemento importante que permite que la energía de la onda se disipe (en su mayoría) antes del talud, es la berma.

En la Figura 4-6 se presentan algunas geometrías tipo para taludes, revestimientos y paredes verticales.

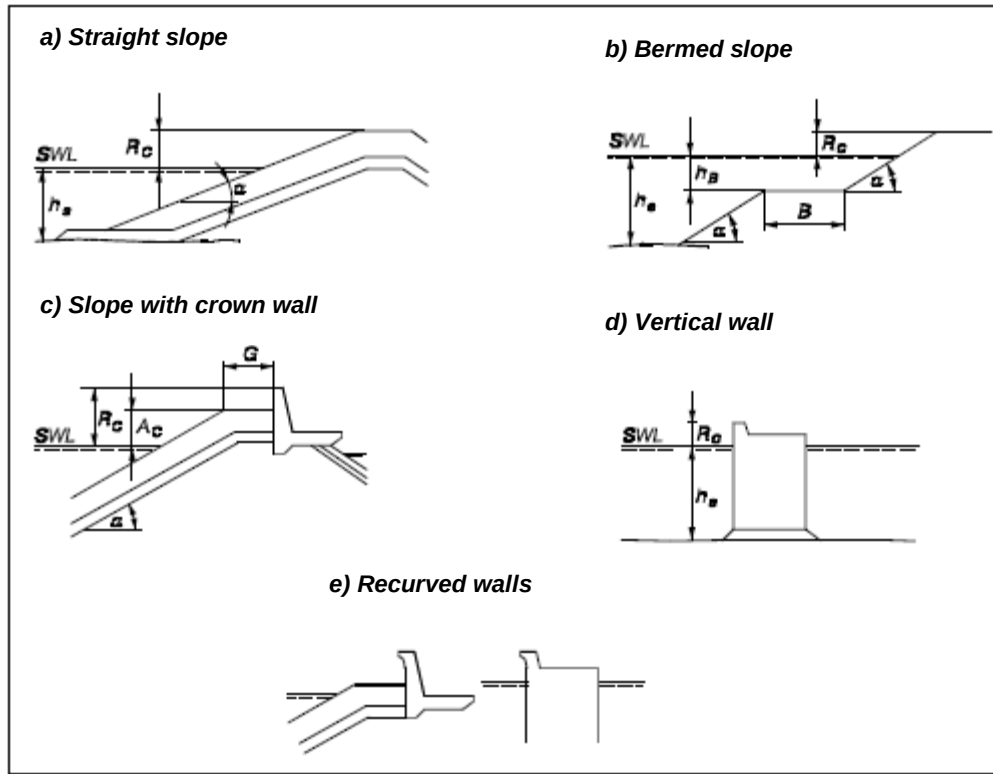


Figura 4-6: Geometrías de estructuras relacionadas con el sobrepaso.

Fuente: Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 (2003).

En el Manual EurOtop II (2016), capítulo de descargas por sobrepaso, es posible encontrar ecuaciones experimentales recientes con aplicación a estructuras permeables de pendiente suave. A continuación se presenta la ecuación 4-26, la cual se encuentra en función de la geometría de la estructura, característica de la ola incidente y por factores de rugosidad, dependientes del tipo de coraza (ver Figura 4-7) y factor de reducción producto de la oblicuidad del oleaje incidente (ver Ec. 4-27).

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0.1035 * \exp \left[- \left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0} * \gamma_f * \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right]$$

(Ec. 4-26)

Para pendientes 1: 2 a 1: 4/3

Donde:

q : Caudal de sobrepaso medio por metro lineal de estructura

g : Aceleración de gravedad

H_{m0} : Altura de ola al pie de la obra

R_c : Francobordo⁵ del rompeolas
 γ_f : Factor de reducción por el tipo de coraza
 γ_β : Factor de reducción por el efecto de oblicuidad del oleaje

En la siguiente figura es posible encontrar los valores de rugosidad para diversos elementos tales como rocas hasta dos capas, cubos hasta dos capas, Tetrápodos, Acrópodos, Dolos, Cubípodos hasta dos capas, Xblock, Core-Loc, entre otros.

Type of armour layer	γ_f
Smooth impermeable surface	1.00
Rocks (1 layer, impermeable core)	0.60
Rocks (1 layer, permeable core)	0.45
Rocks (2 layers, impermeable core)	0.55
Rocks (2 layers, permeable core)	0.40
Cubes (1 layer, flat positioning)	0.49
Cubes (2 layers, random positioning)	0.47
Antifers	0.50
HARO's	0.47
Tetrapods	0.38
Dolosse	0.43
Accropode™ I	0.46
Xbloc®; CORE-LOC®; Accropode™ II	0.44
Cubipods one layer	0.49
Cubipods two layers	0.47

Figura 4-7: Valores factores de rugosidad, estructuras permeables de pendiente suave.

Como se mencionó anteriormente, en la ecuación 4-26, uno de los factores de reducción corresponde a la oblicuidad del oleaje. En la ecuación 4-27 se indica que γ_β se calcula para ondas incidentes entre 0° y 80° utilizando la siguiente aproximación.

5

(Ec. 4-27)

$\gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta|$: siendo β el ángulo de incidencia del oleaje

Sin embargo, cuando $80^\circ \leq |\beta| \leq 110^\circ$ la descarga por sobrepaso se asume nula.

4.4.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

La fuerza del oleaje, que golpea los taludes de las estructuras, puede causar ciertos movimientos de los elementos de las capas que los componen o en ocasiones que estos se destruyan. Si los elementos se mueven, se dice que se produjo una inestabilidad hidráulica. Algunas otras fallas de inestabilidad se producen cuando los elementos son desplazados fuera de las capas de los rompeolas.

Claramente, el cálculo del flujo del oleaje que impacta sobre las capas de coraza de las estructuras no es posible, dado a que la disposición de los elementos es aleatoria generando fuerzas de reacción entre ellas que hace que el cálculo de estabilidad sea complejo. Es por esto, las relaciones empíricas que se desarrollaron para poder determinar la estabilidad de los elementos fueron en base a experimentos con modelos hidráulicos físicos, para determinadas estructuras, pendientes, elementos, etc.

Las fuerzas que se generan en los elementos, cuando son solicitadas por el oleaje, se dividen en:

- Fuerza de arrastre, F_D
- Fuerza de levante, F_L
- Fuerza de inercia, F_I
- Fuerza de gravedad, F_G

La descomposición de fuerzas expresadas anterior corresponden a la ecuación de Morison, en donde se explica que la fuerza de gravedad es la que estabiliza los elementos, la fuerza de levante y de arrastre generan inestabilidades que tienden a ejercer dominancia por sobre la fuerza de inercia (Hans F. Burcharth, Engineering and Design - Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 - Fundamentals of Design, 2003).

Es posible calcular la razón de estabilidad dividiendo las fuerzas que generan inestabilidad por las fuerzas estabilizadoras.

$$\frac{F_D + F_L}{F_G} \approx \frac{\rho_w D_n^2 v^2}{g(\rho_s - \rho_w) D_n^3} = \frac{v^2}{g \Delta D_n} \quad (\text{Ec. 4-28})$$

El valor D_n corresponde al volumen del elemento (longitud al cubo), las densidades del fluido y del elemento son ρ_w, ρ_s respectivamente. La velocidad del flujo es aproximadamente $\sqrt{gH}$ para oleaje en rotura. El parámetro de estabilidad, N_s , se calcula como:

$$N_s = \frac{H}{\Delta D_n} \quad (\text{Ec. 4-29})$$

Δ : corresponde a $(\rho_s/\rho_w - 1)$

En siguiente imagen (Figura 4-8) se presentan 4 modos de falla para los elementos que constituyen la coraza del rompeolas. Algunas fallas son a causa de mal trabazón, deslizamiento y rotación de uno o más elementos.

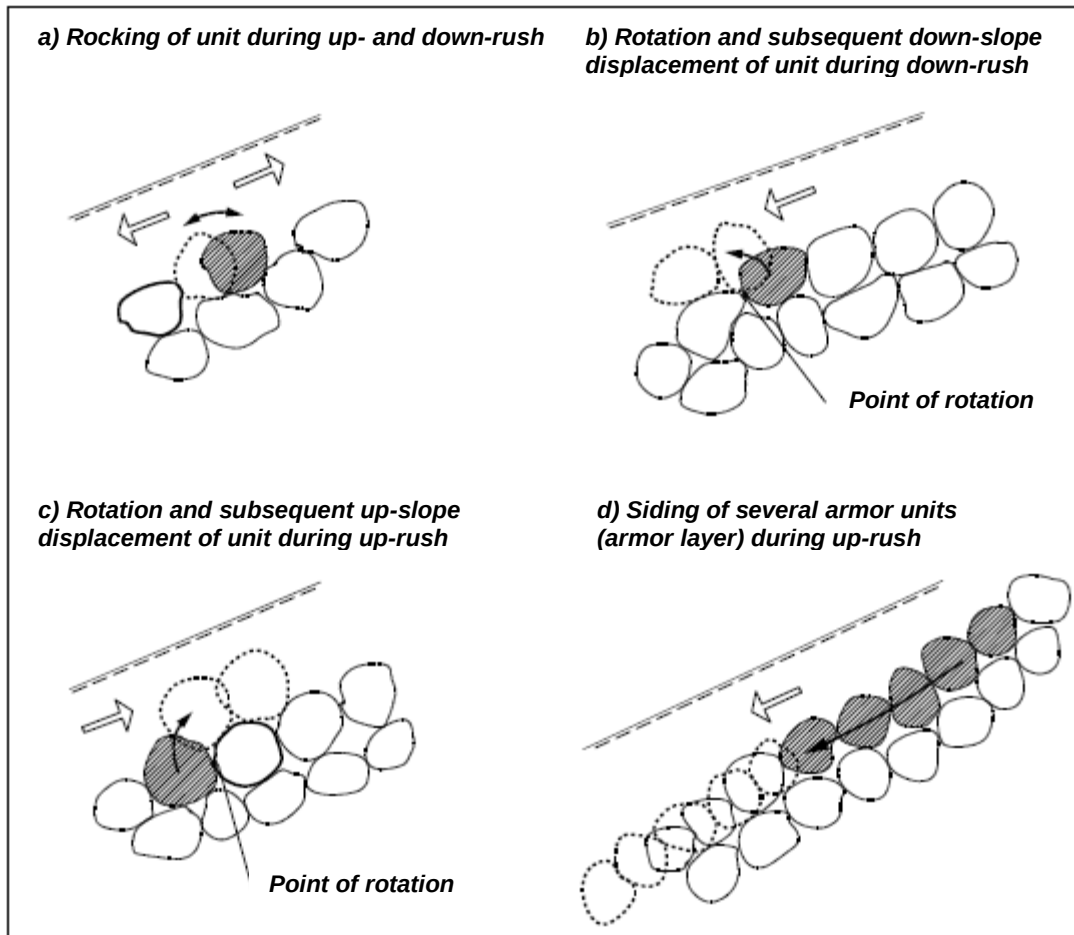


Figura 4-8: Modos de falla típicos en los elementos de la coraza.

Fuente: Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 (2003).

Por tanto, el daño que se produce en las capas de coraza se caracteriza contando la cantidad de unidades desplazadas o bien midiendo la zona erosionada. En los dos casos, el daño está relacionado a un estado de mar y duración específica.

A continuación se presentan distintos parámetros y definiciones respecto el daño, unidades desplazadas y zonas erosionadas.

- Desplazamiento relativo dentro de un área: $D = \frac{\text{número de unidades desplazadas}}{\text{unidades dentro del área de referencia}}$
El área de referencia se define como el estado del mar en reposo más o menos la altura de ola significativa.

- Número de unidades desplazadas dentro de un banda de ancho D_n :

$$N_{od} = \frac{\text{número de unidades desplazadas fuera de la coraza}}{\text{ancho de la sección analizada}/D_n}$$

- Porcentaje erosionado con respecto al volumen original:

$$D = \frac{\text{área media erosionada del perfil}}{\text{área media original del perfil}} \times 100\%$$

- Área erosionada relativa:

$$s = A_e / D_{n50}^2$$

En la Figura 4-9 se observa un esquema en donde se describe el área erosionada en un talud producto de la acción del oleaje.

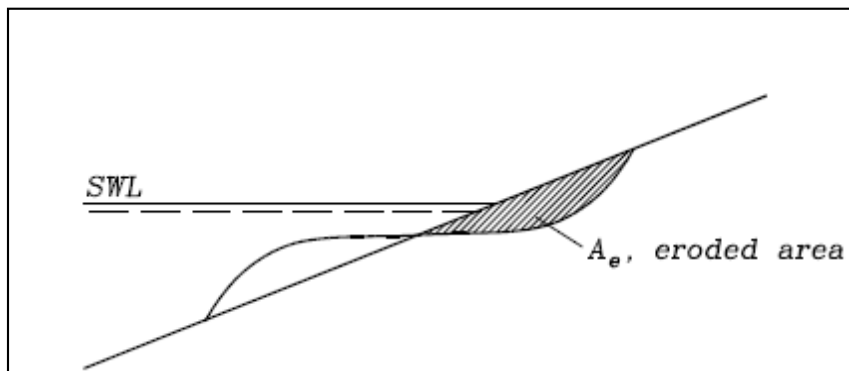


Figura 4-9: Área erosionada.

Fuente: Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 (2003).

A continuación, se presentan tres formulaciones empíricas para el cálculo de elementos tipo rocas, cubos y cubípodos, las cuales entregan el tamaño necesario para generar una condición de estabilidad para determinados parámetros (oleaje, geometría del sector, geometría de la estructura).

Formulación para estabilidad con elementos tipo roca en aguas someras

Van der Meer (1988) y Van Gent **et al.**, (2004), incluyen formulaciones para elementos tipo roca que no solo dependen de la geometría de las estructuras, playas y aspectos del oleaje

incidente, sino que también considera la esbeltez de la ola. A continuación se detallan ecuaciones para el cálculo de la estabilidad de enrocados, considerando la permeabilidad, para olas tipo *surging* y *plunging*.

- **Van der Meer (1988)**

Olas tipo *plunging*

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 8,7 P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad (\text{Ec. 4-30})$$

Olas tipo *surging*

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta D_{n50}} = 1,4 P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad (\text{Ec. 4-31})$$

P: factor de permeabilidad notacional

S: nivel de daños

N: número de olas (duración de la tormenta)

$H_{2\%}$: altura de ola excedida por un 2% en el pie de la estructura
según una distribución del tipo R se considera como $1,39H_s$

- **Van Gent et al., 2004**

Van Gent **et al.**, 2004 propone una estructura similar a la fórmula de Van der Meer (1998), la cual puede ser también aplicada en aguas someras. Los autores incorporan el periodo de la ola asociada a la energía media espectral. En las siguientes ecuaciones es posible determinar el parámetro de rompiente (Iribarren) ligado a la energía media espectral y crítico de la onda. Valores con los cual se puede determinar si la rompiente de la ola es de tipo *Surging* o *Plunging*.

$$\xi_{m-1,0} = \tan \alpha / \sqrt{\left(\frac{2\pi}{g} \right) H_{s,toe} / T_{m-1,0}^2} \quad (\text{Ec. 4-32})$$

$$\xi_{cri} = \left(\frac{C_{pl}}{C_s} P^{0,31} \sqrt{\tan \alpha} \right)^{\frac{1}{P+0,5}} \quad (\text{Ec. 4-33})$$

Cuando $\xi_{m-1,0} < \xi_{cri}$ la rompiente de la ola es del tipo *Plunging*, por lo cual Van Gent **et al.**, 2004 propone lo siguiente:

$$\frac{H_{s,toe}}{\Delta D_{n50}} = C_{pl} P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \left(\frac{H_{2\%}}{H_{s,toe}} \right)^{-1} \xi_{m-1,0}^{-0,5} \quad (\text{Ec. 4-34})$$

Sin embargo, cuando $\xi_{m-1,0} < \xi_{cri}$ la rompiente de la onda corresponde al tipo *Surging*, correspondiendo la siguiente formulación:

$$\frac{H_{s,toe}}{\Delta D_{n50}} = C_s P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \left(\frac{H_{2\%}}{H_{s,toe}} \right)^{-1} \sqrt{\cot \alpha} \xi_{m-1,0}^P \quad (\text{Ec. 4-35})$$

Los factores C_{pl} (para olas tipo *plunging*) y C_s (para ondas tipo *surging*) son constantes que tienen valores de 8,4 y 1,3 respectivamente, con una desviación estándar de 0,109 para $T_{m-1,0}$.

Gokhan **et al.**, 2004 en la publicación “A comparative study on the stability formulas of rubble mound breakwaters” de la revista “Coastal Engineering”, facilitan el criterio a utilizar para la determinación de las formulaciones de Van der Meer (1988) o de Van Gent **et al.**, 2004 mediante las siguientes restricciones:

- R1: $h/H_{s,toe} < 3$
- R2: $\frac{H_{2\%}}{H_{s0}} < 1,4$
- R3: $\frac{H_{s,toe}}{H_{s0}} < 0,9$

Por tanto, si R1, R2 y R3 se satisface será necesario utilizar las formulaciones de Van Gent **et al.**, 2004, de modo contrario las de Van der Meer (1988).

Formulación para estabilidad con elementos tipo cubos de concreto

Van der Meer (1988b), considera la siguiente relación para el cálculo de elementos tipo cubos de concreto, dos capas de coraza y estructura sin rebase.

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(\frac{6.7 N_{od}^{0,4}}{N_z^{0,3}} + 1.0 \right) s_m^{-0,1} \quad (\text{Ec. 4-36})$$

H_s : altura de ola al pie de la obra

Δ : $\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$

N_z : número de olas

N_{od} : número de unidades desplazadas fuera de la coraza en un ancho de banda de al menos un D_n

s_m : esbeltez de la ola

La formulación propuesta anteriormente es válida para oleaje sin rotura, irregular y pendiente del talud de 1:1.5, con un parámetro de Iribarren entre $3 < \xi_m < 6$.

Formulación para estabilidad con elementos tipo cubípodos

Para el cálculo de elementos tipo cubípodos, la estabilidad de los elementos se calcula mediante la formulación de Hudson (1974). Para ello se consideran pendientes del talud de 3/2, oleaje regular e irregular, porosidad del 40% y los coeficientes de estabilidad de la Tabla 4-1 elaborada por SATO (2010).

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad \text{ó} \quad M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (\text{Ec. 4-37})$$

H : altura de ola H_s ó $H_{1/10}$

D_{n50} : longitud media equivalente de la roca

M_{50} : masa media de las rocas, $M_{50} = \rho_s D_{n50}^3$

Δ : $\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$

α : ángulo de la pendiente

K_D : coeficiente de estabilidad

Tabla 4-1: Ensayos para obtención de coeficientes de estabilidad.

Tramo	Pieza	K_D	n° capas	talud
tronco	cubo	6.0	2	3/2
	Cubípodo 2	28.0	2	3/2
	Cubípodo 1	12.0	1	3/2
	Accropode	15.0	1	4/3
	Xbloc	16.0	1	4/3
morro	cubo	5.0	2	3/2
	Cubípodo 2	7.0	2	3/2

Fuente: (R. Medina & Gómez-Martin, 2016).

Para revisar otros coeficientes de estabilidad, considerando distintos taludes, se recomienda revisar la bibliografía descargable en el sitio web de Medina **et al.**, 2016.

Partes del rompeolas en talud

Los diques en talud, se componen por capas de coraza, filtros, núcleo y bermas. La coraza es la capa formada por los elementos más grandes de la estructura, los cuales resisten las fuerzas más importantes (oleaje, arrastre, levante, etc.), en ocasiones se encuentran entrelazados, depende del tipo de elemento que la compone. Otra parte de la estructura es

el filtro, esta capa cumple la función de retener al núcleo evitando que este sea sacado de la por efecto de fuerzas desestabilizadoras, esta capa permite el paso del agua dentro de la estructura. El núcleo es la capa central, en donde se encuentran los elementos más finos. Por último, la berma, cumple la función de disipar la energía del oleaje antes del recorrido sobre la estructura, además genera estabilidad en los elementos superiores del filtro y la coraza principalmente.

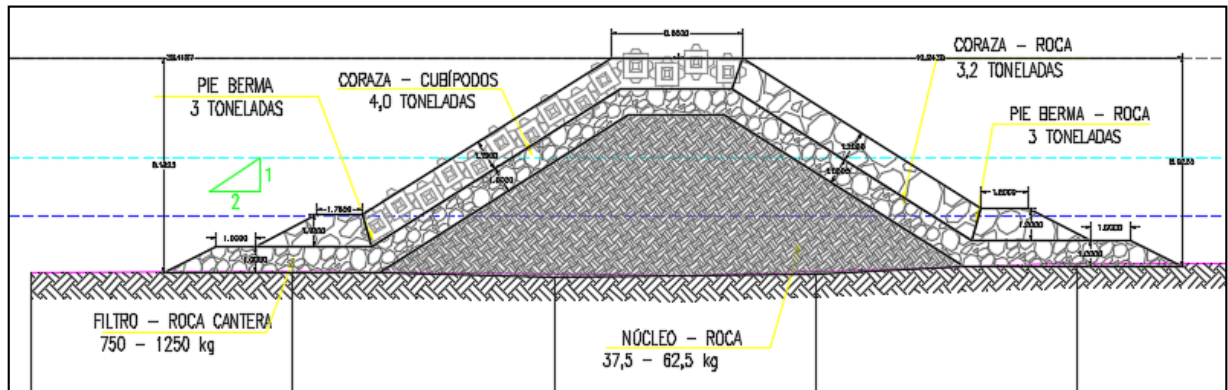


Figura 4-10: Partes principales del rompeolas.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan secciones típicas para un rompeolas en talud. Es posible observar que el tamaño de los elementos está en función de su peso. La Figura 4-11, extraída desde el Coastal Engineering Manual (2003), muestra dos secciones, la primera presenta una disposición para multi-capas, mientras que la segunda está idealizada solo para tres.

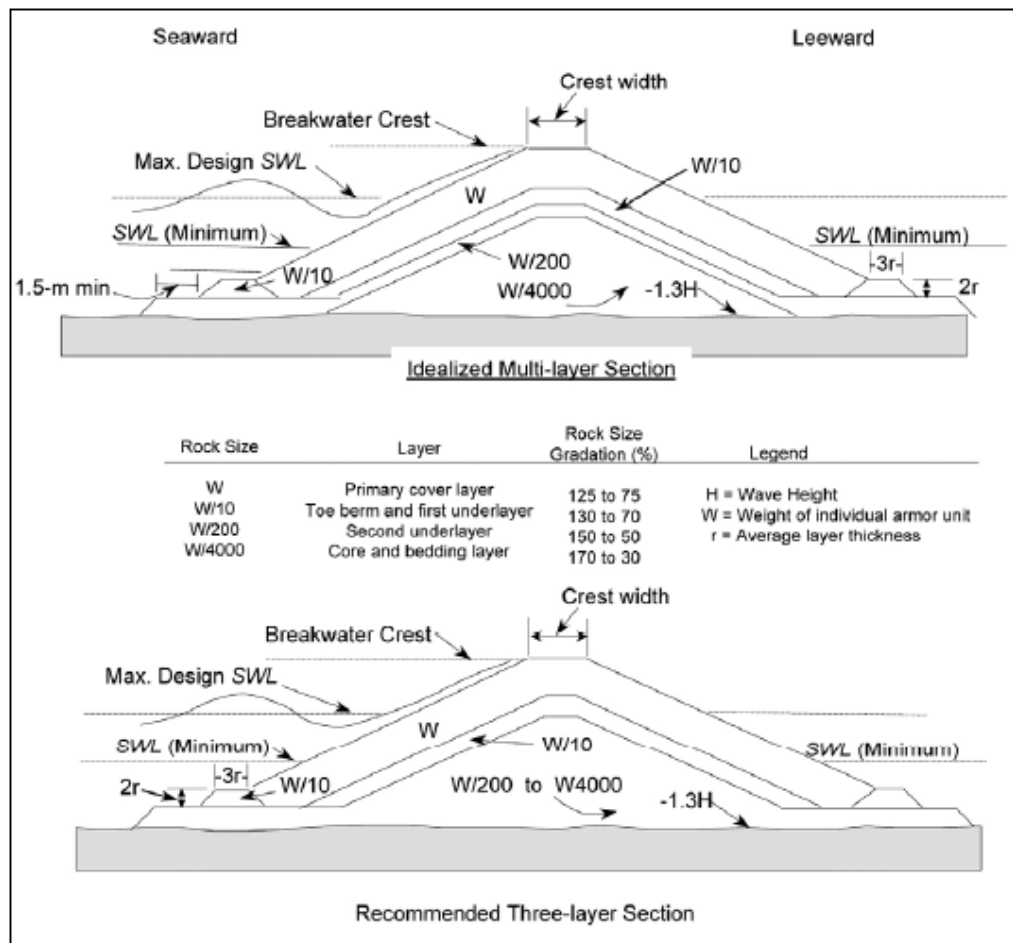


Figura 4-11: Sección típica de rompeolas sin sobrepaso.
Fuente: Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 (2003).

4.5. MODELOS NUMÉRICOS

Existen diversos modelos numéricos, con los cuales es posible la representación de la hidrodinámica producto de los fenómenos asociados a la propagación del oleaje. Algunos de ellos resuelven o promedian la fase de la onda, mediante ecuaciones de acción de la onda, de pendiente suave o la aproximación de Boussinesq. Además existen diversos métodos de resolución de estas ecuaciones, como por ejemplo: mediante el método de diferencias finitas, elementos finitos o volúmenes finitos.

A continuación se presenta un resumen de los modelos numéricos MIKE 21 Spectral Waves (M21-SW) y Mike 21 Boussinesq Waves (M21-BW).

4.5.1. MIKE 21 SPECTRAL WAVES

MIKE 21 SW simula el decaimiento, crecimiento y transformación del oleaje, utilizando mallas de cálculo flexibles. Principalmente promedia la fase de la onda, desde la ecuación de

conservación de acción de la onda, mediante el uso del método de cálculo de volúmenes finitos. El modelo incluye dos posibilidades de cálculo:

- Formulación paramétrica desacoplada direccional
- Formulación completamente espectral

La primera se basa en una parametrización de la ecuación de conservación de la acción de la onda, la cual es realizada en el dominio de las frecuencias integrando los momentos cero y primero del espectro de energía como variables dependientes (Holthuijsen, 1989). La segunda formulación se basa de igual manera en la ecuación de conservación de la acción de la onda, en donde las variables dependientes corresponden al dominio dirección-frecuencia del espectro (Komen **et al.**, 1994).

Para el desarrollo de modelos de gran escala, MIKE 21 SW recomienda utilizar coordenadas polares, mientras que para dominios de menor escala es necesario el uso de coordenadas cartesianas.

Los fenómenos físicos que resuelve e incluye el modelo corresponden a:

- Crecimiento del oleaje por acción del viento.
- Interacción no lineal ola-ola.
- Disipación debido al white-capping.
- Disipación debido a la fricción por fondo.
- Disipación debido a la rotura inducida por la profundidad.
- Refracción y asomeramiento debido a variaciones en la profundidad.
- Interacción entre oleaje y corrientes.
- Efecto de la variación de la profundidad en el tiempo.

El modelo generalmente es muy utilizado para evaluaciones de climas de oleaje en aguas profundas y en zonas costeras, tanto como pronósticos o de retro análisis. Estos estudios permiten el desarrollo del diseño de estructuras en alta mar, en zonas costeras y estructuras portuarias, poniéndolas a prueba a las cargas producidas por el oleaje para mantener la seguridad y más aún sensibilizar la variable económica de las estructuras (MIKE, 2012).

4.5.1.1. ECUACIONES BÁSICAS

MIKE 21 SW al utilizar las mallas no estructuradas, hace que el manejo de las resoluciones en los sectores de interés sea de alguna manera flexible, ajustándose de manera muy fina en los sectores de interés y un tanto gruesa en las zonas lejanas.

La dinámica de las ondas gravitatorias está descrita por la ecuación de *transporte de la acción de densidad de la onda*, la cual varía en el tiempo y el espacio, en función de dos parámetros de la fase de la onda. El primero corresponde al vector correspondiente al número de ondas $\vec{k}$, con magnitud k , y el segundo a la dirección θ . MIKE 21 SW toma en cuenta a θ para la dirección de la onda y $\sigma = 2\pi f$ como la frecuencia absoluta relativa. La acción de densidad, $N(\sigma, \theta)$, es relativa a la densidad de energía $E(\sigma, \theta)$, dado por (MIKE, 2012):

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (\text{Ec. 4-38})$$

4.5.1.2. ECUACIONES DE CONSERVACIÓN DE ACCIÓN DE LA ONDA

Las ecuaciones de gobierno corresponden a la ecuación de *balance de la acción de la onda*, formuladas en coordenadas cartesianas y esféricas corresponden a lo siguiente (MIKE, 2012).

Coordenadas cartesianas

En las coordenadas cartesianas horizontales, la ecuación del *balance de acción de la ola* está dada por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{Ec. 4-39})$$

Donde $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ es la acción de densidad, t es el tiempo, $\vec{x} = (x, y)$ corresponden a las coordenadas cartesianas, $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ es la velocidad de propagación del grupo de ondas en las cuatro dimensiones de la fase, el espacio $\vec{x}$, σ y θ . El parámetro S corresponde a los términos fuentes de la ecuación del balance de energía, ∇ es el operador diferencial en las cuatro dimensiones $\vec{x}$, σ y θ .

Coordenadas esféricas

En coordenadas esféricas el término $\hat{N}(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ se conserva, pero $\vec{x} = (\phi, \lambda)$ corresponde a las coordenadas esféricas, en donde ϕ es la latitud y λ es la longitud. La acción de densidad $\hat{N}$ está relacionada con la acción de densidad normal N y la densidad de energía normal E , a través de $\hat{N}d\sigma d\theta d\phi d\lambda = Nd\sigma d\theta dx dy$, o como:

$$\hat{N} = NR^2 \cos\phi = \frac{ER^2 \cos\phi}{\sigma} \quad (\text{Ec. 4-40})$$

En donde R corresponde al radio de la tierra, por lo que en coordenadas polares la ecuación del balance de la acción de la onda queda como:

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} c_\phi \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_\lambda \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma} \quad (\text{Ec. 4-41})$$

$\hat{S} = (\vec{x}, \sigma, \theta, t) = SR^2 \cos\phi$; es el término fuente total y disipador.

4.5.1.3. TÉRMINOS FUENTES

Como se explicó anteriormente, MIKE 21 SW considera ciertos fenómenos físicos en la resolución de las, llamados términos fuentes. Es por esto, que el término S representa la sumatoria de todos estos fenómenos.

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (\text{Ec. 4-42})$$

Donde S_{in} corresponde a la generación de energía debido al viento, S_{nl} es la energía transferida a la ola debido a interacciones no lineales ola-ola, S_{ds} es la disipación de energía debido al white-capping, S_{bot} es la disipación de energía debido a la fricción del fondo y S_{surf} es la disipación de energía en la ola debido a la rotura.

4.5.2. MIKE 21 BOUSSINESQ WAVE

MIKE 21 *Boussinesq Wave Model* es un modelo numérico que resuelve la fase de la onda mediante la aproximación de *Boussinesq*. Con este modelo es posible realizar análisis de agitación de oleaje, de operatividad, condiciones de diseño en puertos, bahías y zonas costeras. El modelo, en sus términos fuentes, incluye la rotura del oleaje y otras dinámicas complejas, lo cual permite que su uso esté muy presente en la ingeniería de costas, caracterizando la propagación de ondas cortas y largas.

El modelo es capaz de reproducir la combinación de muchos fenómenos de transformación del oleaje durante su propagación, tales como:

- Asomeramiento
- Refracción
- Difracción
- Rotura del oleaje
- Disipación por fondo
- movimiento de la línea de costa
- Transmisión del oleaje
- Interacciones no lineales ola - ola
- Dispersión de frecuencias
- Dispersión en las direcciones
- Reflexión

Como se planteó anteriormente, MIKE 21 BW, incluye la no-linealidad y la dispersión de dirección de la onda. Este último es introducido en las ecuaciones de *momentum*, tomando en cuenta el efecto que producen las aceleraciones verticales sobre los gradientes de presión (MIKE, 2012).

MIKE 21 BW, resuelve las ecuaciones de *Boussinesq* utilizando formulaciones de flujo con mejoras en las características lineales de la dispersión de la onda, lo cual hace apropiado el modelo para simulaciones de propagación de grupos de ola desde aguas profundas hasta aguas someras (DHI, 2012). Se debe tener en cuenta que la máxima relación entre la profundidad del agua y la longitud de la onda (aguas profundas), debe ser aproximadamente $0.5 \left(\frac{h}{L_0} \approx 0.5 \right)$.

Este modelo, da la posibilidad de representar los procesos hidrodinámicos en dos dimensiones (2DH Boussinesq wave module) y en una dimensión (1DH Boussinesq wave module). Para verificar la agitación del oleaje sobre estructuras en puertos, dársenas, etc., es necesario utilizar el 2DH, mientras que si se desea analizar la transformación de la onda desde aguas profundas hasta la zona de playa, se deberá usar el modelo 1DH de *Boussinesq*.

4.5.2.1. ECUACIONES BÁSICAS

La aproximación de *Boussinesq* posee mejoras en las propiedades no lineales y las características de dispersión de la onda, lo que ha permitido acercarse cada vez más a la representación de la zona de rompiente de la onda y por consiguiente el movimiento progresivo de la línea de costa. En la actualidad, las ecuaciones de *Boussinesq* son aplicadas a estudios de oleaje y de corrientes, desde aguas profundas hasta menos profundas. Claramente se necesitan grillas computacionales muy finas en la zona de rompiente, mientras que para la zona de aguas más profundas la resolución de sus elementos puede ser más gruesa (Ole R. Sorensen, 2004).

El método de resolución de las ecuaciones de *Boussinesq* que utiliza MIKE 21 BW es el de diferencias finitas (FDMs), donde se usan mallas de cálculo estructuradas. Este tipo de método requiere grandes costos computacionales cuando resuelven los problemas de rotura, disipación del oleaje y movimiento de la línea de costa (Ole R. Sorensen, 2004).

La primera ecuación que se incluye para llegar a la aproximación de Boussinesq, corresponde al *principio de continuidad* (MIKE, 2012).

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec. 4-43})$$

En donde P y Q corresponden a las componentes de las velocidades integradas en la columna de agua, desde el nivel cero (fondo) hasta la superficie libre ξ , en donde n es la porosidad.

Ecuación de momentum en la dirección x:

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + F_x n^2 g h \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{g P \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \psi_1 = 0 \quad (\text{Ec. 4-44})$$

Ecuación de momentum en la dirección y:

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + F_y n^2 g h \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{g Q \sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n \psi_2 = 0 \quad (\text{Ec. 4-45})$$

Las ecuaciones de *momentum* incluyen expresiones propias del modelo, tales como los respectivos términos de dispersión de *Boussinesq* ψ_1 y ψ_2 . Como se ha dicho anteriormente, MIKE 21 BW incluye el efecto de rotura de la ola, para lograrlo incorpora el concepto

"Surface Rollers", con el que indica un exceso de *momentum* proveniente de distribuciones de velocidades no uniformes, estos términos corresponden a R_{xx}, R_{xy}, R_{yy} .

Los términos de dispersión de *Boussinesq* incorporan constantes, las cuales se suman a la pérdida o ganancia de energía en toda la columna de agua, entre la superficie libre ξ y el fondo.

$$\begin{aligned} \psi_1 \equiv & -\left(B + \frac{1}{3}\right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) \\ & - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd (2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) \\ & - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd \xi_{xy} \right) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4-46})$$

$$\begin{aligned} \psi_2 \equiv & -\left(B + \frac{1}{3}\right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) \\ & - dd_y \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd (2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right) \\ & - dd_x \left(\frac{1}{6} P_{xt} + nBgd \xi_{xy} \right) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4-47})$$

P : cantidad Flujo en la dirección $x, m^3/m/s$

Q : cantidad Flujo en la dirección $y, m^3/m/s$

B : coeficiente de dispersión de Boussinesq

F_x : estrés horizontal en la dirección de x

F_y : estrés horizontal en la dirección de y

h : profundidad del agua total ($d + \xi$), m

d : nivel del agua en reposo, m

g : aceleración de gravedad, m^2/s

C : número de Chezy (resistencia del fondo), $m^{0.5}/s$

α : coeficiente de resistencia para un flujo laminar con porosidad media

β : coeficiente de resistencia para un flujo turbulento con porosidad media

5. FUENTES DE DATOS

A continuación, se detallan los antecedentes disponibles, campañas de medición de oleaje y mareas, datos de oleaje provenientes desde modelos globales gratuitos.

5.1. BATIMETRÍAS

Las batimetrías disponibles se componen de las sondas extraídas desde las cartas náuticas electrónicas del SHOA y las mediciones batimétricas locales en el sector de estudio.

5.1.1. CARTAS NÁUTICAS ELECTRÓNICAS

A continuación, se detallan las cartas náuticas⁶ digitalizadas SHOA disponibles para el sector de estudio:

- Carta N° 1000: Rada de Arica a Bahía de Mejillones del Sur.
- Carta N° 1100: Rada de Arica a Bahía de Iquique.
- Carta N° 1111: Rada y Puerto de Arica.

En la siguiente figura se presenta un esquema gráfico de las cartas náuticas consideradas con el alcance geográfico de cada una de ellas.

⁶ Cartas Náuticas digitalizadas, proporcionadas por La Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso.

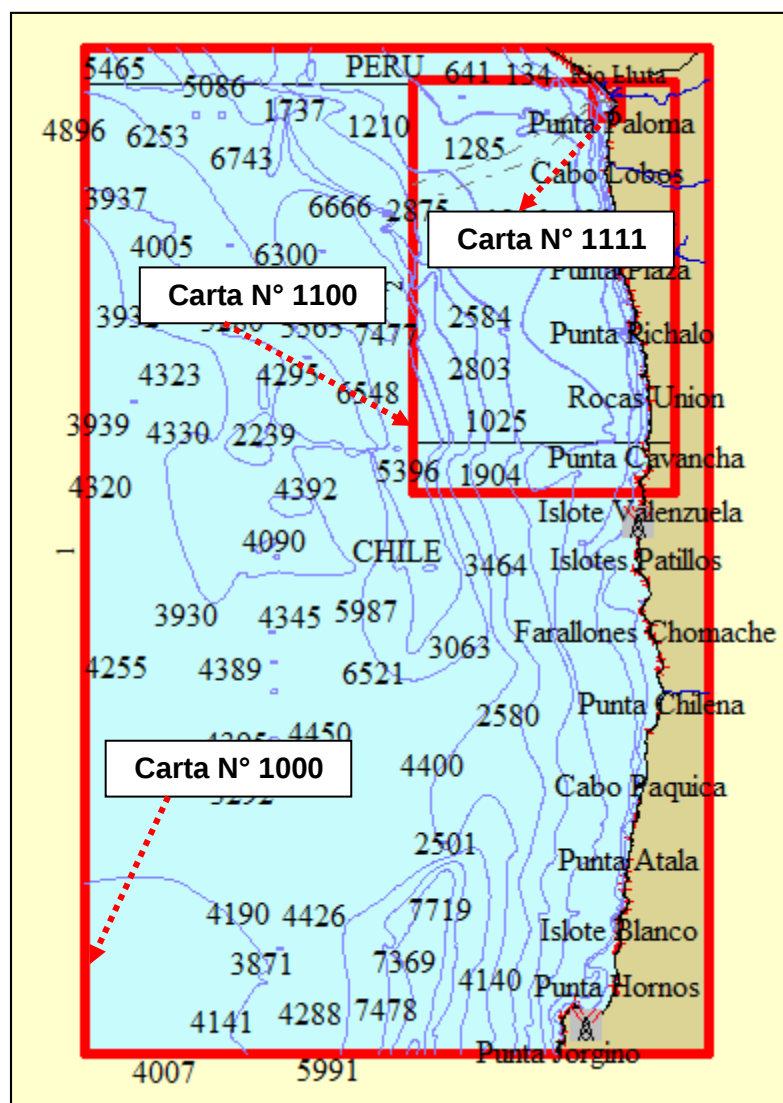


Figura 5-1: Sondas provenientes de cartas náuticas electrónicas utilizadas.
Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de sondas totales es de 2.727, los cuales son extraídos desde las cartas náuticas electrónicas del SHOA, donde cada punto en el espacio posee las coordenadas UTM -19 Sur WGS-84 EGM08 y altimetría referida al nivel de reducción de sondas.

5.1.2. LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MULTHAZ

El levantamiento batimétrico disponible, posee de alrededor de 10 hectáreas de medición en la zona aledaña al proyecto. Estas mediciones se efectuaron para la DOP en el marco del proyecto **“CONSTRUCCIÓN OBRAS DE RELOCALIZACIÓN CALETA PESQUERA ARICA”** en julio del año 2013 con un ecosonda SeabatReson 7125 multihaz. A continuación se presenta un modelo batimétrico de la zona levantada.

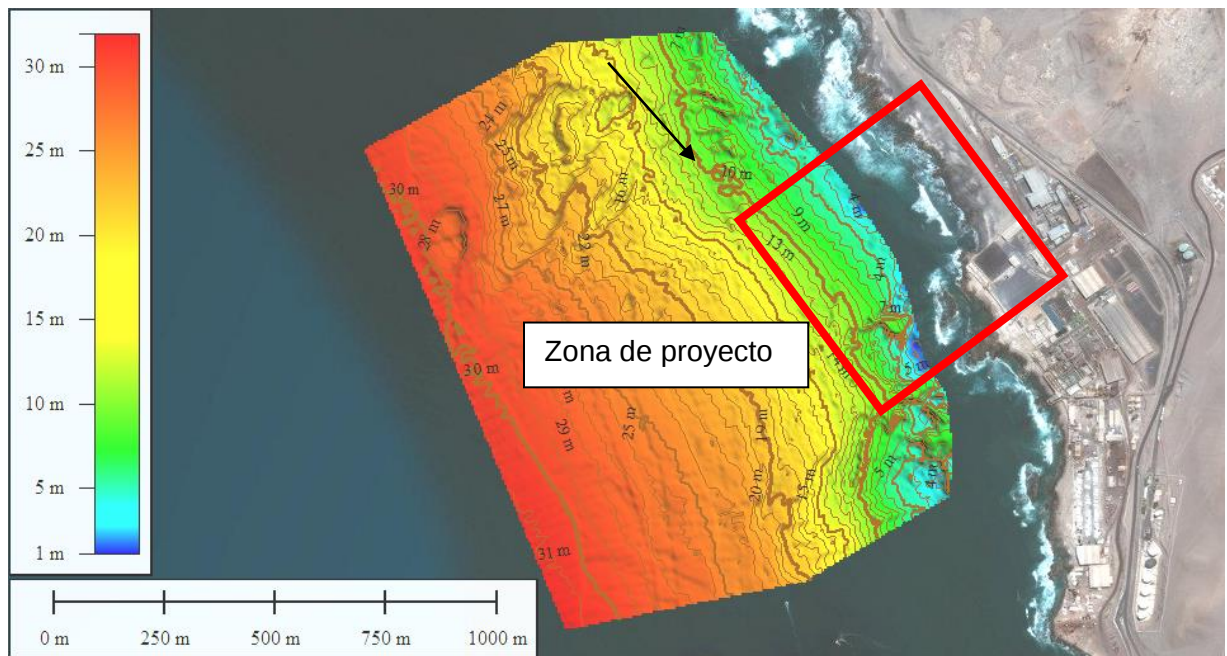


Figura 5-2: Levantamiento batimétrico de precisión Multihaz.

Fuente: DOP, 2013.

La cantidad de sondas batimétricas es de 74.310 puntos, en donde cada uno posee coordenadas UTM-19 Sur WGS-84 EGM08 y altimetría referida al nivel de reducción de sondas.

Entre el veril de los -3 y 0 [m] NRS no existe información batimétrica debido a que corresponde a una zona de fuertes rompientes de oleaje y formaciones rocosas, lo cual hacen peligrosa la navegación de cualquier embarcación. Para la obtención de sondas en este sector se recurre a la herramienta de interpolación lineal del software MIKE ZERO.

5.1.3. LÍNEA DE COSTA

Cabe destacar, que la línea de costa fue extraída desde el software versión gratuita *Google Earth* mediante el uso de herramientas de edición cartográfica, utilizando imágenes geo-referenciadas (raster) y archivos tipo rutas de *Google Earth* con extensión .kmz. A continuación se presenta un ejemplo del proceso de digitalización de la línea de costa.



Figura 5-3: Digitalización de la línea de costa.

Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

De igual manera que las sondas batimétricas, cada punto de la línea de costa posee coordenadas UTM -19 Sur WGS-84 EGM08, apoyadas de la información cartográfica de las cartas náuticas del SHOA en cuestión.

5.2. OLEAJE

Los datos de oleaje disponible, provienen de dos fuentes de información, la primera corresponde a mediciones de terreno y la segunda a datos de estados de mar provenientes de un modelo global.

5.2.1. OLEAJE MEDIDO EN TERRENO

Los datos de oleaje medidos en terreno, fueron obtenidos en una ventana de tiempo comprendida entre el 22 de julio y el 28 de agosto del año 2013. El instrumento de medición de oleaje fue mediante un ADCP RD INSTRUMENT modelo TELEDINE 600 Khz, serie 10077. Este instrumento fue fondeado a una profundidad aproximada de 20 metros, registrando datos durante 40 minutos cada 3 horas en celdas de 0,5 metros a 2 Hz. La posición del instrumento de medición se presenta en la siguiente tabla y en la Figura 5-4.

Tabla 5-1: Posición geográfica del instrumento ADCP con el que se midió oleaje.

Estación	Coordenada Norte [m]	Coordenada Este [m]
ADCP (oleaje)	7.952.813	360.342

Fuente: Elaboración propia.

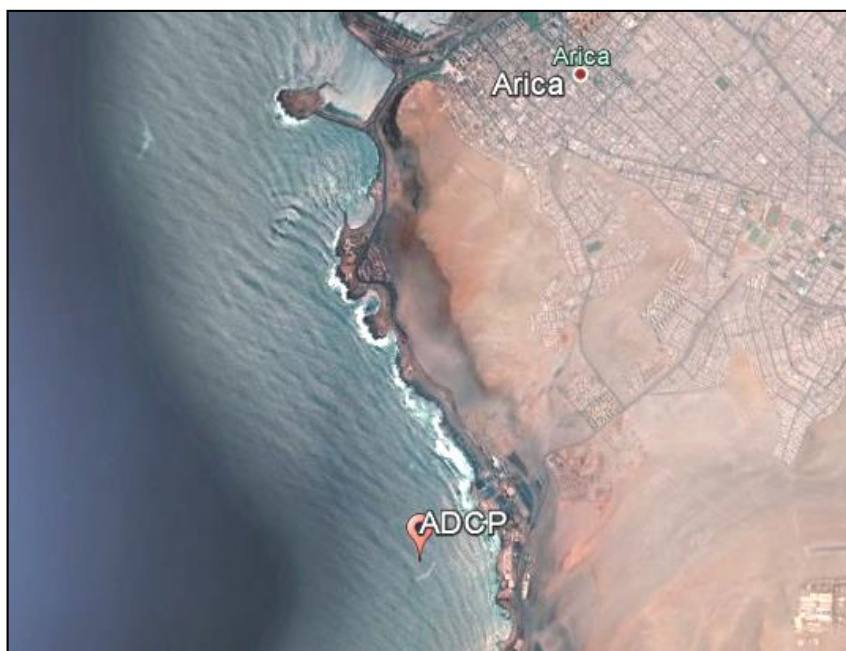


Figura 5-4: Posición del ADCP que registró el oleaje de terreno.

Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

5.2.2. OLEAJE DE MODELOS GLOBALES

El oleaje obtenido desde los datos de libre acceso de la NOAA, corresponden a valores en aguas profundas, para ello fue necesario utilizar códigos de extracción de datos con extensión .grb2 (ver Anexo 1). Los datos seleccionados poseen una extensión temporal de 30 años de hindcasting⁷, desde el 1 de enero del año 1980 al 31 de diciembre el año 2009, datos utilizados para realizar clima de oleaje en zona cercana a proyectar y clima de oleaje extremo.

Además, teniendo en cuenta que los datos de oleaje medidos en terreno se ubican en la ventana de tiempo entre el 22 de julio y el 28 de agosto del año 2013, se procedió a extraer datos desde el modelo WaveWatch III en un nodo de aguas profundas con el fin de utilizar esta serie de tiempo para calibrar el modelo de oleaje verificando estadística dato a dato y caracterización del clima medio del sector de estudio.

En la Tabla 5-2 y Figura 5-5 se presenta la posición de los nodos de datos de los modelos globales NOAA utilizados en el presente trabajo.

Tabla 5-2: Posición de extracción de datos modelos globales NOAA.

Fuente	Coordenada Norte [m]	Coordenada Este [m]
Modelo CFRS	7.897.975	289.466
Modelo WAVEWATCH III	7.897.975	289.466

Fuente: Elaboración propia.

⁷Reconstrucción de datos de oleaje.



Figura 5-5: Ubicación de nodo de extracción de oleaje NOAA.

Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

5.3. NIVEL DEL MAR

Las mediciones de la desnivelación del mar se iniciaron el día 22 de julio del año 2013, terminando el 28 de agosto del mismo año. El instrumento con el que se realizaron las mediciones corresponde al ADCP RD INSTRUMENT modelo TELEDINE 600 Khz, serie 10077. El instrumento fue fondeado a una profundidad aproximada de 20 metros, tomando datos cada 5 minutos de la presión en la columna de agua sobre el sensor del ADCP.

La posición del instrumento de medición se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5-3: Posición geográfica UTM -19S del instrumento.

Estación	Coordenada Norte [m]	Coordenada Este [m]
ADCP (desnivel del mar)	7.956.085	359.571

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se decidió utilizar el nivel del mar proporcionado por el sensor de presión del ADCP, debido a que las mediciones del nivel del mar registradas por el mareógrafo presentaron importante presencia de ruido. Esta medición se encontraba dentro del Club de Deportes Náuticos de Arica (CDNA). De forma complementaria, el Nivel de Reducción de Sondas se obtuvo del Puerto Patrón Arica, desde las Tablas de Mareas SHOA.

6. METODOLOGÍA

En el presente acápite se detalla paso a paso la metodología propuesta para llevar a cabo cada uno de los objetivos del proyecto, en la siguiente figura se muestra un esquema de con los ítems más relevantes del trabajo.

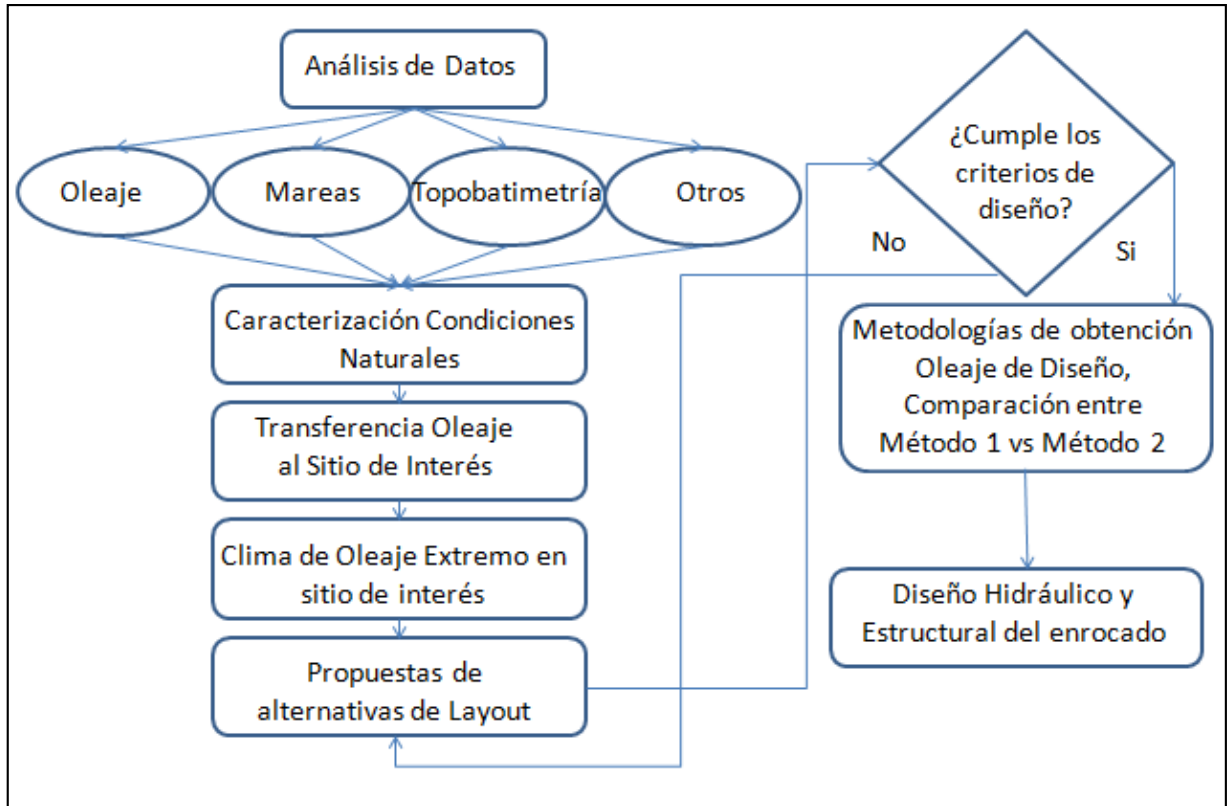


Figura 6-1: Esquema metodológico en base a los objetivos específicos.

Fuente: Elaboración propia.

La primera etapa, **análisis de datos disponibles**, corresponde a la recopilación y revisión de los antecedentes del proyecto, tales como oleaje, mareas y batimetría, entre otros.

La segunda etapa, consiste en **caracterizar las condiciones naturales** de cada variable de estudio, en donde se conocerá el clima de oleaje en aguas profundas (Datos NOAA entre los años 1980-2009), clima de oleaje en sitio de estudio (campana de Invierno 2013), caracterización del nivel del mar, incluyendo planos mareales y nivel de reducción de sondas local, generación de modelo batimétrico (el cual incluye datos de cartas náuticas digitalizadas y batimetría de precisión en sitio de proyecto).

En una tercera etapa, se plantea generar una **transferencia de oleaje** utilizando parámetros de resumen desde aguas profundas hacia el sitio de interés. Para lo anterior es necesario generar modelo numérico de propagación de oleaje, utilizando como condición de borde datos NOAA de Altura significativa, Periodo Peak y Dirección Peak durante la ventana de tiempo en la cual se midieron los datos de oleaje en el sitio de interés, lo anterior con el fin

de calibrar el modelo en cuestión. Una vez desarrollado lo anterior, se generarán coeficientes de agitación y de cambio en la dirección de la onda en el sitio de interés, con el propósito transferir al sitio de interés el clima de oleaje de largo plazo y así caracterizar el lugar de proyecto.

Con los resultados obtenidos en la etapa anterior, se generará un **clima de oleaje extremo** en el sitio de interés, con el que se caracterizarán las mayores tormentas ocurridas utilizando metodología de altura máxima por año. Con lo anterior, se estimarán condiciones extremas para el proyecto. Esta parte del proyecto corresponde a la cuarta etapa.

La quinta etapa corresponde a la **propuesta de dos configuraciones de layouts**, los cuales serán puestos a prueba mediante criterios de diseño operacional (PIANC ,1995 y R.O.M 3.1-99, 2000). Para lo anterior será necesario transferir el oleaje (datos NOAA 1980 - 2009) desde el sitio de interés hacia el interior de las zonas abrigadas que ofrecerán ambas configuraciones, para este proceso se utilizará un modelo de transferencia de oleaje tipo *Boussinesq*, con el cual se realizará un análisis de agitación para conocer la operatividad efectiva y el cumplimiento de los criterios de navegabilidad y operatividad. Con esto se determinará la propuesta óptima de *layout*, la cual será desarrollada en la siguiente etapa.

La sexta parte del estudio corresponde al desarrollo del **diseño hidráulico y estructural de la propuesta seleccionada**. Para esto, será necesario determinar niveles de diseño, oleaje de diseño, entre otros. El cálculo del oleaje de diseño será propuesto mediante la incorporación de dos metodologías: i) Utilización de resultados de la cuarta etapa correspondiente al clima de oleaje extremo definiendo la ola de diseño, la cual será transferida hacia la estructura desde el sitio de interés hasta el pie del talud de la estructura utilizando el modelo de agitación *Boussinesq*. La segunda propuesta: ii) Transferencia de oleaje (Datos NOAA 1980 - 2009) desde sitio de interés hacia la estructura en cuestión utilizando modelo de agitación *Boussinesq*, con lo que se podrá obtener el clima de oleaje en interacción con la estructura. Una vez desarrolladas ambas metodologías se escogerá la más óptima utilizando como criterio de selección P.I.A.N.C (Permanent International Association of Navigation Congresses) y/o R.O.M 3.1-99.

Finalmente, para la determinación del diseño estructural, se propone realizar análisis de sensibilidad con tres elementos: i) Rocas, ii) Cubos de hormigón, iii) Cubípodos, en donde se escogerá el elemento que ofrezca mejor relación entre *peso/estabilidad*. Con lo anterior se generarán las especificaciones técnicas del cálculo y planimetría de la estructura diseñada.

6.1. BASES DE DISEÑO

Las bases de diseño, corresponden al conjunto de criterios y aspectos ingenieriles para determinar el periodo de retorno de las obras en general, en donde es necesario conocer los riesgos asociados, niveles de inversión, tipología de estructura a proyectar, vida útil, entre otros.

Por tanto, para lo anterior, específicamente para determinar el periodo de retorno de las obras, es necesario recurrir a normativas y/o recomendaciones marítimas. Dado esto, se propone utilizar las metodologías propuestas por Zhou Liu & Peter Frigaard (2001) y las Recomendaciones para Obras Marítimas (en adelante ROM), específicamente la R.O.M 3.1-

6.2. ANÁLISIS DE DATOS DISPONIBLES

A continuación, se explica la metodología propuesta para el análisis de las variables estudiadas, oleaje y mareas. Se busca generar estudios previos, con el fin conocer las condiciones medias en las zonas de campo cercano y lejano del proyecto. Estos análisis corresponden a climas de oleaje con las datas disponibles y estimaciones de los distintos niveles de mareas mediante el uso de los datos medidos en terreno.

6.2.1. ANÁLISIS DE OLAJE

El análisis de oleaje, cualquier sea su fuente, se realiza mediante la verificación estadística de las siguientes variables: alturas de las olas, periodos de las olas y direcciones de las olas, disponibles como parámetros resúmenes cada tres horas. Para lo anterior, se confeccionan tablas de incidencia (Altura de la ola / Dirección de la ola, Altura de la ola / Periodo de la ola, Dirección de la ola / Periodo de la ola) y rosas de oleaje (Dirección de la ola / Altura de la ola, Dirección de la ola / Periodo de la ola), permitiendo verificar las frecuencias acumuladas y probabilidad de excedencia de la data estudiada.

6.2.2. ANÁLISIS DE MAREAS

Las mediciones de mareas, generalmente se encuentran referidas al cero instrumental, sin embargo es necesario referirlas al nivel medio del mar o al nivel de reducción de sondas (NRS). Posterior a ello, los datos deben ser analizados, identificar si es que existen anomalías y eliminarlas, para luego identificar los distintos niveles mareales.

Mediante un análisis armónico de la señal medida, referida al cero instrumental, es posible obtener el NRS. Este procedimiento se realiza mediante la metodología propuesta en la Publicación 3105, SHOA (2003). A continuación se detalla dicho método.

$$NRS = Z0 - (H_{M2} + H_{S2} + H_{N2} + H_{K1} + H_{O1}) \quad (\text{Ec. 6-1})$$

Z0: nivel medio del mar

H_{M2}: semiamplitud constituyente lunar principal semidiurno

H_{S2}: semiamplitud constituyente solar principal semidiurno

H_{N2}: semiamplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno

H_{K1}: semiamplitud constituyente lunisolar declinacional diurno

H_{O1}: semiamplitud constituyente lunar declinacional diurno

Para determinar las constituyentes armónicas de la marea, es necesario realizar un análisis armónico utilizando el método de mínimos cuadrados. Además, es posible verificar el régimen de marea con el coeficiente de *Courtier*⁸ utilizando los armónicos obtenidos.

⁸Courtier: Coeficiente determinante del régimen de marea, (SHOA, Pub. 3013, Glosario de Marea y Corrientes, 1992).

Los niveles de mareas son utilizados con el fin de caracterizar las condiciones locales, para ello es necesario realizar un análisis armónico y no armónico de la marea. La Pub. 3202: Instrucciones oceanográficas N°2, método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea, SHOA (1999), indica la metodología a seguir para la obtención de los planos mareales. A modo de ejemplo, en la siguiente figura es posible observar los planos de la marea con respecto a la cota fija de mareas CF1.

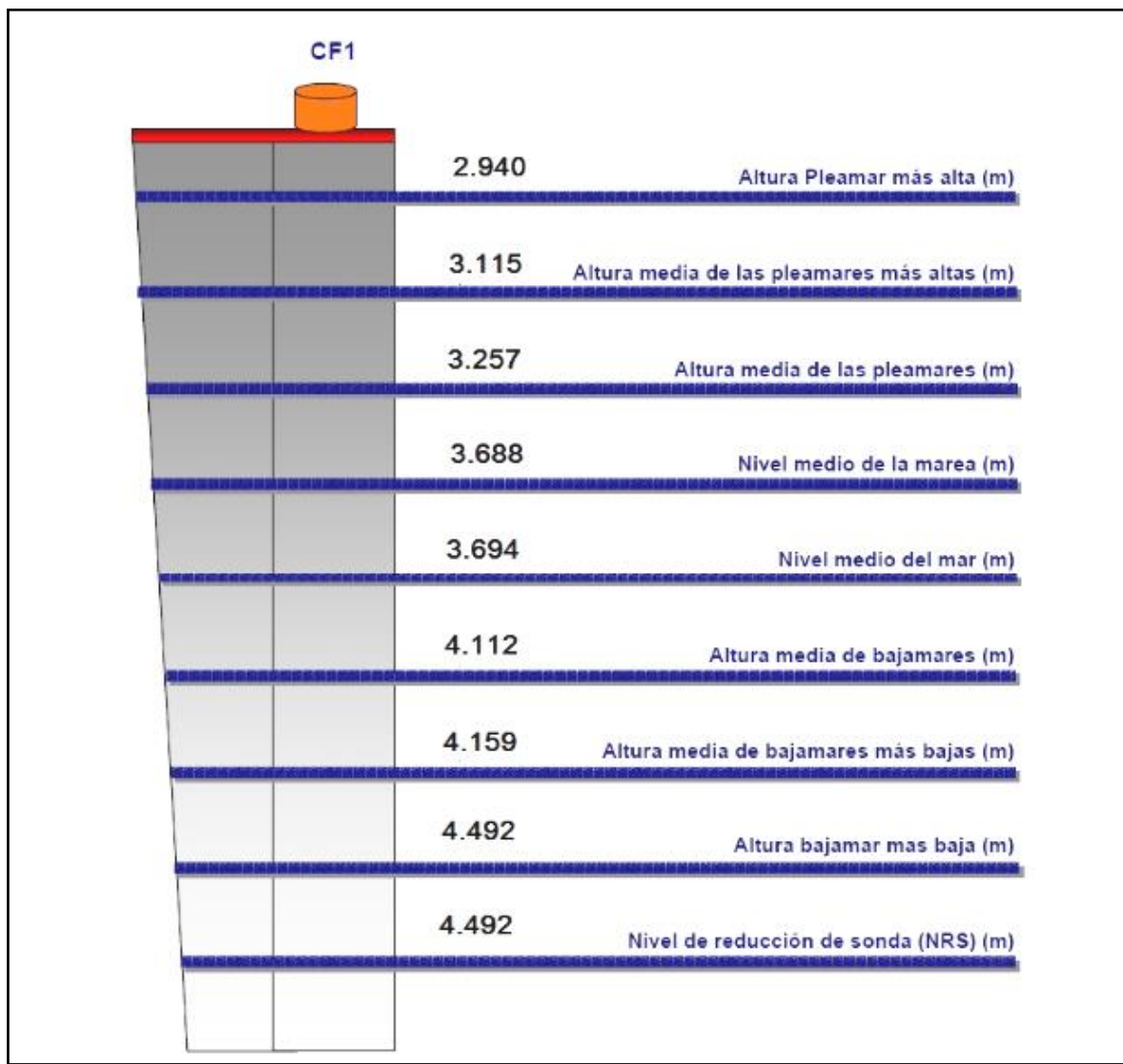


Figura 6-2: Planos mareales del nivel del mar.
Fuente: Elaboración propia.

6.3. TRANSFERENCIA DE OLAJE AL SITIO DE INTERÉS

El proceso de transferencia de oleaje, desde un punto de aguas profundas a otro menos profundo, se realiza con el fin de obtener un clima de oleaje cercano a la zona de proyecto (o sitio de interés) con el fin de caracterizar el oleaje operacional y extremo. Como se mencionó anteriormente, en el acápite 4.2, existen diversas metodologías de transferencia, en donde las más utilizadas corresponden a las transferencias de parámetros de resumen y a la cuasi purista (transferencia de espectros). Para cualquiera sea el caso, los datos de oleaje (ej: Hs - Hm0, Tp - Tm, Dp - Dm y espectros bidimensionales) pueden ser obtenidos desde diversas fuentes; a) desde modelos globales de retro análisis y hindcasting de libre acceso (WaveWatch III y CFRS ambos de la NOAA, ERA INTERIM) , Atlas de oleaje UV y b) de carácter pagado como el proyecto "Olas del Pacífico" de Baird & Associates, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), la Estación Experimental de Vías Navegables, y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

6.3.1. DEFINICIÓN DEL SITIO DE INTERÉS

La generación de los coeficientes de agitación y de cambio en la dirección de la onda, se deben realizar en un sitio de interés cercano a las obras que se deseen proyectar. Por lo tanto, su definición es clave para el desarrollo de cualquier proyecto de índole marítimo-portuario. Para evaluar el sitio de interés, se deben considerar ciertos criterios, los cuales se proponen a continuación.

- Debe estar cercano a las obras proyectadas.
- Es importante que se ubique en un sector con batimetría regular y no cercano a pendientes bruscas que perjudiquen por ejemplo el fondeo de un ADCP.
- En lo posible su definición debe estar fuera de zonas de pérdida de energía del oleaje como por ejemplo zonas de rompiente, difracción, refracción y asomeramiento brusco.
- La profundidad del sitio de interés debe ser la adecuada dependiendo de las características técnicas de los instrumentos que allí medirán oleaje y/o corrientes eulerianas. Por ejemplo, un ADCP RDI Workhorse Sentinel⁹ de 600 khz es posible fonderarlo a una profundidad máxima de 66 metros (teórico) y uno de 1200 khz máxima de 19 metros (teórico).

6.3.2. TRANSFERENCIA DE PARÁMETROS RESUMEN AL SITIO DE INTERÉS

Para conocer el clima de oleaje en el largo plazo de un sitio en particular, es necesario realizar una transferencia de estos datos desde el nodo de constitución de ellos hasta el sitio de interés. Esta transferencia, según el acápite 4.2 del, se puede realizar con cada una de las metodologías propuestas, sin embargo, si se considera la utilización de parámetros de resumen, que la influencia del oleaje local no se considera en el presente estudio y que los efectos de difracción son de menor influencia, es posible utilizar la metodología de "Transferencia de parámetros de resumen".

⁹ Brochure RDI ADCP Workhorse Sentinel:
http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/sentinel_datasheet_lr.pdf

Dadas las condiciones anteriormente explicadas, es posible utilizar el modelo numérico MIKE 21 Spectral-Waves, el cual utiliza la ecuación de acción de la ola resuelta con el método de volúmenes finitos de celdas centrales.

Para llevar a cabo el trabajo de propagación se consideran tres partes, pre proceso, proceso y post proceso, metodología propuesta por Garcia (2009) y adaptada por el autor del presente documento.

a. PRE PROCESO

En esta etapa se preparan todos los elementos necesarios para utilizar el modelo de propagación de oleaje, primordial para la transferencia de parámetros de resumen.

Definición del problema a resolver

Es de suma importancia tener claro el problema que se busca resolver. Para lo anterior es necesario saber que fenómenos son los claves, tales como el asomeramiento, la refracción, la difracción, la reflexión, la rotura del oleaje, etc., además de considerar el área donde estos fenómenos son más importantes.

Lugar de implementación del modelo

Para llevar a cabo la propagación es necesario considerar que región definir como dominio del modelo, teniendo en cuenta las limitaciones de este. Es por esto que acá se definen todos los sectores que se deben considerar para representar adecuadamente el problema, sitios puntuales y críticos para el desarrollo.

Condiciones de borde

- Condiciones de borde abiertas: Corresponden a las fronteras delimitadas por las masas de agua. En estos sectores son donde el modelo es forzado.
- Condiciones de borde cerradas: Estas fronteras delimitan las masas de agua con los continentes e islas, utilizando la línea de costa para ello. Esta última puede ser definida por mediciones topobatimétricas, cartas náuticas digitalizadas o apoyo de imágenes satelitales.

Algunos mecanismos forzadores, son detallados a continuación:

- Estados de mar o parámetros de resumen, considerando la altura peak de la ola, el periodo peak y la dirección peak.
- Espectros de oleaje.
- Series de tiempo del nivel del mar.
- Series de tiempo de vientos.
- Series de tiempo de corrientes.
- Entre otros.

Batimetría

Para desarrollar óptimamente el problema de propagación de oleaje, es sumamente importante contar con buenas condiciones de sondaje en la zona de contorno (o dominio) definida. Es por esto que comúnmente se utilizan diversas fuentes de información batimétrica.

- cartas náuticas digitalizadas
- Mediciones topobatimétricas de terreno
- Modelos globales de información batimétrica

Cabe destacar que, para el correcto desempeño del modelo, toda la información batimétrica disponible debe estar relacionada bajo mismas condiciones de sistemas de referencia, planimétrico y altimétrico.

- El planimétrico es el sistema de referencia para representar la posición de las sondas en el planeta. Comúnmente se utilizan coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) WGS-84, definiendo el Huso horario en el que se ubican los datos y las coordenadas geográficas (en grados, minutos y segundos).
- El altimétrico, indica la altura con respecto a un sistema de referencia. Para proyectos marítimo-portuarios el nivel de referencia altimétrico es el nivel de reducción de sondas (NRS).

Malla de cálculo

La grilla de cálculo se compone de muchos elementos, los cuales poseen nodos o vértices. Este proceso de elaboración de la malla, se realiza mediante sub-programas incorporados en los modelos. MIKE 21 SW utiliza MIKE ZERO - MESH GENERATOR y BATHYMETRIES para MIKE 21 BW, los cuales ofrecen distintas herramientas para editar las mallas de cálculo.

Las grillas con elementos más finos ofrecen mejor calidad de resultados, sin embargo el costo computacional de cálculo es muy elevado comparado con utilizar elementos más robustos. Dicho lo anterior, se realiza una leve transición entre el tamaño de los elementos, considerando los más grandes en las zonas cercanas a las fronteras abiertas y los más pequeños en las zonas de interés. Para la confección de las mallas de cálculo se deben seguir ciertos criterios, algunos de ellos se presenta a continuación.

- La forma de los elementos: Dado que los elementos que utiliza MIKE 21 SW corresponden a triángulos, estos deben asimilarse lo más posible a equiláteros, evitando totalmente los triángulos de forma plana. Por lo que se estima, dentro de la configuración de los elementos, que deben tener un ángulo interior mayor a 30°, de lo contrario podrían presentar problemas de inestabilidad numérica.
- Debe existir una transición gradual del tamaño de los elementos. Si esta transición no existe y se pasa directamente de elementos grandes a elementos pequeños, el error existente en los elementos cercanos a las condiciones de borde pasará rápidamente a los elementos de menor tamaño, generando problemas de inestabilidad. Un criterio apropiado de selección del tamaño de los elementos es que se generen sub-grillas,

en donde predecesora a la más grande debe tener elementos de al menos un tercio de la anterior y el tamaño de la grilla en la misma proporción con respecto a sucesora.

- Se deben evitar los fuertes gradientes batimétricos, si no son revisados pueden provocar grandes problemas y errores en el modelo.
- Deben considerar condiciones de estabilidad numérica mediante la verificación del número de *Courant*, el cual debe ser menor a la unidad para todos los elementos de la grilla de cálculo.

b. PROCESO

En esta etapa se utilizan las herramientas generadas en el pre proceso para resolver las ecuaciones del modelo mediante el método de volúmenes finitos (en el centro del elemento).

A continuación se detallan los parámetros que deben ser especificados en la configuración del modelo.

Paso del tiempo

Dado que el problema de propagación es realizado mediante parámetros resúmenes, se debe utilizar el esquema de formulaciones de parametrización desacoplada direccional - quasi estacionaria (para MIKE 21 SW), el cual permite incluir un *time step*¹⁰ igual al intervalo de la serie de datos de oleaje con la que el modelo es forzado. Si el modelo fuese utilizado con formulaciones completamente espectrales, el paso del tiempo sería limitado por el *número de Courant*, el cual debiera ser menor a la unidad considerando que el tiempo de retención de un fenómeno al interior de cada elemento debe ser mayor al *time step*, según Sepúlveda (2010).

$$C = \frac{V_f Dt}{Dx} < 1 \quad (\text{Ec. 6-2})$$

V_f : velocidad del fenómeno

Dt : paso del tiempo

Dx : distancia entre nodos

Por tanto, si el fenómeno a estudiar es el oleaje, en la velocidad del fenómeno debe incluirse la celeridad del frente de ola.

Parámetros de la modelación

En esta parte del proceso se determina el cómo se realizará la modelación, bajo que esquemas y formulaciones (ofrecidas en la programación del modelo) se simplificará el problema, y el modo en que se extraerán los resultados. MIKE 21 SW, en sus manuales, detalla paso a paso el desarrollo de un problema tipo, en donde considera que los parámetros de calibración claves corresponden a:

¹⁰Paso del tiempo.

- Resolución del mallado y del espacio espectral
- Fricción de fondo
- Parámetros de rotura de la ola
- Vientos
- Corrientes
- Entre otros

Comúnmente se extraen resultados en los lugares específicos donde se encuentran las mediciones en terreno, con el fin de comparar la realidad versus la simulación. Además, para revisar el correcto funcionamiento del modelo, se solicitan salidas gráficas de todo el dominio en cuestión.

c. POST PROCESO

El post proceso, es el procedimiento en el cual se verifican los resultados obtenidos luego de las modelaciones. Como se dijo anteriormente, es necesario calibrar el modelo mediante ciertos parámetros incluidos en él.

La calibración se refiere al como son ajustados los modelos mediante los coeficientes de forma, parámetros y otras metodologías alternativas, con el fin de caracterizar de manera asertiva las condiciones de oleaje medidas en terreno. De manera alternativa, en el punto siguiente (ver acápite 6.3.3), se define una metodología alternativa de calibración.

En este punto, se verifica la bondad del modelo respecto las mediciones, lo cual se realiza mediante un enfoque de comparación entre los datos medidos y los simulados, determinando el error relativo medio y el coeficiente de correlación entre ellos.

6.3.3. METODOLOGÍA ALTERNATIVA DE CALIBRACIÓN

A continuación, se propone una metodología de calibración alternativa para el ajuste de datos NOAA en aguas profundas, debidamente propagados hacia aguas poco profundas, con respecto a datos medidos en terreno.

6.3.3.1. DEFINICIÓN DE PROCESO DE AJUSTE DE DATOS

Para realizar este procedimiento es necesario tener claro que desde la comparación entre os datos medidos en terreno y los resultados de la propagación del oleaje (en un mismo punto y ventana de tiempo) existe un error o diferencia. Este valor es utilizando para corregir los datos oleaje de aguas profundas con el fin de que al ser propagados nuevamente el error o diferencia sea menor (proceso iterativo)¹¹.

¹¹ Las variables afectas a este proceso iterativo corresponden a la altura signitativa y al periodo peak, con respecto a la dirección peak del oleaje no se realizan cambios. Lo anterior se debe a que ambas fuentes de datos analizadas no presentaron relación en el sitio de estudio, sin embargo, mantuvieron la tendencia de permanecer en el mismo cuadrante de la rosa de oleaje con una desviación estandar de 10° en promedio.

El ajuste de los datos en aguas profundas (en este caso, ventana de tiempo correspondiente al periodo en que se midieron los datos de oleaje en terreno) se realiza aplicando el error entre los datos simulados (propagados desde aguas profundas hasta el lugar donde se tomaron los datos de campo) y los valores de oleaje obtenidos por las mediciones del ADCP. Para lo anterior es necesario definir n rangos de alturas y m periodos de las ondas, con el fin de que la discretización de las clases sea lo suficientemente representativos de los datos analizados, donde finalmente cada rango será caracterizado por un valor constante.

6.3.3.2. AJUSTE DE DATOS EN AGUAS PROFUNDAS

Como se explicó anteriormente, cada dato de altura de ola y periodo simulado poseen cierto error con respecto a las mediciones, los cuales son discriminados por n rangos de clases. Por lo tanto, para aplicar estos errores y corregir los datos de oleaje en aguas profundas, en periodos o ventanas de tiempo superiores a la modelada, es necesario aplicarles un factor de corrección como el siguiente:

$$\text{Diferencia media } H_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{s\text{medido}} - H_{s\text{simulado}}) \quad (\text{Ec. 6-3})$$

$$\text{Diferencia media } T_p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_{p\text{medido}} - T_{p\text{simulado}}) \quad (\text{Ec. 6-4})$$

siendo n, m : tamaño de la muestra

Como se puede observar en las ecuaciones 6-3 y 6-4 las diferencias medias de periodos y alturas de olas son definidas para cada rango de clase, donde cada diferencia media es ponderada con un factor de ajuste. Este factor es producto de un análisis de sensibilidad que se realiza con el fin de obtener una mejor bondad entre los datos simulados y los ponderados mediante un proceso iterativo, el cual se define en las ecuaciones 6-5 y 6-6.

$$\begin{aligned} \text{Factor de ajuste } H_s &= (\text{Diferencia media } H_s) * F_s \\ &= \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{s\text{medido}} - H_{s\text{simulado}}) \right) * F_s \end{aligned} \quad (\text{Ec. 6-5})$$

$$\begin{aligned} \text{Factor de ajuste } T_p &= (\text{Diferencia media } T_p) * F_s \\ &= \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_{p\text{medido}} - T_{p\text{simulado}}) \right) * F_s \end{aligned} \quad (\text{Ec. 6-6})$$

F_s : factor de ajuste

Para realizar el ajuste mencionado, es necesario aplicar los factores de ajustes, sumándolo o restándolo (dependiendo de su signo) a las alturas de olas o periodos que se encuentren dentro de cada rango de clases.

6.3.4. CLIMA DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS CON DATOS AJUSTADOS

El análisis de oleaje en aguas profundas con la data ajustada se realiza utilizando la metodología propuesta en el acápite 6.2.1.

6.3.5. MODELACIÓN PARA OBTENER COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA

Para generar los coeficientes de agitación y de cambio en la dirección (K_a y K_d , respectivamente) en zonas de aguas poco profundas, es necesario considerar aspectos claves previos a la modelación. Claramente el modelo a utilizar dependerá de los fenómenos físicos, producto de la propagación, que ocurran en el lugar de interés. Sin embargo, se utilizará el modelo preparado mediante la metodología propuesta en el punto 6.3.2

6.3.5.1. GENERACIÓN DE CASOS UNITARIOS

Para confeccionar los K_a y K_d , es necesario definir estados de mar unitarios representativos del clima de oleaje en aguas profundas, en lo posible con una serie de tiempo de a lo menos 20 años de oleaje¹², con el fin de caracterizar el clima medio del sector. Además, estos estados de mar deben abarcar todas las direcciones y periodos de la data utilizada¹³, por lo tanto se definen los máximos y mínimos valores de las variables (Dirección y Periodo), discriminados por n rangos. Luego de definir lo anterior, se obtienen m cantidad de combinaciones de los respectivos estados de mar.

6.3.5.2. COEFICIENTES DE AGITACIÓN Y DE CAMBIO DE DIRECCIÓN

Una vez transferidos los estados de mar unitarios al sitio de interés, se obtienen los coeficientes de agitación y de cambio en la dirección, los cuales abarcan toda la data de oleaje estudiada. A continuación, se presentan ejemplos gráficos en las figuras Figura 6-3 y Figura 6-4.

¹² SHOA PUB. 3201, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, Clima de oleaje en aguas profundas.

¹³ En el caso de trabajar con espectros, los casos unitarios debieran abarcar el ancho de banda de las frecuencias y de las direcciones de estos. Discriminando ambas variables según corresponda.

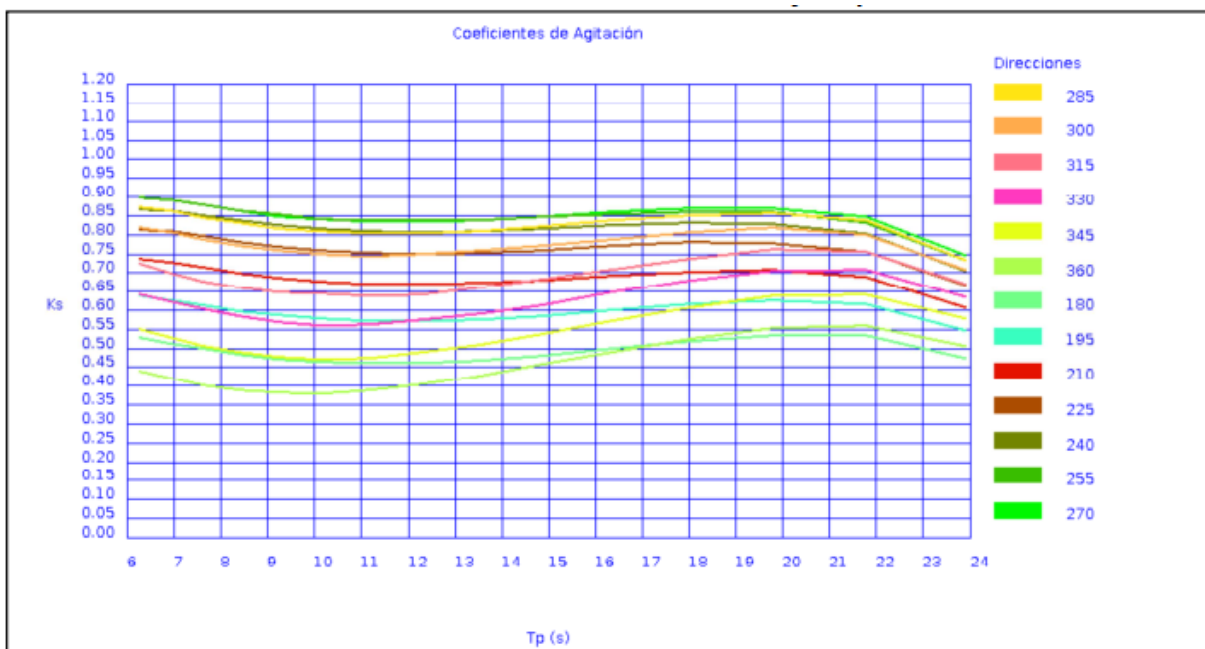


Figura 6-3: Coeficientes de agitación, sector Quiane, Arica.
Fuente: DOP Región de Arica y Parinacota.

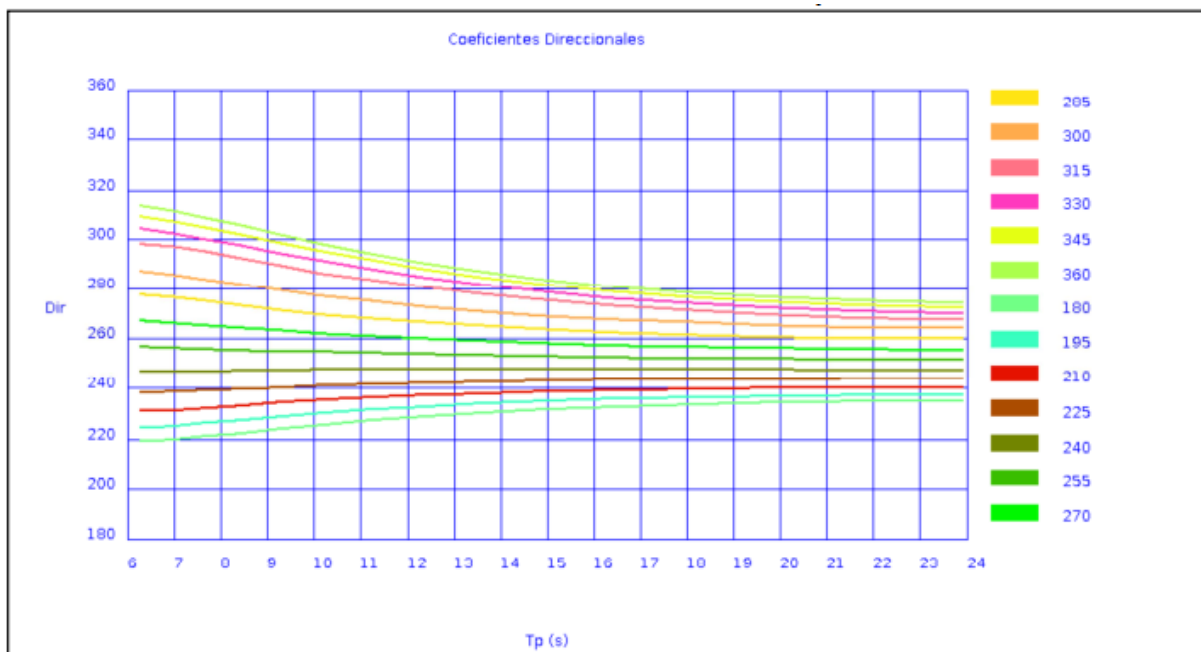


Figura 6-4: Coeficientes de cambio en la dirección, sector Quiane, Arica.
Fuente: DOP Región de Arica y Parinacota.

6.3.6. APLICACIÓN DE COEFICIENTES A DATOS DE AGUAS PROFUNDAS

Obtenidos los coeficientes de agitación y de cambio en la dirección del oleaje, estos son aplicados a la data ajustada de aguas profundas (resultado de metodología alternativa de calibración, ver acápite 6.3.3.2) mediante un código de transferencia MATLAB (ver Anexo 2). A este proceso se le denominó *transferencia de olas en parámetros de resumen con un método propio basado en el método de transferencia cuasi purista* de Nicolau (2006). Este procedimiento se realiza de manera similar a la transferencia de oleaje cuasi purista, pero aplicando los coeficientes de agitación a los parámetros de resumen en aguas profundas, no implica trabajar con los espectros de oleaje. Con este procedimiento, se busca transferir datas largas de parámetros de resumen, con el fin de disminuir el costo computacional.

Por lo tanto, utilizando la siguiente relación se obtienen los parámetros resúmenes transferidos al punto de interés (lugar donde se obtuvieron K_a y K_d):

$$H_s \text{ transferido} = H_s \text{ aguas profunda} * K_a \quad (\text{Ec. 6-7})$$

$$D_p \text{ transferido} = D_p \text{ aguas profundas} \pm K_d \quad (\text{Ec. 6-8})$$

El signo de K_d se define como el sentido en que el parámetro resumen asociado cambió su dirección al ser propagado al sitio de interés.

Para realizar el proceso de transferencia propuesto, es necesario discriminar en rangos de clases los periodos y direcciones del oleaje en aguas profundas, de la misma manera en que fueron discretizados los coeficientes K_a y K_d . Con esto, a cada dato de oleaje en aguas profundas, que se encuentre en estos rangos de clases se aplicará un cambio en su dirección y en su altura de ola.

Una vez obtenido los resultados de los datos transferidos al puntos de interés, se generará un clima de oleaje en este sector, con el fin de conocer sus características locales operacionales y de largo plazo, utilizando la metodología propuesta en el acápite 6.2.1.

6.4. CLIMA DE OLEAJE EXTREMO

El oleaje es una de las principales variables a considerar en el diseño de las estructuras de protección costera, su intensidad es determinante para cuantificar el tamaño que tendrán los elementos de la coraza de la estructura de protección. Para lo anterior, es sumamente importante contar con un clima de oleaje superior, en serie de tiempo, o igual a la vida útil del proyecto, considerando que es necesario conocer las solicitudes por oleaje en toda la extensión de la defensa, identificando las zonas más críticas y expuestas.

El oleaje de diseño, según la Publicación 3201 del SHOA en el punto 3.1.5, indica que:

..."El análisis de olas extremas deberá ser efectuado identificando y aislando, como mínimo, las mayores tormentas ocurridas en cada uno de los 20 años de Hindcasting (20 eventos), para cada una de las componentes del oleaje (tipos Sea & Swell que llegan generalmente

desde el tercer y cuarto cuadrante a las costas de Chile) requeridos en 3.1.2, con el fin de observar el oleaje de diseño para diferentes direcciones y caracterizar el oleaje en casos extremos. Con esta información, se deberá llevar a cabo un análisis estadístico de los valores extremos, que arroje una estimación de la altura significativa de la ola con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Además deberán incluirse en el análisis, los parámetros claves (Altura significativa (H_s), periodo de "peak espectral" (T_p), dirección de incidencia (Dir), fecha y duración asociados con cada tormenta."...

Las datas de oleaje de aguas profundas, disponibles en el mercado y de acceso liberado, poseen datos de re-análisis y hindcasting desde el 1980 hasta el presente, con lo que se tienen más de 30 años de datos (ver Tabla 6-1). En el trabajo realizado por Winckler **et. al.**, 2015, en donde se analiza la tormenta ocurrida el 8 de agosto del año 2015 en la región de Valparaíso, se revisan las datas de oleaje disponibles en aguas profundas, observando que los periodos de retornos asociados en los primeros 10 años superan los 5 metros. En la siguiente tabla y figura se presenta información de los de oleaje disponible en la web, incluyendo además un análisis de los datos utilizando herramientas estadísticas para una distribución Weibull.

Tabla 6-1: Información sobre bases de datos y métodos de análisis de valores extremos.

Base de datos	Inicio	Término	Distribución	Coefficiente	R^2	Umbral
FUGRO	1989-09-09	1991-05-31'	Weibull	$k = 1.0$	0,99	5,75 [m]
ERA-I	1979-01-01'	2014-12-31'	Weibull	$k = 1.4$	0,99	4,99 [m]
IFREMER	1990-01-01'	2014-12-31'	Weibull	$k = 1.4$	0,98	4,81 [m]
NOAA CFSR	1979-01-01'	2010-12-31'	Weibull	$k = 1.4$	0,94	5,48 [m]
NOAA WWIII	1997-01-01'	2010-12-31'	Weibull	$k = 1.0$	0,93	4,83 [m]
EEM	1979-01-01'	2010-12-31'	Weibull	$k = 1.4$	0,94	7,24 [m]
DOP	1980	2013	-	-	-	Máx. anual

Fuente: (Patricio Winckler Grez, 2015).

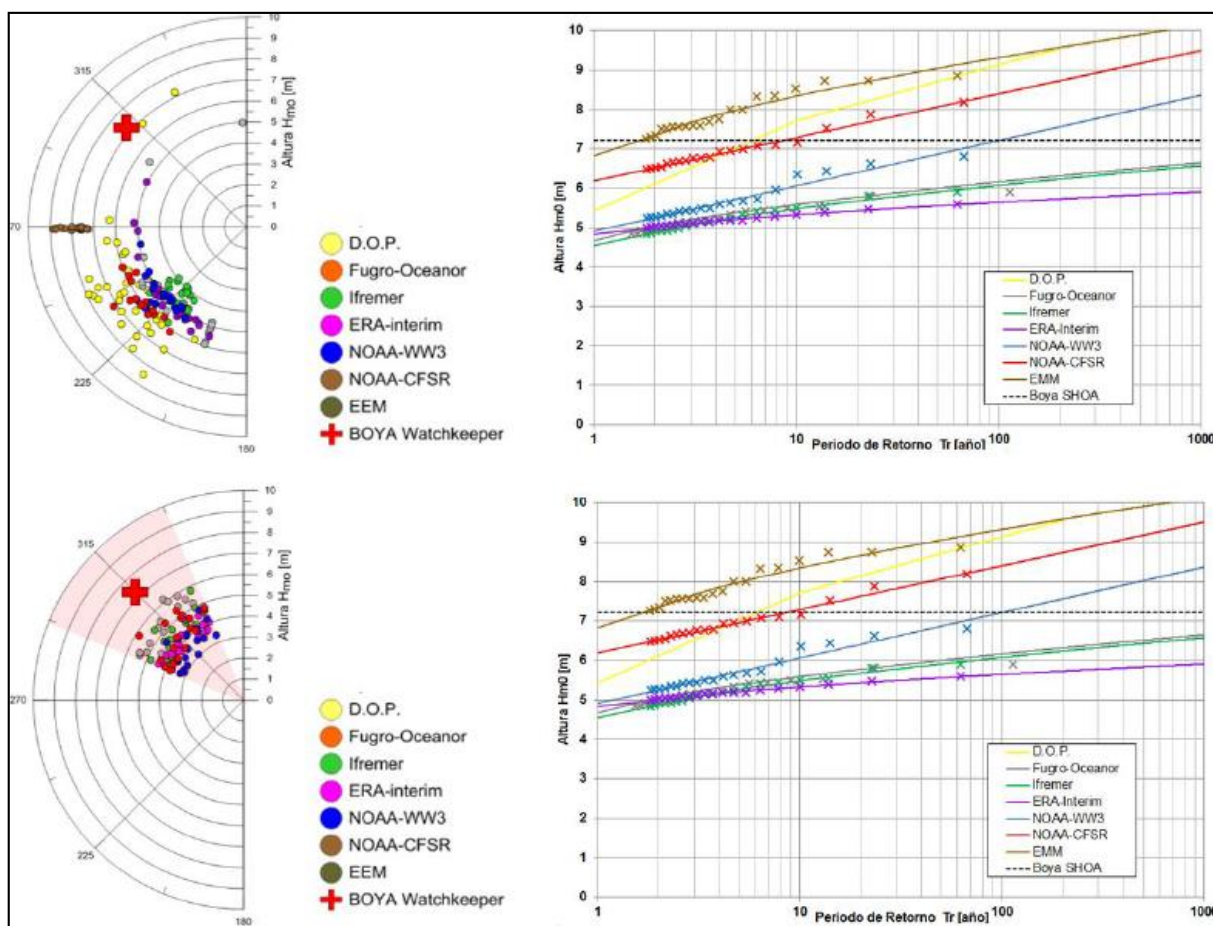


Figura 6-5: Curvas H_{m0} en aguas profundas y Tr a la cuadra de Valparaíso.

Fuente: Winckler et al., (2015).

En la Figura 6-5 se muestra que al menos tres fuentes de datos no superan el umbral de $H_s = 7.3$ [m] (Altura de ola más alta registrada por la boyta WatchKepper del SHOA, para un periodo de 13.3 [s] y 310° , ubicada en aguas profundas a la altura de Punta Ángeles) dentro de un periodo de retorno de 100 años. Sin embargo, las datas gratuitas NOAA si la consideran. Winckler et al., 2015, además indican que dentro de la historia Chilena se deben tener en cuenta los eventos anteriores al 1980 (10 agosto 1965), aumentando la incertidumbre sobre la estimación de los periodos de retorno.

Con respecto a la situación de la región en donde se desarrolla el presente proyecto, XV Región de Arica y Parinacota, las bases de datos disponibles muestran una gran variabilidad para un mismo periodo de retorno (ver Figura 6-6) con valores conservadores para DOP, EEM (Explorador de Energías Marinas) y NOAA – CFSR. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 20 años las fuentes de datos indican que los valores de H_{m0} varían entre los 3.7 y 5.5 metros.

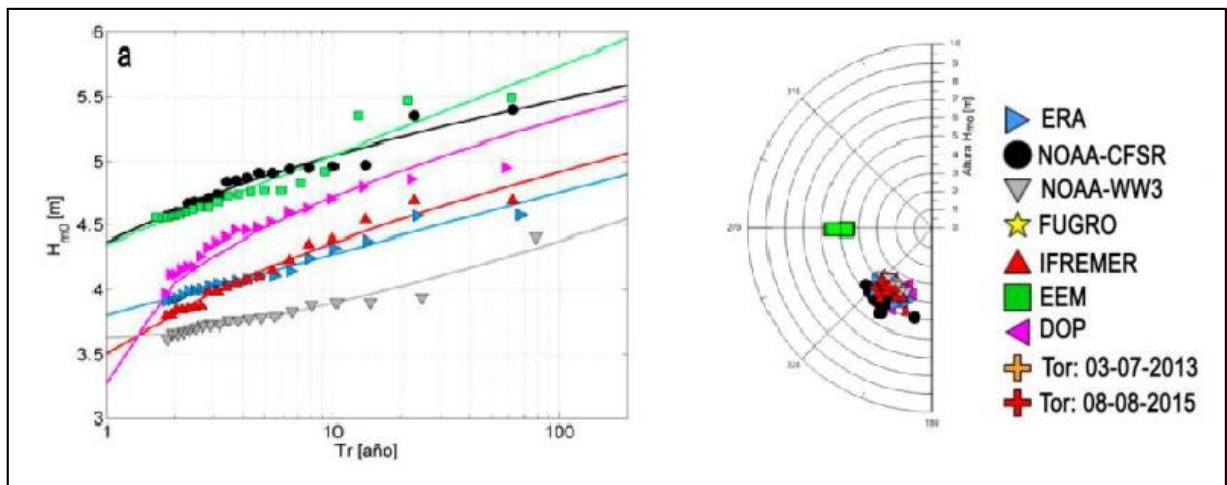


Figura 6-6: Curvas H_{m0} en aguas profundas y Tr XV Región de Arica y Parinacota.
Fuente: Beyá et al., (2017).

Dado lo anterior, se hace necesario generar nuevas metodologías asociadas al diseño de estructuras marítimas, específicamente defensas costeras, considerando que el oleaje de diseño no debe tener un horizonte muy alejado a la proyección de la vida útil de la obra y de la extensión de la data de oleaje utilizada. Para el presente estudio, se considera que el clima de oleaje extremo debe ser realizado en el sitio de interés (en donde fueron definidos los coeficientes de agitación y de dirección), con el fin de caracterizar la condición extrema en una zona cercana al área de influencia del proyecto.

Una de las metodologías más usadas, es la que propone Zhou Liu & Peter Frigaard (2001), la cual es detallada acabadamente en acápite 4.3 del presente documento. A continuación se explica la adaptación de la metodología antes citada para generar el clima de oleaje extremo de la presente proyecto.

6.4.1. SELECCIÓN DE EVENTOS EXTREMOS

La selección de eventos extremos se enfoca principalmente en identificar las tormentas más grandes durante la data de oleaje utilizada. Una de las metodologías de selección es considerar un umbral mínimo crítico, el cual discrimina que las alturas de ola superiores a él se estiman como eventos extremos. Este umbral generalmente es identificado mediante estudios de climas de oleaje en los sectores de proyecto o por la experiencia de profesionales que estudian estos eventos.

Otra alternativa de metodología de selección es simplemente identificar la altura de ola más grande para cada, la cual es la desarrollada en el presente proyecto.

6.4.2. IDENTIFICACIÓN DE DISTRIBUCIONES EXTREMAS CANDIDATAS

Las distribuciones estadísticas de oleajes extremos, utilizan los eventos seleccionados (tormentas) para extrapolar las alturas de olas para distintos periodos de retornos, los que comúnmente son para 5, 10, 25, 50 y 100 años. Con esta información es posible determinar empíricamente que altura de ola extrema se tendrá para el periodo de retorno de la

estructura proyectada. Claramente este factor viene determinado por la vida útil y criterios de uso, seguridad y diseño.

Las distribuciones estadísticas extremas que se proponen utilizar son Gumbel y Weibull, sin embargo existen otras que no serán utilizadas. Cada una posee sus propios parámetros de forma, los cuales se utilizan para calibrar las distribuciones, con el fin de generar bondades más ajustadas entre las alturas de olas extremas medidas y estimadas.

6.4.3. SELECCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ÓPTIMA

En esta etapa, se ponen a prueba las distintas distribuciones propuestas para la extrapolación de los datos. Los principales criterios de selección corresponden a las bondades que existen entre las alturas de olas extremas estimadas y las medidas. Dado esto es que se utiliza el error medio relativo y el índice de correlación lineal.

La distribución con índices de ajuste y bondad más cercanos a las mediciones será la más adecuada para utilizar en el estudio del clima de oleaje de diseño.

6.4.4. EXTRAPOLACIÓN DE VALORES EXTREMOS

La distribución escogida como óptima, es considerada nuevamente para generar la extrapolación de oleaje para cualquier periodo de retorno.

Cada distribución extrema posee constantes, las cuales son ajustadas con el fin de conseguir una mejor bondad con respecto a las mediciones. Estos valores llamados parámetros de forma, los cuales corresponden simplemente a la pendiente e intercepto de la ecuación de la recta (si es que las distribuciones son linealizadas), son usados para estimar empíricamente la altura de ola para cualquier periodo de retorno. A continuación, se presenta un ejemplo de una extrapolación de olas extremas mediante las distribuciones Weibull y Gumbel.

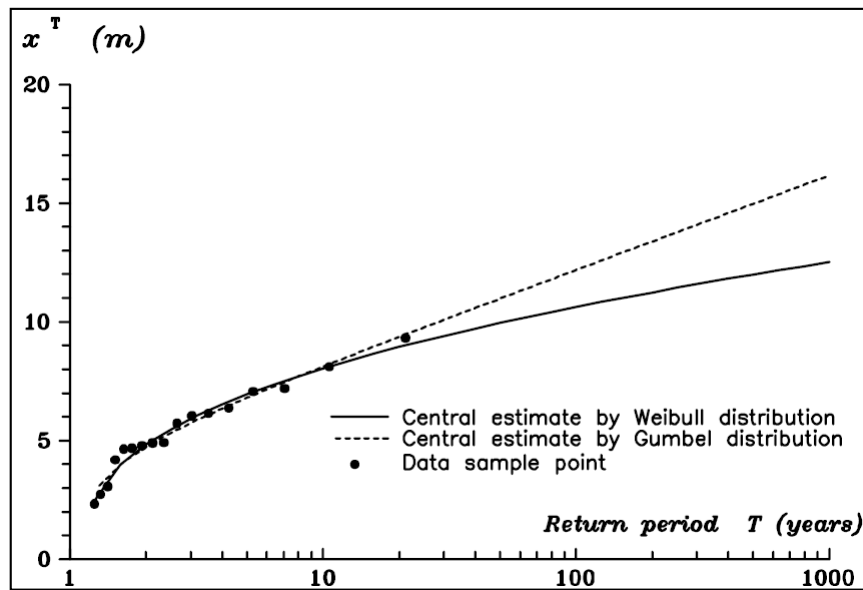


Figura 6-7: Ajuste de las distribuciones extremas para T periodo de retorno en años.
Fuente: (Zhou Liu, 2001).

Las distribuciones empleadas en la Figura 6-7 corresponden a Weibull y Gumbel, las cuales son contrastadas con las mediciones para los primeros 20 años. Durante este periodo de tiempo poseen un comportamiento similar, sin embargo, luego toman caminos distintos. Es por esto, que el escoger el periodo de retorno de la estructura debe ser un proceso crítico que no debe ser subestimado.

6.5. PROPUESTA DE LAYOUT

Las propuestas de layout para las escolleras de protección deben ser verificadas mediante análisis de agitación, utilizando modelos matemáticos o físicos. Sin embargo, el costo de utilizar un modelo físico es muy alto en comparación con el otro, es por esto que se propone utilizar modelos matemáticos. Los modelos numéricos que resuelven las ecuaciones de Boussinesq incorporan dentro de sus términos fuentes los fenómenos asociados a los cambios que sufren los frentes de oleaje cuando se aproximan hacia aguas someras como el asomeramiento, refracción, rotura del oleaje, reflexión, difracción, entre otros, permitiendo estimar los coeficientes de agitación dentro y fuera de las zonas de abrigo.

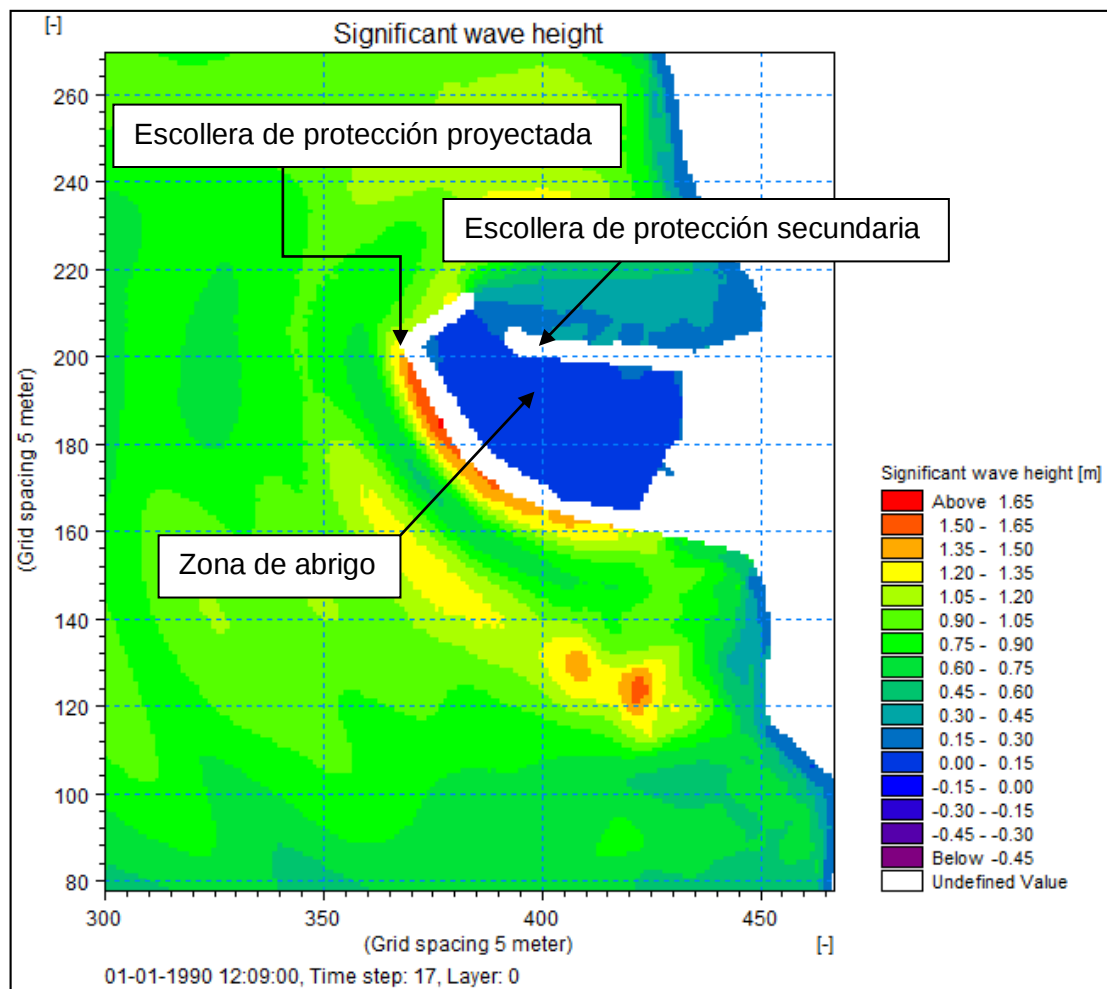


Figura 6-8: Ejemplo de agitación, dentro y fuera de la zona abrigada.

Fuente: Elaboración propia mediante MIKE ZERO.

Es fundamental aclarar, que la estructura a proyectar corresponde a la escollera de protección principal (ver Figura 6-8). La estructura de protección secundaria se asume proyectada.

6.5.1. ALTERNATIVAS DE LAYOUT ESTRUCTURA DE PROTECCIÓN

Para definir las alternativas de diseño de las obras de protección costera es necesario contar con un estudio de oleaje cercano al sitio proyectado. Es por lo anterior, que mediante los resultados obtenidos del clima de oleaje en el sitio definido como de interés (metodología propuesta en 6.3.2), se limita el oleaje más frecuente y el dominante, con lo cual se podrá caracterizar la zona para poder definir la disposición espacial y geométrica de las escolleras.

6.5.2. VERIFICACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Luego de generar las alternativas de diseño de la estructura de protección, estas son verificadas generando un clima de oleaje al interior de la zona protegida. Para lo anterior, es necesario poner a prueba el diseño mediante modelos numéricos que resuelvan las ecuaciones de Boussinesq, con el fin de estimar las condiciones medias de operación dentro de la dársena.

6.5.2.1. CASOS UNITARIOS A SIMULAR

Los casos a modelar utilizando el software MIKE 21 BW corresponden a frentes de oleaje unitario, los cuales son definidos mediante un análisis del clima de oleaje en el punto de interés. Estas modelaciones unitarias deben contener combinaciones de periodos y direcciones que representen (preferentemente) el total del clima de oleaje definido en el nodo de interés. Por tanto, las variables utilizadas (T_{peak} y D_{peak}) se discretizan en rangos, buscando disminuir los tiempos de cálculo y modelos de verificación.

Estos frentes de oleaje, o casos unitarios, deben ser propagados hacia la estructura de protección, con el fin de poner a prueba el diseño propuesto.

6.5.2.2. MODELACIÓN NUMÉRICA

La modelación numérica permite conocer las condiciones de oleaje dentro de dársenas y puertos. El modelo numérico propuesto es MIKE 21 *Boussinesq* (BW), generalmente estos modelos son forzados desde aguas intermedias hacia aguas poco profundas, dado esto, es necesario utilizar un dominio de cálculo apropiado para que la onda se desarrolle, el cual es aproximadamente entre 4 y 5 veces la longitud de la onda en el sector donde se desea forzar el modelo.

A continuación se propone el procedimiento para la confección de los modelos de *Boussinesq* (MIKE 21 BW), para ello, se adaptó el proceso presentado en el acápite 6.3.2 al uso del modelo en cuestión.

a. Pre proceso

En esta etapa se preparan todos los elementos necesarios para utilizar el modelo en cuestión, pudiendo así estimar el clima de oleaje dentro de la zona protegida por la defensa costera.

Definición del problema a resolver

Es de suma importancia tener claro el problema que se busca resolver. Es por esto que se hace necesario conocer los fenómenos claves a representar, tales como: el asomeramiento, la refracción, la difracción, la reflexión, la rotura del oleaje, etc., además de considerar el área donde estos fenómenos toman relevancia.

Lugar de implementación del modelo

Para llevar a cabo el modelo hay que considerar que región definir como dominio, teniendo en cuenta las extensiones necesarias para que los fenómenos se desarrollen y las limitaciones del modelo a utilizar. Es por esto que es primordial tener claro el problema que se debe resolver.

Condiciones de borde

- Condiciones de borde abiertas: Las fronteras abiertas están delimitadas por las masas de agua.
- Condiciones de borde cerradas: Estas fronteras corresponden a la zona que delimita la topografía con las masas de agua.

Ambas fronteras pueden ser forzadas mediante fenómenos que incluya el modelo para la resolución del problema. Los modelos generalmente son forzados con oleaje, viento, mareas, etc., por lo que es parte del pre proceso generar las forzantes.

Batimetría

Para desarrollar óptimamente el problema de propagación de oleaje, es importante contar con sondas batimétricas en todo el dominio definido. Es por esto que comúnmente se utilizan diversas fuentes de información batimétrica en conjunto.

- Cartas náuticas digitalizadas
- Mediciones topobatimétricas de terreno
- Modelos globales de información batimétrica

Cabe destacar que para el correcto desempeño del modelo, la información batimétrica debe estar relacionada bajo mismas condiciones de sistemas de referencia, planimétrico y altimétrico.

- El planimétrico, es el sistema de referencia que indica la posición de las sondas en el planeta. Comúnmente se utilizan coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y las coordenadas geográficas (en grados, minutos y segundos).
- El altimétrico, como su nombre lo dice, indica la altura con respecto a un sistema de referencia, el que suele utilizarse frecuentemente es el nivel de reducción de sondas.

Esta información batimétrica es utilizada en las mallas o grillas de cálculo, definidas por el tamaño del dominio.

Malla de cálculo

La grilla de cálculo se compone de muchos elementos, los cuales poseen nodos o vértices. Este proceso de elaboración de la malla, se realiza mediante sub-programas incorporados en las programaciones de los modelos. MIKE 21 BW utiliza el programa BATHYMETRIES que se encuentra dentro de la programación de MIKE ZERO, los cuales ofrecen distintas herramientas para editar las mallas, los elementos y las respectivas condiciones de bordes.

Las grillas con elementos más finos ofrecen mejor calidad de resultados, sin embargo el costo computacional de cálculo es muy mayor comparado al utilizar elementos mayores. El tamaño de los elementos viene absolutamente determinado por el nivel de detalle que requieren los modelos. El principal elemento discriminador de esto es el *número de Courant*, el que limita el paso del tiempo o time step y la resolución de los elementos en las direcciones principales horizontales (x e y).

El modelo que resuelve las ecuaciones de Boussinesq mediante el método de diferencias finitas, posee un mallado estructurado. Cada elemento tiene las mismas dimensiones en las dos componentes horizontales. Es por esto que el cálculo del *número de Courant* se define como:

$$Cr = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 6-9})$$

Δt: paso del tiempo o time step
Δx: resolución espacial en la dirección x
Cr: celeridad de la onda propagada

Por lo tanto, para aplicaciones numéricas en modelos en dos dimensiones, *Cr* debe ser menor o igual que uno, mientras que para modelaciones en una dimensión debe ser menor que 0,5.

El modelo MIKE 21 BW incorpora la herramienta *setup-planer*, en donde es posible verificar las dimensiones recomendadas de las mallas de cálculo.

b. Proceso

En esta etapa se utilizan las herramientas generadas en el pre proceso para resolver las ecuaciones del modelo mediante el método de diferencias finitas. A continuación se detallan los parámetros que deben ser especificados:

Paso del tiempo

El paso del tiempo, se desarrolla de acuerdo a lo especificado en el pre proceso, dado que depende del *número de Courant* y del espaciamiento de los elementos de la malla de cálculo.

Parámetros de la modelación

En esta parte del proceso se determina el cómo se realizará la modelación, bajo que esquemas y formulaciones (ofrecidas en la programación del modelo) se simplificará el problema, y el modo en que se extraerán los resultados. MIKE 21 BW, en sus manuales, detalla paso a paso el desarrollo de un problema tipo, en donde considera que los parámetros de calibración claves corresponden a:

- Fricción de fondo
- Parámetros de rotura de la ola

- Vientos
- Corrientes
- Porosidad
- Entre otros

Comúnmente, se extraen resultados en los lugares específicos donde se encuentran las mediciones de terreno y en todo el dominio, con el fin de revisar la correcta simulación del fenómeno.

c. Post proceso

En esta etapa, se revisan los resultados obtenidos, los cuales deben tener cierta relación con respecto a los fenómenos que se están representando. En los modelos de agitación, se revisan los sectores abrigados por las defensas costeras, analizando las alturas máximas de olas dentro de las dársenas. Para esto, es necesario examinar todos los casos modelados para encontrar los coeficientes de agitación máximos en la zona abrigada y determinar la mejor configuración de layout.

6.5.3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA ÓPTIMA DE LAYOUT

El criterio de selección de la alternativa de layout óptima depende de diversas variables. En puertos, zonas de estiba y desestiba, la agitación debe permitir tales actividades sin ofrecer dificultad. Se busca disminuir los accidentes, los tiempos de espera para ingresar a los puertos, disminuir los esfuerzos de atraque de las naves, entre otros factores. Por tanto el criterio de selección debe cumplir con los objetivos propuestos al diseñar una defensa costera para una caleta de pescadores. Dado lo anterior, es necesario contar con un clima de oleaje medio dentro de la zona protegida, el cual debe ser de largo plazo considerando recomendaciones para obras marítimas.

6.6. CLIMA DE OLEAJE EN ZONA EXPUESTA A LA ESTRUCTURA

Para caracterizar el clima de oleaje en la zona expuesta de la alternativa escogida, se propone verificar las siguientes dos metodologías.

- Metodología 1: Utilizar clima de oleaje medio, como objetivo se propone propagar más del 90% de los estados de mar hacia la estructura con el fin de determinar el oleaje medio en la estructura, utilizando los coeficientes de agitación generados una vez aplicada la metodología propuesta en el acápite 6.5.2.2
- Metodología 2: Utilizar el clima de oleaje extremo, para propagar la ola de diseño hacia la estructura, utilizando los coeficientes de agitación generados a partir de la metodología propuesta en el acápite 6.3.5.

Una vez realizada la caracterización del oleaje con ambas metodologías, es necesario identificar las alturas de olas de diseño en toda la zona expuesta de la estructura asociada al periodo de retorno calculado en base a lo propuesto en el acápite 6.1.

6.7. DISEÑO DE ALTERNATIVA DE LAYOUT

A continuación, se presentan todas las variables incorporadas en las bases de diseño. Algunos aspectos fundamentales corresponden a:

- Vida útil
- Probabilidad de excedencia
- Eventos extremos
- Periodo de retorno

Para el desarrollo del diseño se proponen elementos tipo roca, cubos de hormigón y cubípodos, los cuales deben ser sometidos a una matriz de decisión para su evaluación.

6.7.1. PERIODO DE RETORNO Y PROBABILIDAD DE ENCUENTRO

Zhou Lui & Peter Frigaard (2001), propone que para el cálculo del periodo de retorno se debe considerar lo siguiente.

X: altura significativa de la onda

x: realización de X

F(x): función de distribución de X, $F(x) = \text{Prob}(X \leq x)$, probabilidad de no excedencia

t: número de años de la muestra de X

n: número de observaciones en el periodo t

λ : intensidad de la muestra, $\lambda = n/t$

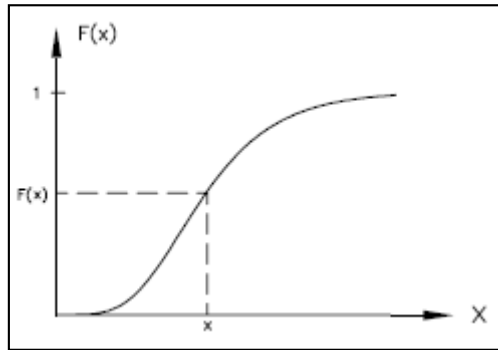


Figura 6-9: F(x) en función de X.

Fuente: (Zhou Liu, 2001).

La Figura 6-9 indica que mientras más extensa es la muestra, la probabilidad de no excedencia es mayor, por tanto se hace determinante que la data de oleaje a utilizar debe tener una extensión igual o mayor a la vida útil de la estructura.

Para el cálculo de la probabilidad de encuentro, o mejor dicho la probabilidad de excedencia de x para L años de vida útil de la estructura se define de la siguiente manera.

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^L \quad (\text{Ec. 6-10})$$

p: probabilidad de encuentro o de excedencia para *L* años de vida útil
T: periodo de retorno de la estructura
L: vida útil de la estructura

6.7.1.1. VIDA ÚTIL

Para la definición de la vida útil, es necesario proyectar el uso de la estructura a un horizonte de tiempo. La ROM 0.2-90, indica que para su cálculo es necesario considerar la posibilidad, facilidad y factibilidad económica de las reparaciones, además de la posibilidad y probabilidad de cambio en algunas de las circunstancias del respectivo uso de las instalaciones. En la tabla que se adjunta a continuación, se permite tener conciencia de la vida útil (en años) de las obras a proyectar, siempre bajo los criterios recomendados.

Tabla 6-2: Metodología de determinación de vida útil de obras marítimas.

TABLA 2.2.1.1. VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS O INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO (en años)			
TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50
LEYENDA: INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL: Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto. DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO: Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo,...). NIVEL 1: Obras e instalaciones de interés local o auxiliares. Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. (Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones,...). NIVEL 2: Obras e instalaciones de interés general. Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. (Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...). NIVEL 3: Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. (Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).			

Fuente: ROM 02-90 Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias (1990).

6.7.2. NIVELES DE DISEÑO

Los niveles mareas que se consideran en los diseños de estructuras marítimas costeras, deben contemplar condiciones extremas desfavorables. Es por esto que es absolutamente necesario involucrar la mayor cantidad de forzantes en esta variable.

- Marea astronómica.
- Marea meteorológica debido a la presión atmosférica, al viento, etc.

La marea astronómica, mediante el análisis no armónico propuesto en 6.2.2, indica los niveles de marea asociados a la serie de datos medidos (ver Figura 6-2). Dado esto, es que se hace necesario considerar los siguientes niveles.

- Altura media de la pleamar más alta.
- Altura de la pleamar más alta.
- Altura del nivel medio del mar.

El aumento o disminución del nivel del mar, por efecto de variables meteorológicas, debe ser considerado de acuerdo a la presión atmosférica (referida al nivel del mar) del sector. Para ello es necesario conocer las presiones anuales medias, recurriendo a los valores máximos, mínimos y medios dentro de la ventana de tiempo a utilizar. La Pub. SHOA 3009, ed. 2009, indica que un aumento de la presión normal se traduce en que el nivel de mar disminuya (buen tiempo), mientras que una disminución de la presión normal genera que el nivel del mar crezca (mal tiempo).

La tabla que se muestra a continuación, indica que el valor de presión normal es de 1013 [hPa]. En donde 1[hPa] equivale al aumento o disminución del nivel del mar en 1 [cm].

Tabla 6-3: Corrección del nivel del mar debido a la presión atmosférica local.

Tabla de correcciones para sumar o restar a las alturas de marea en función de la presión atmosférica		
PRESIÓN ATMOSFÉRICA		CORRECCIÓN
Hectopascales (hPa)	Milímetros de mercurio	
		m
963.....	722.....	+0,50
968.....	726.....	+0,45
973.....	730.....	+0,40
978.....	734.....	+0,35
983.....	738.....	+0,30
988.....	741.....	+0,25
993.....	745.....	+0,20
998.....	749.....	+0,15
1003.....	752.....	+0,10
1008.....	756.....	+0,05
1013.....	760.....	0,00
1018.....	764.....	-0,05
1023.....	768.....	-0,10
1028.....	771.....	-0,15
1033.....	775.....	-0,20
1038.....	779.....	-0,25

Fuente: (SHOA, 2009).

El nivel del mar puede además verse modificado por el efecto friccional del viento sobre la superficie marina. Para esto, es necesario considerar las longitudes necesarias para que el viento desarrolle variación en el nivel del mar, la cantidad de tiempo que debe estar soplando sobre la superficie y la intensidad con que lo hace.

6.7.3. DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico corresponde principalmente a la definición de las características geométricas de la estructura de protección a proyectar como por ejemplo la pendiente estimada del talud, la cota de coronación, forma de la berma, pie del talud, etc. Dado lo anterior es que se recurre a manuales tales como el Coastal Engineering Manual, EurOtopII, Recomendaciones de Obras Marítimas, entre otros, los cuales mediante a experimentos y representaciones empíricas entregan criterios y parámetros de ajuste a cada una de las necesidades de la obra.

6.7.4. DISEÑO ESTRUCTURAL

Dada las condiciones de diseño antes evaluadas se propone la verificación del diseño de estabilidad utilizando tres alternativas de elementos para la coraza: i) rocas, ii) cubos de hormigón y iii) cubípodos¹⁴. Para lo anterior, es muy importante conocer el funcionamiento que tendrá la estructura en su estado de operación, con el fin de conocer los riesgos asociados para condicionar el diseño en cuanto a los coronamientos, bermas, pendientes del talud, etc.

6.7.4.1. ELEMENTO TIPO ROCAS

Para el cálculo de la estabilidad de los elementos tipo rocas se propone utilizar la formulación de Van der Meer (1998) para oleaje en aguas poco profundas o de Van Gent **et al.**, 2004, dado que incluyen dentro de sus términos la utilización del periodo de la onda, con el fin de acotar la incertidumbre, ecuaciones que se presentan en el acápite 4.4.2 del presente documento.

6.7.4.2. ELEMENTO TIPO CUBOS DE HORMIGÓN

Para la verificación de la estabilidad de los elementos tipo cubos de hormigón, con las condiciones y solicitaciones de diseño preestablecidas, se propone el uso de la formulación de Van der Meer 1988b, la cual se expone en el acápite 4.4.2 del presente documento.

6.7.4.3. ELEMENTO TIPO CUBÍPODOS

Para la verificación de la estabilidad de los elementos tipo cubípodos, con las condiciones y solicitaciones de diseño definidas con anterioridad, se propone el uso de la formulación de Hudson (1974), la cual es utilizada por el fabricante de los cubípodos aplicando los coeficientes de estabilidad que propone Medina **et al.**, 2016, en la Tabla 4-1 del presente documento.

Para la verificación de la estabilidad de los elementos tipo cubípodos, con las condiciones y solicitaciones de diseño definidas con anterioridad, se propone el uso de la formulación de Hudson (1974), la que a su vez es recomendada por Medina **et al.**, 2016.

$$W = \frac{1}{K_D} * \frac{H^3}{\left(\frac{W_r}{W_w} - 1\right)} * \frac{W_r}{Cot \propto} \quad (\text{Ec. 6-11})$$

W: masa del elemento

K_D: coeficiente de estabilidad

W_r: peso específico de la roca (en este caso Hormigón)

W_w: peso específico del agua

Cot ∝: pendiente de la estructura proyectada

¹⁴ Web link cubípodos para mayor información: <http://www.cubipod.com/disenno/disenno-de-diques-en-talud/>

7. RESULTADOS

En el presente acápite, se explica y detallan cada uno de las variables mencionadas en la metodología, de manera aplicada.

7.1. BASES DE DISEÑO

Para determinar el periodo de retorno de una obra, específicamente de protección costera, es necesario recurrir a normativas y/o recomendaciones. Dado esto, se dispuso a utilizar principalmente la publicación de Zhou Lui & Peter Frigaard (2001) y Recomendaciones para Obras Marítimas (en adelante ROM), específicamente en el cálculo de la vida útil de la estructura.

Tabla 7-1: Vida útil para estructuras marítimas.

TABLA 2.1 . VIDAS UTILES MINIMAS PARA AREAS DE NAVEGACION O FLOTACION DE CARACTER DEFINITIVO (en años)			
TIPO DE OBRA	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Infraestructura de carácter general	25 (15)	50 (25)	100 (40)
De carácter industrial específico	15 (10)	25 (15)	50 (25)
NOTA: Las cifras indicadas entre paréntesis podrán utilizarse cuando se mantengan reservas de espacio en planta y alzado que no constituyan limitaciones físicas prácticamente inalterables, entendiendo por tales las que obliguen a demoler las estructuras que delimiten sus contornos.			

Fuente: ROM 3.1-99, Recomendaciones para Obras marítimas: Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación.

Tabla 7-2: ERI, SERI y vida útil mínima para diferentes tipos de zonas protegidas.

TYPE OF SHELTERED OR PROTECTED AREA			ERI ⁷		MINIMUM USEFUL LIFE (L_m) ⁷ (years)
HARBOR AREAS	COMMERCIAL PORT	All vessel types	r_3	High	50
		Specific vessel types	$r_2(r_3)^1$	Medium (high) ¹	25 (50) ¹
	FISHING PORT		r_2	Medium	25
	MARINA		r_2	Medium	25
	INDUSTRIAL PORT		$r_2(r_3)^1$	Medium (High) ¹	25 (50) ¹
	NAVAL PORT		$r_2(r_3)^2$	Medium (High) ²	25 (50) ²
	PROTECTION OF FILL MATERIAL OR SHORELINE		$r_2(r_3)^3$	Medium (High) ³	25 (50) ³
	DEFENSE AGAINST EXTREME FLOOD EVENTS ⁴		r_3	High	50
	PROTECTION OF WATER INTAKE OR DISCHARGE STRUCTURE		$r_2(r_3)^5$	Medium (High) ⁵	25 (50) ⁵
COASTAL AREAS	SHORELINE PROTECTION AND DEFENSE		$r_1(r_3)^6$	Low (High) ⁵	15 (50) ⁷
	BEACH DEFENSE AND NOURISHMENT		r_1	Low	15

¹ The ERI increases to r_3 when shipping is related to energy supply or to raw minerals with strategic value, and when there are no alternative installations available for their handling and storage.

² The ERI increases to r_3 when the naval port is crucial for national defense.

³ For structures that protect fill material or the shoreline, the ERI is the same as that of the harbor area where they are located.

⁴ Breakwaters that offer protection against extreme flood events are those which in the event of a failure can cause important flood damage in the surrounding area.

⁵ The ERI increases to r_3 when the point where water is drawn off or drained is associated with the urban water supply or with energy production.

⁶ The ERI increases to r_2 when there are factory buildings or industrial installations in the same area.

⁷ The indexes lower than r_3 on the table increase in one degree for each 30 M€ of the initial investment cost of the construction

Fuente: ROM 1.0-09, Recommendations for the Project Design and Construction of Breakwaters (Part I: Calculation and Project Factors. Climate Agents).

La Tabla 7-1 muestra criterios para seleccionar la vida útil de cualquier proyecto de índole marítima de navegación o flotación de carácter definitivo. Del mismo modo, en la Tabla 7-2 se presentan directrices para identificar la vida útil para proyectos definidos en zonas costeras como rompeolas o áreas costeras, donde es posible observar que un Puerto Pesquero posee un ERI medio estimando una vida útil mínima de 25 años.

Dado lo anterior, **la vida útil se estima de 25 años**, considerando que no se trata de estructuras que no constituyen limitaciones físicas inalterables que obliguen a modificar estructuras cercanas a su entorno.

Utilizando la expresión de la expresión de la Ec. 6-10, se puede llegar a lo siguiente.

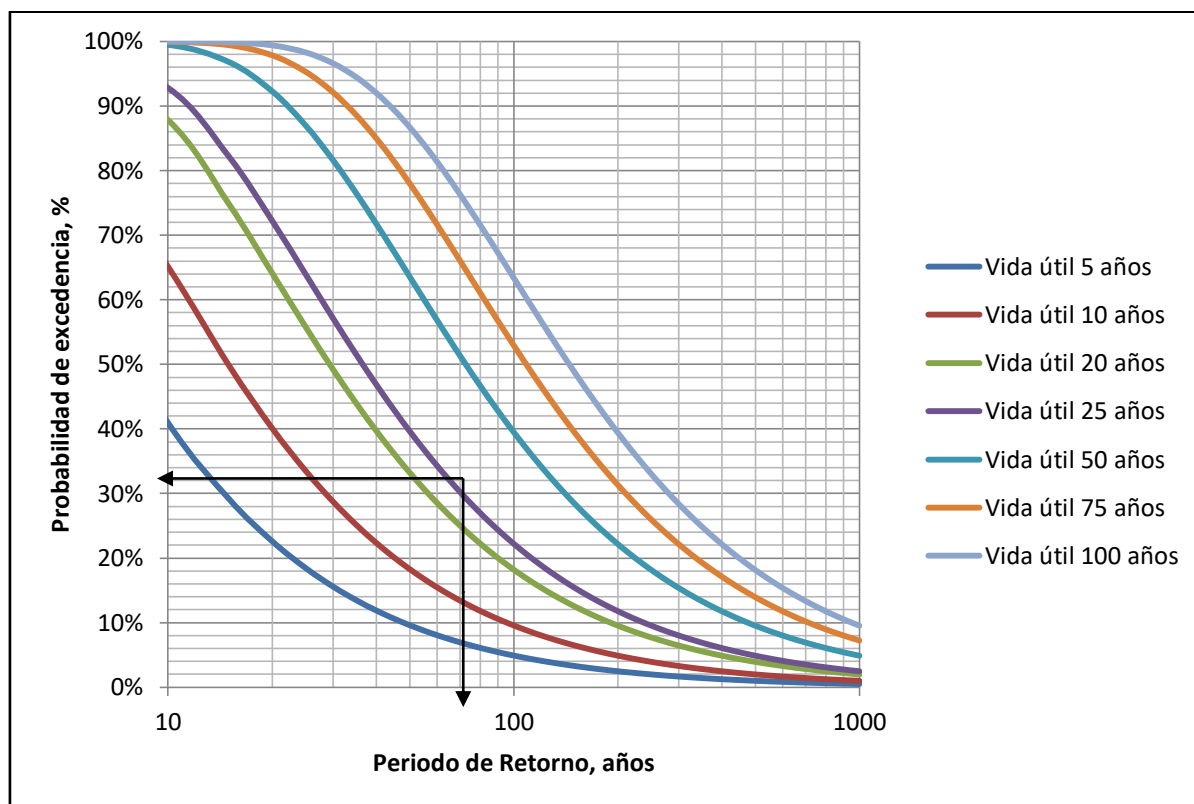


Figura 7-1: Excedencia para n periodos de retorno en función de la vida útil.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7-1 indica la probabilidad que existe que los eventos sean excedidos para periodos de retorno entre los 10 y 1000 años (en escala logarítmica base 10). Mientras más alto es el horizonte de la vida útil, mayor es la probabilidad de que los fenómenos estudiados (en este caso las olas extremas) sean sobrepasados.

En la siguiente tabla es posible caracterizar el riesgo asociado a la actividad de la obra de protección en su etapa de operación. El primer criterio aplicado es considerar que la estructura tendrá fallas que serán reparables, adoptando la letra a) de la Tabla 7-3 correspondiente a "Riesgo de iniciación de averías. Otro punto a estimar es que en caso de rotura o falla de la estructura no se considera un riesgo de pérdida de vidas humanas, por lo que la repercusión económica que se considerará es media, obteniendo así un riesgo del 30%.

Tabla 7-3: Riesgos máximos admisibles para determinación de periodo de retorno.

TABLA 3.2.3.1.2. RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES PARA LA DETERMINACIÓN, A PARTIR DE DATOS ESTADÍSTICOS, DE VALORES CARACTERÍSTICOS DE CARGAS VARIABLES PARA FASE DE SERVICIO Y CONDICIONES EXTREMAS			
<u>a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS</u>			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA. Índice : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
	ALTA	0,25	0,15
<u>b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL</u>			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA. Índice r : $\frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
	BAJA	0,20	0,15
	MEDIA	0,15	0,10
	ALTA	0,10	0,05
Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente. Para obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación se adoptará el riesgo de destrucción total. Para obras flexibles, semirrígidas o de rotura en general reparable (daños menores que un nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de averías. En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptado como de destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.			
LEYENDA: ■ POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS — Reducida: Cuando no es esperable que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños. — Esperable: Cuando es previsible que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños. ■ REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA Índice r = $\frac{\text{Coste de pérdidas directas e indirectas}}{\text{Inversión}}$ — BAJA: $r \leq 5$ — MEDIA: $5 < r \leq 20$ — ALTA: $r > 20$			

Fuente: ROM 0.2-990, Recomendaciones para Obras marítimas: Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias.

Por tanto, para una **vida útil de 25 años** y una **probabilidad de que los eventos sean excedidos en un 30% (riesgo)** se obtiene un **periodo de retorno de 70 años** (ver Figura 7-1).

7.2. ANÁLISIS DE DATOS

En el presente acápite se muestran los resultados del análisis estadístico de los datos de campo como oleaje de zona poco profunda y mareas, incluyendo los datos de oleaje de aguas profundas extraídos del modelo global Wavewatch III.

7.2.1. OLEAJE MEDIDO EN TERRENO

Los datos de oleaje medidos en terreno fueron sometidos a un análisis estadístico utilizando tablas de incidencia y rosas del oleaje, los cuales se presentan a continuación.

En las siguientes tablas (Tabla 7-4 Tabla 7-5 Tabla 7-6) se presentan los resultados de la distribución de frecuencias entre la altura significativa, el periodo peak y las direcciones.

La distribución de alturas de olas más frecuentes se encuentran en el rango de los 0,5 a 2[m], correspondiendo a un 96% del total de la muestra. En cuanto a la altura más frecuente, esta se presenta entre los 1 y 1,5[m] con al menos un 60% del tiempo. Por otro lado, el 95% de los periodos observados se concentran entre los 10 y los 18[s], en donde el rango con mayor ocurrencia se ubica entre los 12 y 14[s] siendo casi el 35% del total de los datos observados. En la siguiente tabla se presentan los resultados de la distribución de frecuencias entre la altura significativa y el periodo peak.

Tabla 7-4: Distribución de Hs y Tp medición de terreno.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	0- 2	2- 4	4- 6	6- 8	8- 10	10- 12	12- 14	14- 16	16- 18	18- 20	20 +		
0- 0,5											0	0,00	100,00
0,5- 1				1	2	28	29	14	3	2	79	26,96	100,00
1- 1,5				1	2	34	62	54	15	4	174	59,39	73,04
1,5- 2						1	10	13	5		29	9,90	13,65
2- 2,5								3	4		7	2,39	3,75
2,5 +									2	2	4	1,37	1,37
Total	0	0	0	2	4	63	101	84	29	8	293	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	0,00	0,68	1,37	21,50	34,47	28,67	9,90	2,73	0,68		
C(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	99,32	97,95	76,45	41,98	13,31	3,41	0,68		

Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de que las alturas de olas excedan los 2[m] es de un 5,12%, mientras que para los periodos sobre 18[s] la probabilidad de excedencia es del 3,4%.

La dirección de la ola incidente es claramente proveniente desde el tercer cuadrante, en donde el caso más frecuente corresponde a la dirección principal SW con el 67% del total del tiempo. Otra parte no menor proviene desde la dirección WSW con una frecuencia relativa del 32,7%.

Tabla 7-5: Distribución de Dp y Hs medición de terreno.

Dirección [°]	Altura Significativa [m]						Total	A(%)	C(%)
	0- 0,5	0,5- 1	1- 1,5	1,5- 2	2- 2,5	2,5 +			
N							0	0,00	100,00
NNE							0	0,00	100,00
NE							0	0,00	100,00
ENE							0	0,00	100,00
E							0	0,00	100,00
ESE							0	0,00	100,00
SE							0	0,00	100,00
SSE							0	0,00	100,00
S							0	0,00	100,00
SSW							0	0,00	100,00
SW		48	120	21	4	4	197	67,24	100,00
WSW		31	54	8	3		96	32,76	32,76
W							0	0,00	0,00
WNW							0	0,00	0,00
NW							0	0,00	0,00
NNW							0	0,00	0,00
Total	0	79	174	29	7	4	293	N° Datos	
A(%)	0,00	26,96	59,39	9,90	2,39	1,37			
C(%)	100,00	100,00	73,04	13,65	3,75	1,37			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-6: Distribución de Dp y Tp medición de terreno.

Dirección [°]	Periodo Peak [s]											Total	A(%)	C(%)
	0- 2	2- 4	4- 6	6- 8	8- 10	10- 12	12- 14	14- 16	16- 18	18- 20	20 +			
N												0	0,00	100,00
NNE												0	0,00	100,00
NE												0	0,00	100,00
ENE												0	0,00	100,00
E												0	0,00	100,00
ESE												0	0,00	100,00
SE												0	0,00	100,00
SSE												0	0,00	100,00
S												0	0,00	100,00
SSW												0	0,00	100,00
SW				2	4	56	54	55	18	6	2	197	67,24	100,00
WSW						7	47	29	11	2		96	32,76	32,76
W												0	0,00	0,00
WNW												0	0,00	0,00
NW												0	0,00	0,00
NNW												0	0,00	0,00
Total	0	0	0	2	4	63	101	84	29	8	2	293		
A(%)	0,00	0,00	0,00	0,68	1,37	21,50	34,47	28,67	9,90	2,73	0,68	Nº Datos		
C(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	99,32	97,95	76,45	41,98	13,31	3,41	0,68			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se analizan las respectivas rosas de oleaje en función de las direcciones, las alturas y los periodos (Ver Figura 7-2Figura 7-3)

Reafirmando, las direcciones principales SW y WSW abarcan el total de los datos medidos denotando la dominancia de la dirección proveniente del SW. La altura de ola más frecuente corresponde al rango de los 1 a 1,5[m], cercano al 60% del total de la muestra.

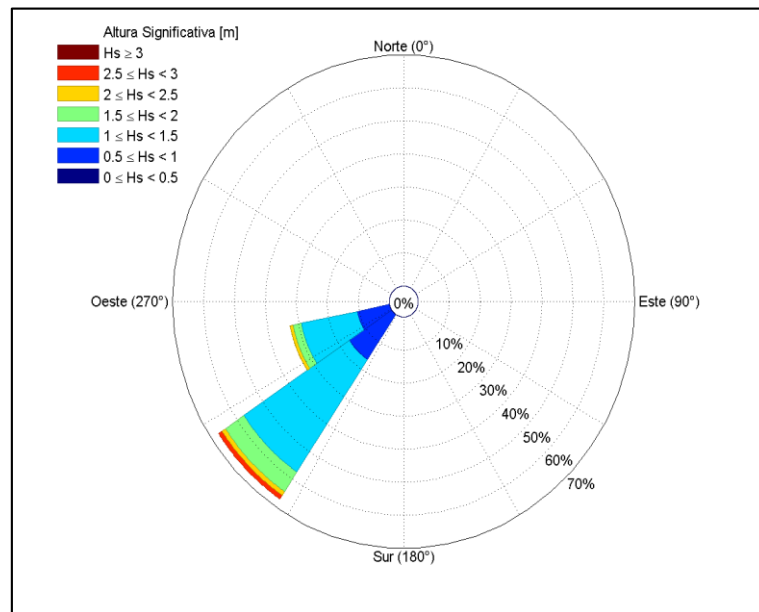


Figura 7-2: Rosa de oleaje en función de H_s mediciones de terreno.
Fuente: Elaboración propia.

Los periodos del oleaje, tienen una tendencia de mayor ocurrencia entre los 12 y 16[s] en donde claramente el rango con más frecuencia se encuentra entre los 12 y 14[s].

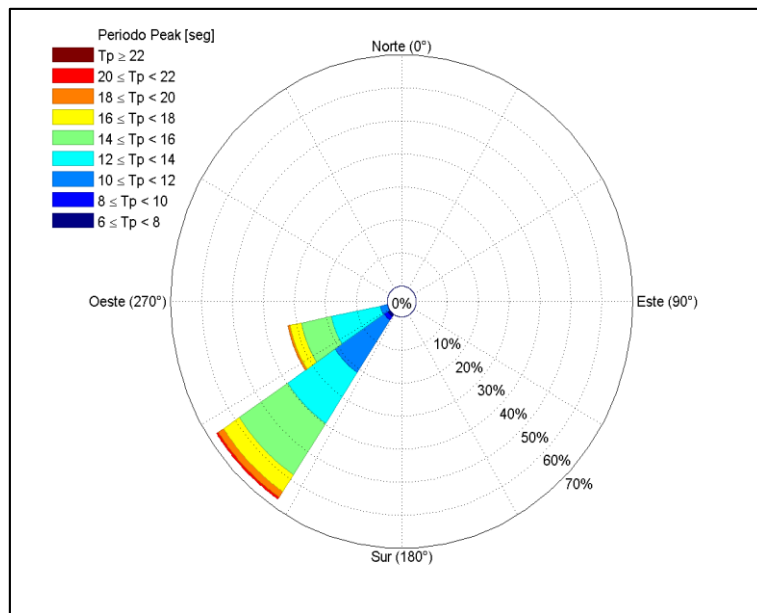


Figura 7-3: Rosa de oleaje en función de T_p mediciones de terreno.
Fuente: Elaboración propia.

SHOA (2005) indica que el oleaje se encuentra separado por dos componentes, la de tipo sea o mar de carácter local y la de tipo *swell* o mar de fondo. La primera se dice que abarcan periodos entre los 4 y 8[s] y la segunda desde los 10 a 25[s]. Si lo anterior es aplicado a los datos analizados anteriormente, se tiene que el 98% de los datos medidos se componen por mar de fondo y el restante por mar producido por fenómenos locales.

7.2.2. OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Los datos de oleaje de aguas profundas fueron sometidos a un análisis estadístico utilizando tablas de incidencia y rosas del oleaje, los cuales se presentan a continuación.

En las siguientes tablas (Tabla 7-7 Tabla 7-8 Tabla 7-9) se presentan los resultados de la distribución de frecuencias entre la altura significativa, el periodo peak y las direcciones.

La distribución de alturas de olas más frecuentes se encuentran en el rango de los 1,5 a 3[m] abarcando más del 84% del total de la muestra. Claramente el rango con mayor ocurrencia se ubica entre los 2 y 2,5[m] con el 36% del total de los datos. En cuanto a los periodos, el rango más frecuente se ubica entre los 12 y 14[s] con un 36% de la frecuencia relativa de los valores. En la siguiente tabla se presentan los resultados de la distribución de frecuencias entre la altura significativa y el periodo peak.

Tabla 7-7: Distribución de Hs y Tp datos NOAA.

Altura Significativa	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,5-1				7		1					8	0,01	100,00
1-1,5		31	161	999	944	620	264	83	26		3128	3,57	99,99
1,5-2	18	138	1078	6250	8425	5174	2434	606	172	2	24297	27,72	96,42
2-2,5		154	680	4597	13344	8260	3465	794	230	6	31530	35,97	68,71
2,5-3		67	194	1389	6453	7015	2385	480	98	6	18087	20,63	32,74
3-3,5		3	71	229	1776	3807	1330	238	40	2	7496	8,55	12,11
3,5-4			13	35	238	1219	758	117	16		2396	2,73	3,56
4-4,5			1	6	4	237	273	53	4		578	0,66	0,82
4,5-5						21	88	19			128	0,15	0,16
5-5,5							13	2			15	0,02	0,02
5,5+							1				1	0,00	0,00
Total	18	393	2198	13512	31184	26354	11011	2392	586	16	87664		
A(%)	0,02	0,45	2,51	15,41	35,57	30,06	12,56	2,73	0,67	0,02	N° Datos		
C(%)	100,00	99,98	99,53	97,02	81,61	46,04	15,98	3,42	0,69	0,02			

Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de excedencia de que las alturas de olas superen los 3[m] es del 12%, mientras para los periodos sobre 18[s] es de al menos el 3,42%. Bastante similar a la data de oleaje medida en terreno.

El oleaje incidente de los valores analizados se dividen en dos cuadrantes, el tercero y el cuarto. Claramente la predominancia es del tercero, siendo la dirección principal más frecuente la SW con un 54,7%. La dirección SSW es la segunda más frecuente representando el 33,6% del total de los 30 años de datos estudiados (Ver Tabla 7-8).

Tabla 7-8: Distribución de Dp y Hs datos NOAA.

Dirección [°]	Altura Significativa [m]											Total	A(%)	C(%)
	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5	5-5,5	5,5+			
N												0	0,00	100,00
NNE												0	0,00	100,00
NE												0	0,00	100,00
ENE												0	0,00	100,00
E												0	0,00	100,00
ESE												0	0,00	100,00
SE												0	0,00	100,00
SSE												0	0,00	100,00
S			3	1								4	0,00	100,00
SSW		573	6426	10470	7161	3394	1116	228	55	10		29433	33,57	100,00
SW	7	1544	13311	17273	10077	4011	1260	350	73	5	1	47912	54,65	66,42
WSW		384	1524	1387	455	60	13					3823	4,36	11,77
W		142	551	499	89	9						1290	1,47	7,41
WNW	1	453	2288	1802	305	22	7					4878	5,56	5,93
NW		32	194	98								324	0,37	0,37
NNW												0	0,00	0,00
Total	8	3128	24297	31530	18087	7496	2396	578	128	15	1	87664		
A(%)	0,01	3,57	27,72	35,97	20,63	8,55	2,73	0,66	0,15	0,02	0,00	N° Datos		
C(%)	100,00	99,99	96,42	68,71	32,74	12,11	3,56	0,82	0,16	0,02	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

Como se dijo anteriormente, el oleaje proviene de dos cuadrantes. Si son separados en sus respectivas sumas de frecuencia de ocurrencia, se tiene que el tercero corresponde al 92,6% y el cuarto al 7,4% restante.

En la Tabla 7-9 se presentan los resultados de la distribución de frecuencias entre la dirección y periodo peak del oleaje estudiado.

Tabla 7-9: Distribución de Dp y Tp datos NOAA.

Dirección [°]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
N											0	0,00	100,00
NNE											0	0,00	100,00
NE											0	0,00	100,00
ENE											0	0,00	100,00
E											0	0,00	100,00
ESE											0	0,00	100,00
SE											0	0,00	100,00
SSE											0	0,00	100,00
S	2	2									4	0,00	100,00
SSW	16	389	1991	6593	10062	7485	2418	418	60	1	29433	33,57	100,00
SW		2	203	6655	19746	14627	5231	1172	266	10	47912	54,65	66,42
WSW			4	264	1189	1737	577	52			3823	4,36	11,77
W					115	819	320	31	5		1290	1,47	7,41
WNW					72	1636	2290	648	227	5	4878	5,56	5,93
NW						50	175	71	28		324	0,37	0,37
NNW											0	0,00	0,00
Total	18	393	2198	13512	31184	26354	11011	2392	586	16	87664		
A(%)	0,02	0,45	2,51	15,41	35,57	30,06	12,56	2,73	0,67	0,02	N° Datos		
C(%)	100,00	99,98	99,53	97,02	81,61	46,04	15,98	3,42	0,69	0,02			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se analizan las respectivas rosas de oleaje en función de las direcciones, las alturas y los periodos (Ver Figura 7-4 Figura 7-5)

Reafirmando, las direcciones más frecuentes provienen del tercer cuadrante, SW y SSW, con una participación menor del cuarto cuadrante. La altura de ola más frecuente corresponde al rango de los 2 a 2,5[m], correspondiente al 35% del total de la muestra seguido de cerca por el rango de los 1,5 a 2[m].

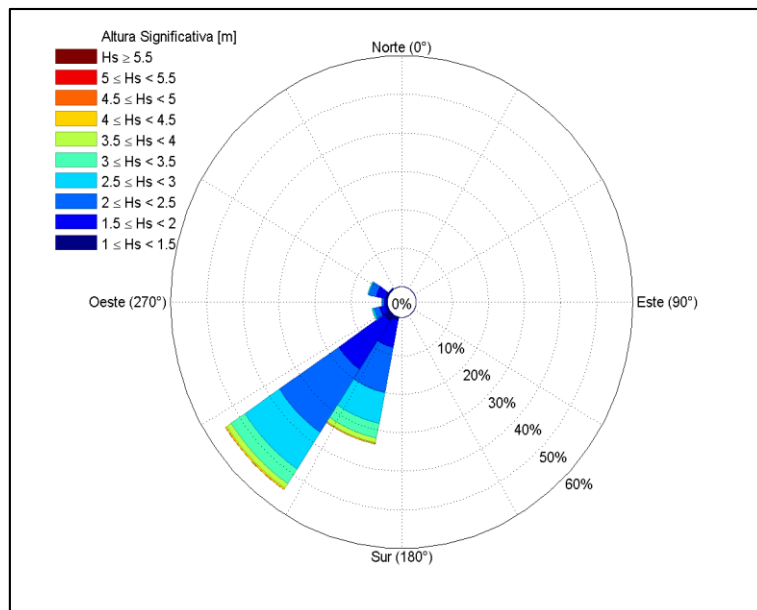


Figura 7-4: Rosa de oleaje en función de Hs datos modelo global.

Fuente: Elaboración propia.

Los periodos del oleaje tienen una tendencia de mayor ocurrencia entre los 12 y 16[s], donde claramente el rango con más frecuencia se encuentra entre los 12 y 14[s].

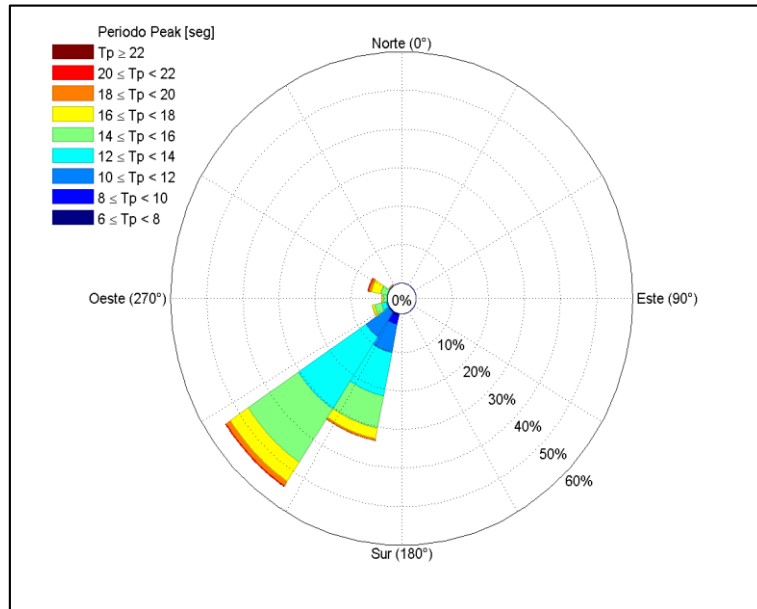


Figura 7-5: Rosa de oleaje en función de Tp datos modelo global.

Fuente: Elaboración propia.

SHOA (2005) indica que el oleaje se encuentra separado por dos componentes, la de tipo sea o mar de carácter local y la de tipo *swell* o mar de fondo. La primera se dice que abarcan periodos entre los 4 y 8[s] y la segunda desde los 10 a 25 [s]. Si lo anterior es aplicado a los datos analizados, se tiene que el 97% de los datos medidos se compone por mar de fondo y el restante por mar producido por fenómenos locales.

7.2.3. NIVEL DEL MAR

El análisis armónico de la marea fue realizado mediante la programación T_TIDE¹⁵ (ver acápite 6.2.2) en la interface MATLAB 2013a. Con lo anterior fue posible obtener las constituyentes armónicas de la marea necesarias para poder calcular el nivel de reducción de sondas, nivel medio del mar y la condición de marea local. Cabe mencionar, que la señal de marea utilizada se encuentra referida al cero del sensor de presión del ADCP. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Al comparar la serie pronosticada con la medida (ver Figura 7-6), es fácil notar que la amplitud de esta última es mayor, por lo que la serie pronosticada no alcanzó los máximos valores registrados por el ADCP. Por lo tanto, es posible que esta diferencia se deba a que las forzantes meteorológicas de la marea no se encuentran incluidas en este análisis, el cual se realiza en base a las variables astronómicas de la marea.

¹⁵Código abierto para realizar análisis armónico de series de tiempo, realizado por Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz (2002).

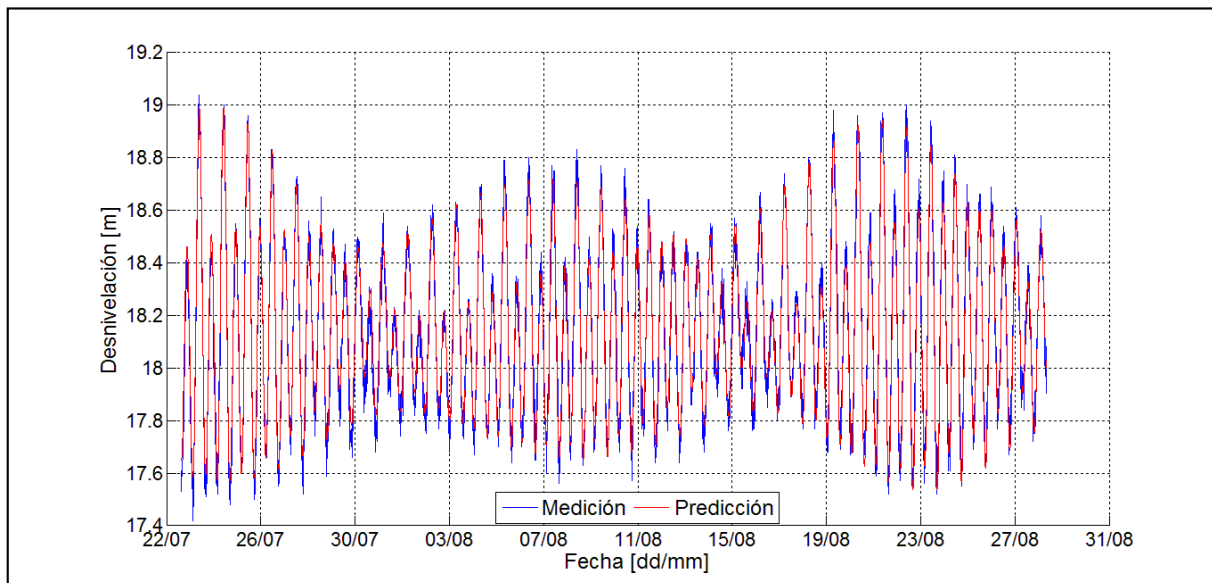


Figura 7-6: Comparación entre serie medida y pronosticada.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7-7 es posible observar residuos entre la desnivelación observada y la pronosticada, lo cual indica que existe un máximo valor de 0,22[m] sobre la media. Lo anterior podría estar asociado a eventos meteorológicos y locales del sector de estudio.

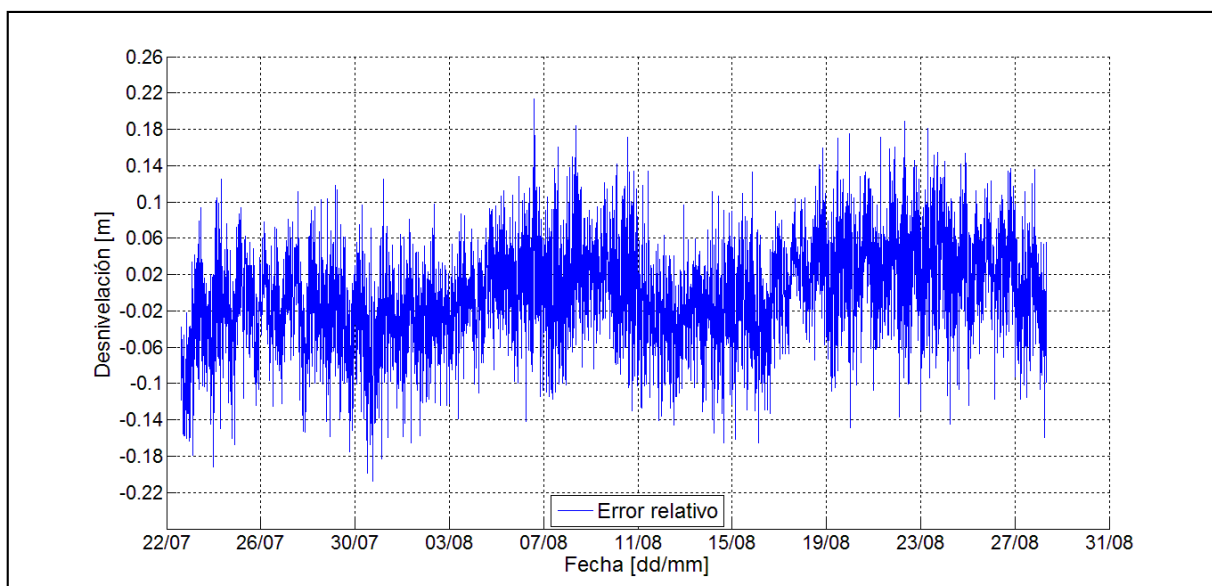


Figura 7-7: Residuos asociados a efectos meteorológicos.

Fuente: Elaboración propia.

La tendencia de los datos pronosticados poseen una pendiente cercana a la unidad (ver Figura 7-8). La correlación calculada indica que el ajuste es positivo con un valor del 97%, lo que indica que la bondad de la predicción es muy cercana a la medición.

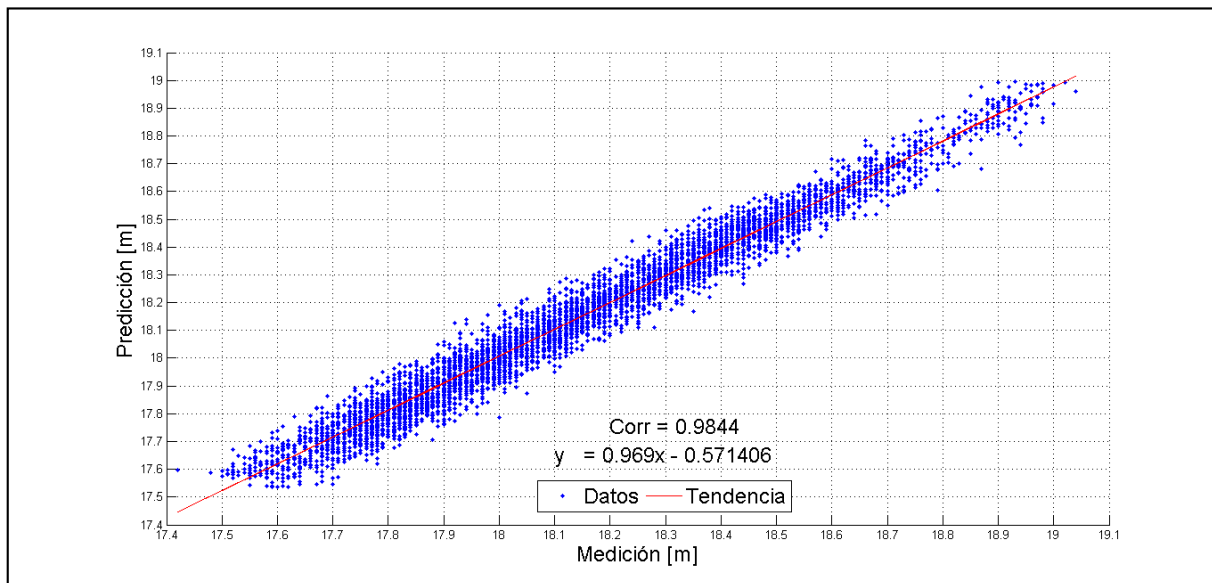


Figura 7-8: Regresión lineal entre serie medida y pronosticada.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se presentan las constituyentes armónicas calculadas.

Tabla 7-10: Constituyentes armónicas de la marea, cph=ciclos por hora.

N° orden	Constituyente	Frecuencia [cph]	Amplitud [m]	Fase [°]
1	*MM	0,0015122	0,0265	21,46
2	MSF	0,0028219	0,0211	14,48
3	ALP1	0,0343966	0,004	328,36
4	2Q1	0,0357064	0,003	117,72
5	*Q1	0,0372185	0,0171	254,87
6	*O1	0,0387307	0,0865	291,28
7	NO1	0,0402686	0,0037	212,31
8	*K1	0,0417807	0,1603	350,58
9	*J1	0,0432929	0,0108	28,86
10	OO1	0,0448308	0,0074	3,57
11	UPS1	0,046343	0,0044	351,78
12	*EPS2	0,0761773	0,0069	169,22
13	*MU2	0,0776895	0,0215	232,85
14	*N2	0,0789992	0,079	223,16
15	*M2	0,0805114	0,3506	267,93
16	*L2	0,0820236	0,0089	297,76
17	*S2	0,0833333	0,1261	298,72
18	ETA2	0,0850736	0,0011	326,31
19	*MO3	0,1192421	0,006	189,3
20	*M3	0,1207671	0,0083	52,38
21	MK3	0,1222921	0,0024	271,23
22	SK3	0,1251141	0,0025	172,34
23	MN4	0,1595106	0,0011	23,41
24	M4	0,1610228	0,0015	113,3
25	SN4	0,1623326	0,0012	236,99
26	MS4	0,1638447	0,0001	296,11
27	S4	0,1666667	0,0003	161,2
28	2MK5	0,2028035	0,0023	289,65
29	2SK5	0,2084474	0,0013	164,84
30	2MN6	0,2400221	0,001	256
31	M6	0,2415342	0,001	201,91
32	2MS6	0,2443561	0,0017	310,59
33	2SM6	0,2471781	0,001	320,33
34	3MK7	0,2833149	0,0008	116,58
35	M8	0,3220456	0,0009	104,26

Fuente: Elaboración propia.

El nivel medio del mar y el nivel de reducción de sondas, referidos al cero del sensor del ADCP, son de 18,1[m] y 17,367[m] respectivamente¹⁶. Además, el índice de Courtier calculado, es de 0,3721; lo que indica que el régimen de mareas del sector es de carácter mixto semidiurno.

¹⁶ Como antecedente se dispone del valor del nivel de reducción de Arica (Puerto Patrón) de 0,8[m], dispuesto en las tablas de predicciones de mareas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Nota: De la Tabla 7-10 las filas de color amarillo corresponden a las constituyentes necesarias para calcular el Nivel de Reducción de Sondas según lo indicado en la Pub. SHOA 3105, 2003, página 24.

Posterior al cálculo de las constituyentes, nivel medio del mar y de reducción de sondas (NRS), se procedió a referenciar la señal medida a este último nivel.

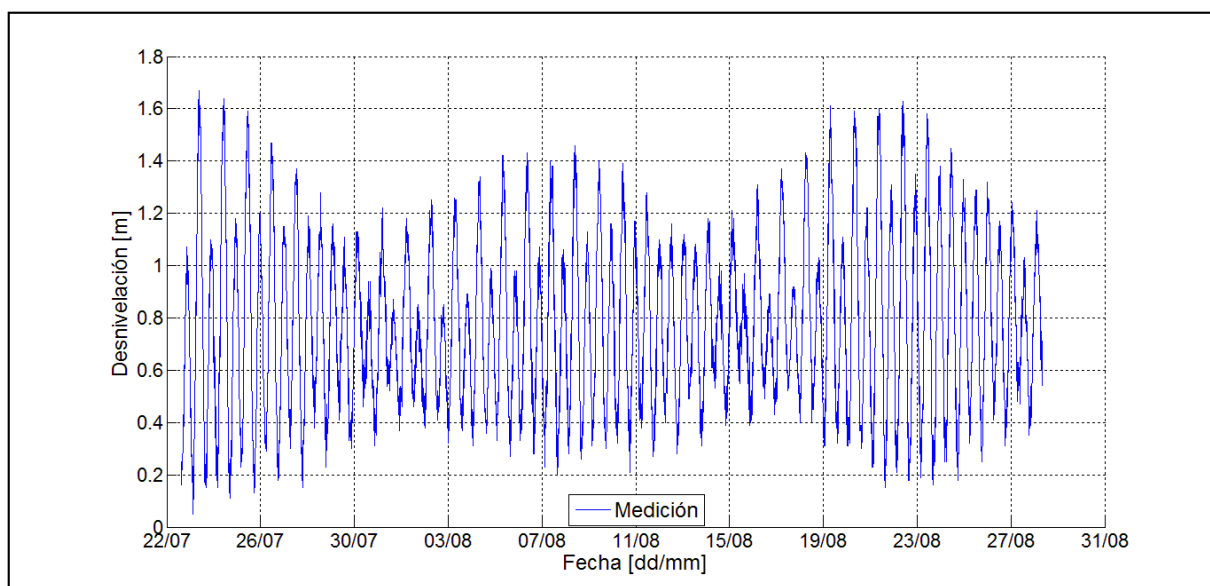


Figura 7-9: Señal de marea medida referida al nivel de reducción de sondas.

Fuente: Elaboración propia.

Referenciada la señal de marea al NRS (ver Figura 7-9), se procedió a calcular los planos mareales, los cuales son presentados en la tabla siguiente:

Tabla 7-11: Planos mareales referidos al NRS.

Planos de marea c/r NRS	Nivel [mNRS]
Nivel medio del mar	0,77
Altura media de la pleamar	1,23
Altura media de la bajamar	0,31
Altura media de la pleamar más alta	1,35
Altura media de la bajamar más baja	0,28
Altura de la pleamar más alta	1,67
Altura de la bajamar más baja	0,05

Fuente: Elaboración propia.

7.3. TRANSFERENCIA DE OLAJE HASTA SITIO DE INTERÉS

A continuación, se detallan los resultados que se obtuvieron mediante la aplicación de la metodología de transferencia de oleaje mediante el uso de parámetros resumen propuesta por Nicolau (2006). Esta modelación numérica se realizó utilizando datos de oleaje NOAA (modelo WAVEWATCH III) en la misma ventana de tiempo de los datos de oleaje medidos en terreno, propagándolos desde aguas profundas hacia aguas someras. El proceso mencionado anteriormente incluye el resultado de un proceso de calibración y ajuste de datos de aguas profundas con el fin de generar mayor bondad entre datos medidos con respecto a datos simulados, arreglo que es extrapolado hacia datos de *hindcasting* y de *reanálisis*.

7.3.1. ESTIMACIÓN DEL SITIO DE INTERÉS

El sitio de interés propuesto para la extracción de los coeficientes de agitación y cambio en la dirección de la onda se encuentra a una profundidad media de 18 metros con respecto a la lectura media del sensor de presión del ADCP. En la siguiente imagen se puede observar en detalle la zona de trabajo.



Figura 7-10: Ubicación nodo coeficientes de agitación y cambio en la dirección.

Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

En la siguiente tabla se encuentra la posición UTM WGS84 19 Sur del ADCP fondeado en el sector de estudio.

Tabla 7-12: Posición nodo de extracción de Coeficientes.

Ubicación	Coordenadas Este [m]	Coordenadas Norte [m]
Nodo de extracción	359.922,00	7.953.400,00

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. TRANSFERENCIA DE PARÁMETROS RESUMEN

7.3.2.1. PRE PROCESO

Definición del problema a resolver

Debido a que en el sector donde se realizó el estudio, y donde se ubica el sitio de interés, no presentan obstáculos que pudieran generar que los efectos de difracción deban ser considerados, se optó por utilizar el modelo numérico MIKE 21 SW. Este modelo utiliza la ecuación de la acción de la onda, la que resuelve mediante el método de volúmenes finitos centrales promediando la fase de la onda. Por lo cual, se estima como suficiente para simular la propagación desde aguas profundas hacia aguas menos profundas, incluyendo los efectos de la refracción y asomeramiento.

Lugar de implementación del modelo

Consideraciones del dominio del modelo.

- El modelo al ser de propagación desde una zona de aguas profundas necesita cumplir el criterio lineal $d/L > 0,5$ en las condiciones de borde que se encuentran en aguas abiertas.
- Además, desde el estudio de clima medio realizado mediante el análisis de datos NOAA modelo CFRS (30 años) fue posible observar que el total de los datos provienen de las direcciones SSW y NNW, por tanto el dominio debe ser capaz de representar la propagación del cuadrante antes mencionado.
- La extensión de la línea de costa debe ser la adecuada para evitar que lleguen efectos de sombras numéricas al sitio de interés. Además, es absolutamente necesario evitar ángulos agudos en estos sectores para que no se produzcan errores de convergencia numérica.

La siguiente figura caracteriza el tamaño necesario para la implementación del modelo de propagación, considerando condiciones de fronteras los trazos AB-BC-CD y la línea de costa. Claramente, una parte de los tramos AB-CD no se encuentran en aguas profundas, por lo que se delimitaron desde donde cumplen el criterio $d/L > 0,5$.

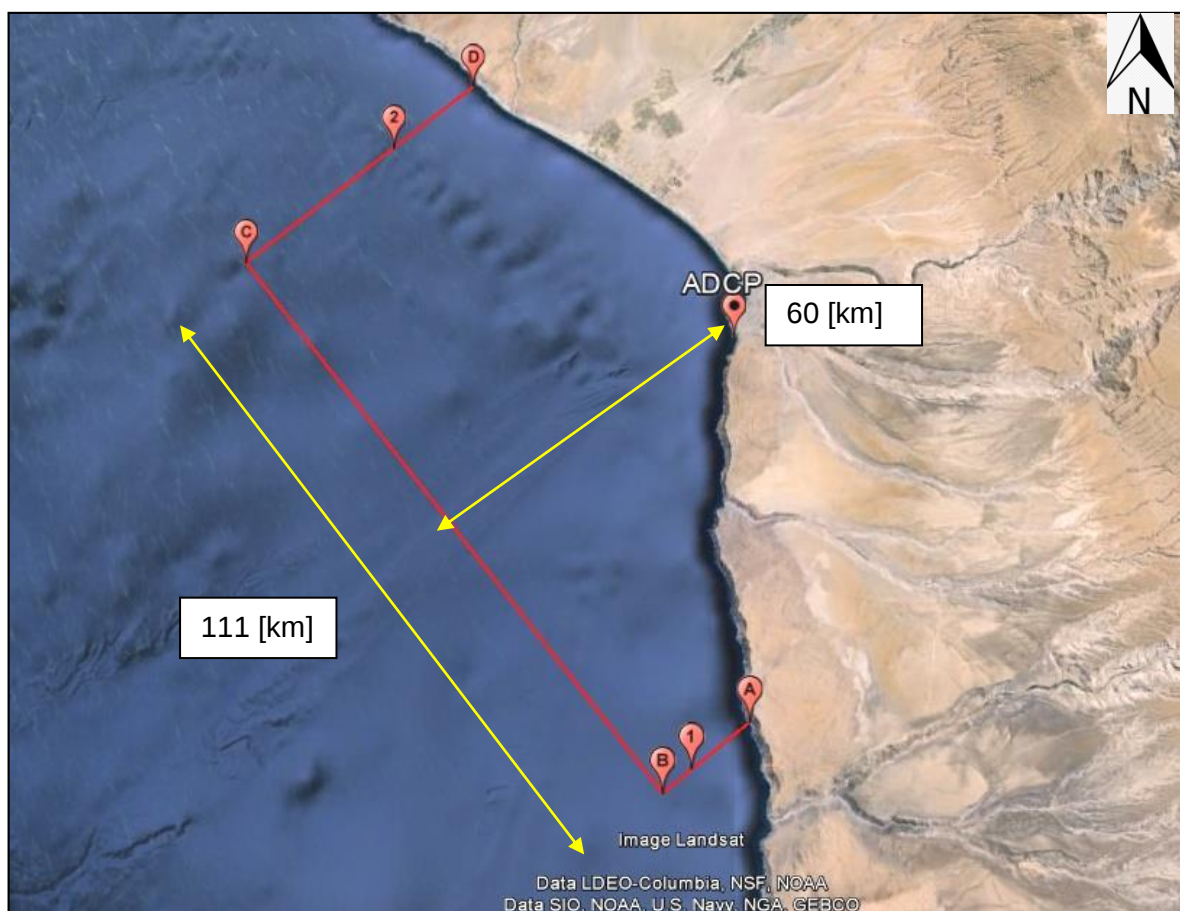


Figura 7-11: Consideraciones del dominio de implementación del modelo.
Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

Condiciones de borde

- Condiciones de borde cerradas: Se consideró que la línea de costa, en toda su extensión, será frontera cerrada. Además, los límites del modelo (en la zona mojada) que no cumplieron el criterio $d/L > 0,5$ fueron considerados bordes cerrados.
- Condiciones de borde abiertas: Se consideró que los límites del dominio (en la zona mojada) que cumplieron el criterio $d/L > 0,5$ se clasificaron como condiciones de borde abiertas. La cantidad de fronteras abiertas utilizadas son tres, las que permiten el uso de forzantes (oleaje) proveniente desde el SSW al NNW impidiendo además que se generen sombras numéricas importantes.

Los criterios antes mencionados fueron utilizados para establecer las fronteras del modelo, las cerradas corresponden a los trazos A1-D2 (ver Figura 7-11) y la línea de costa. Las condiciones de borde abiertas corresponden a los trazos 1B-BC y C2.

Las condiciones de borde abiertas fueron forzadas mediante estados de mar con intervalos de tres horas (modelo WAVEWATCH III NOAA), los cuales contienen parámetros resumen del oleaje (la altura significativa, el periodo peak y la dirección peak). La ventana de tiempo

de los datos forzantes utilizadas comprende desde el 22 de julio del año 2013 a las 15:00 hasta el 28 de agosto del año 2013 a las 08:00 (Ventana de tiempo idéntica a las mediciones de oleaje en el sitio de interés por el ADCP).

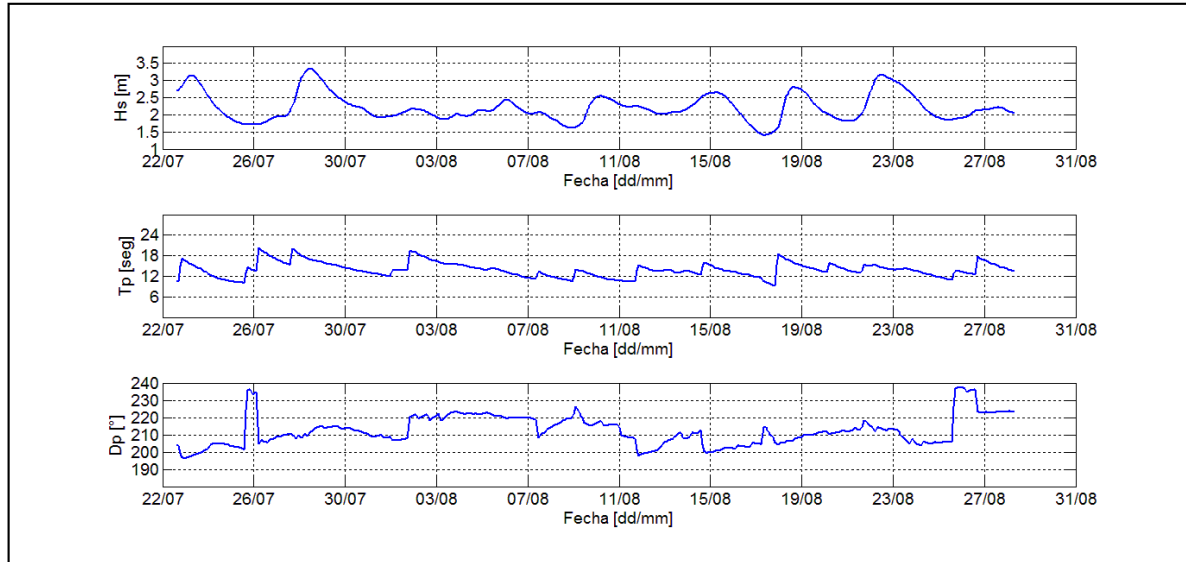


Figura 7-12: Forzantes utilizadas en modelo de transferencia de oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

En todo el dominio numérico se utilizó el nivel del mar, excluyendo el uso del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar.

Batimetría

La información batimétrica utilizada fue descrita anteriormente en el acápite 5.1, donde se detalla cada fuente como sigue a continuación.

- Información batimétrica proveniente de cartas náuticas:
Carta N°1000: Rada de Arica a Bahía de Mejillones lado Sur.
Carta N° 1100: Rada de Arica a Bahía de Iquique.
Carta N° 1111: Rada y puerto de Arica.
- Información batimétrica medida en terreno mediante levantamiento topobatimétrico.
- Información línea de costa, extraída desde imágenes satelitales provenientes de Google Earth Pro, previo proceso de georeferenciación.

Las tres fuentes de información batimétrica fueron georeferenciadas al mismo sistema planimétrico y altimétrico, UTM WGS84 19 Sur y al NRS.

Todas las fuentes fueron revisadas con el fin de determinar y suavizar pendientes muy drásticas en zonas cercanas al sitio de interés (aguas intermedias y aguas someras). Esto se realizó para evitar que la propagación se vea afectada por estos cambios bruscos en el fondo marino causando problemas de convergencia numérica.

Malla de cálculo

Para el desarrollo del modelo se utilizó una grilla de cálculo de 111[km] de largo por 60[km] de ancho (en sus lados más extensos). Los elementos poseen una transición en su tamaño desde 500 hasta 2.7×10^6 [m²]. Este cambio gradual se realizó para evitar que el error de los elementos mayores se traspasara a los más pequeños de manera drástica. Para el desarrollo de la grilla se utilizó la cantidad de 18.108 elementos en total.

La Tabla 7-13 muestra la transición del tamaño del área de los elementos, claramente los mayores son los cercanos a las condiciones de borde abiertas y los menores a las cerradas. Cabe destacar, que la posición del ADCP (en donde se encuentran las mediciones de oleaje) se ubica en la transición "T2".

Tabla 7-13: Área máxima de elementos dentro de cada transición.

Transición	Área máxima [m ²]
T1	500
T2	5.000
T3	30.000
T4	90.000
T5	270.000
T6	810.000
T7	2.700.000

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presentan el resultado de la malla de cálculo efectuada para el modelo de propagación de oleaje.

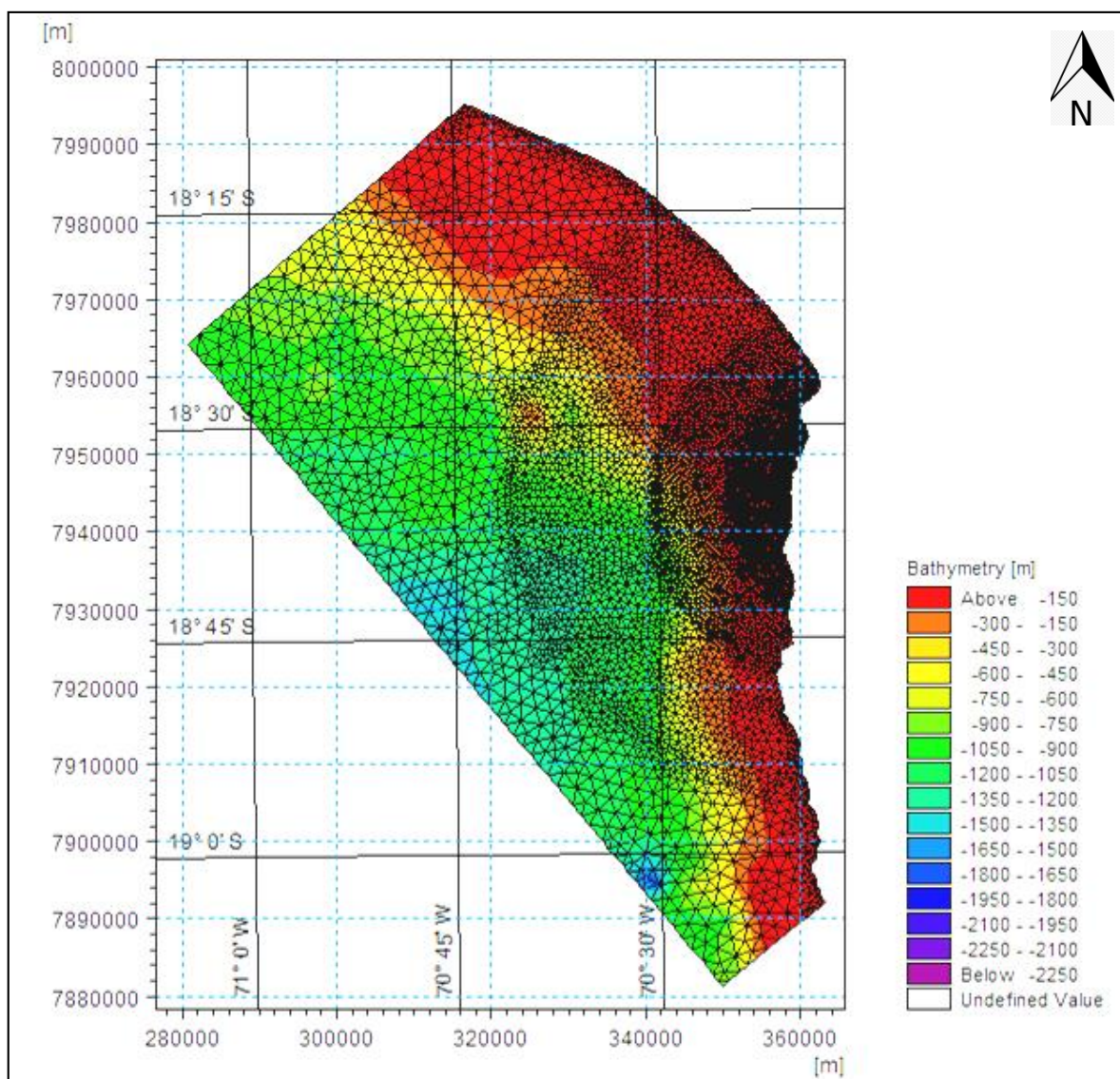


Figura 7-13: Malla batimétrica para modelo de transferencia de parámetros resumen.
Fuente: Elaboración propia mediante MIKE ZERO.

Las zonas cercanas a la línea de costa y específicamente cerca de la zona de interés poseen las menores resoluciones llegando a los 500 [m²], según indica la Tabla 7-13. La profundidad mayor de la grilla de cálculo es de 1.730 [mNRS].

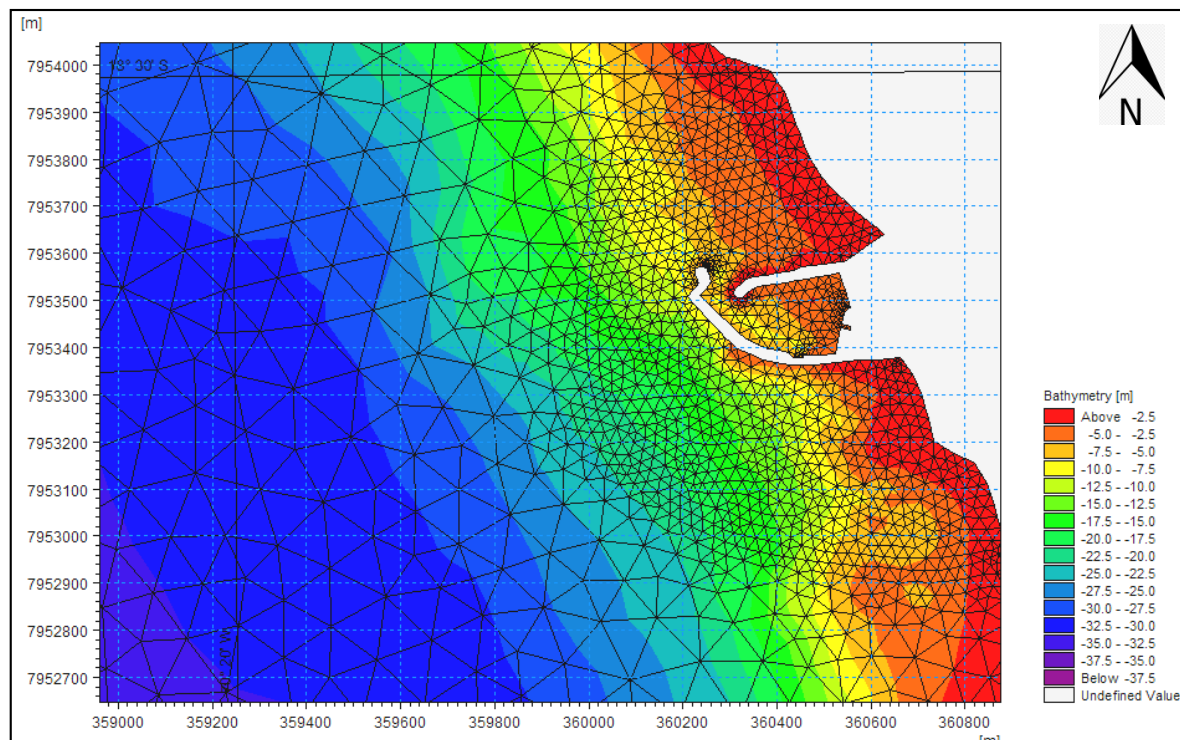


Figura 7-14: Malla batimétrica en detalle en zona de proyecto.

Fuente: Elaboración propia mediante MIKE ZERO.

7.3.2.2. PROCESO

Paso del tiempo

El modelo se programó para utilizar la formulación paramétrica direccional desacoplada cuasi estacionaria, debido a que se trabajó con parámetros de resumen (disponibles cada tres horas). Es por esto, que la técnica resolución en todo el dominio fue con el método de iteración Newton-Raphson. Esta técnica realiza constantes iteraciones para buscar la solución a las ecuaciones de gobierno. Solo se detiene cuando sobrepasa el máximo de iteraciones estipuladas (no converge) o cuando la tolerancia del error medio cuadrático normal del vector residual y la tolerancia normal del cambio máximo de la altura significativa de la ola es menor a las configuradas (1e-006 y 0,001[m] respectivamente).

Por tanto, el paso del tiempo utilizado fue de una hora, sin embargo se solicitaron datos de salida cada tres horas.

Las ecuaciones completamente espectrales y tiempos de formulación no estacionarios dependen de la estabilidad numérica del número de *Courant*. Esto limita el paso del tiempo y los tamaños de los elementos que se deban utilizar.

Parámetros de la modelación

El tipo de modelo utilizado promedia la fase de la ola mediante la ecuación de la acción, la cual es aplicada en dos dimensiones (horizontal x e y). Anteriormente, para explicar el por qué el método escogido para la resolución de las ecuaciones no considera el número de *Courant*, se nombraron las formulaciones que se utilizaron. Las cuales corresponden a la formulación espectral con un esquema parametrizado direccional desacoplado cuasi-estacionario, que resuelve la ecuación de la onda mediante la técnica de iteración de Newton-Raphson.

Dado que el esquema de formulación utilizado emplea como variable dependiente la discretización de las frecuencias, se dividió el espacio direccional completo en 32 direcciones principales.

Para la resolución mediante el método Newton-Raphson se utilizaron un máximo de 500 iteraciones, con una tolerancia para el error medio cuadrático (residual normal) máxima de $1e-006$, con una tolerancia de $0,001[m]$ para un cambio máximo en la altura significativa de la ola calculada.

Se utilizó la condición media del nivel de mar ($0,77[m]$ sobre NRS) en todo el dominio del modelo y para cada paso del tiempo.

La fricción de fondo utilizada, fue de $0,00025[m]$. Correspondiente al tamaño medio del grano de arena (Valor utilizado por defecto en configuración inicial del modelo).

Se consideró la utilización de espectros sintéticos del tipo Jonswap como condición inicial.

Los resultados del modelo se solicitaron de dos formas, de manera puntual y de todo el área mojada.

- Salida puntual, $360.342[m]$ al Este y $7.952.813[m]$ al Norte.
- Salida total área mojada del dominio de cálculo.

La salida puntual se obtuvo para compararla con la serie de datos medidos por el ADCP y así revisar la bondad del modelo versus la realidad. El área total mojada fue requerida para verificar los fenómenos que ocurren dentro del dominio.

Ambas salidas de resultados fueron configuradas para entregar la altura significativa, el periodo peak y dirección peak del oleaje para cada tres horas de simulación.

7.3.2.3. POST PROCESO

El post proceso es el procedimiento en el que se verifica la bondad de los datos medidos versus los simulados. El principal parámetro calibrador fue el mallado de cálculo, en donde se probaron distintas configuraciones de mallas de cálculo, diferenciadas por el tamaño de sus elementos y el tamaño del dominio. Cabe destacar que la grilla óptima se presenta en el pre proceso anteriormente definido (ver Figura 7-13). Es por esto que se optó por mejorar la bondad de los resultados incluyendo la metodología propuesta en el acápite 6.3.3.

A continuación, se presenta en detalle cómo se realizó el proceso de calibración alternativo.

a. Estimación de error entre valores medidos con respecto a los simulado

El error absoluto, obtenido desde la diferencia entre la situación simulada y la medida, es utilizado para modificar la data de oleaje de aguas profundas. La dirección de la onda se mantiene constante, vale decir que no se utiliza para modificar la data de oleaje en aguas profundas debido a que la ventana de tiempo de simulación no abarca el rango total de direcciones de la data de largo periodo (tercer y cuarto cuadrante). Solo se utilizan los errores sobre la altura significativa y sobre el periodo peak del oleaje.

Las alturas significativas de las olas fueron seleccionadas en rangos, al igual que el periodo peak. A continuación, en la siguiente tabla se presenta como fueron discretizadas las clases.

Tabla 7-14: Discretización de alturas significativas.

Clases	Hs [m]
Clase 1	<1
Clase 2	1 - 1,5
Clase 3	1,5 - 2
Clase 4	2 - 2,5
Clase 5	2,5 - 3
Clase 6	3 - 3,5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-15: Discretización de periodos peaks.

Clases	Tp [s]
Clase 1	<6
Clase 2	6 - 8
Clase 3	8 - 10
Clase 4	10 - 12
Clase 5	12 - 14
Clase 6	14 - 16
Clase 7	16 - 18
Clase 8	18 - 20
Clase 9	>20

Fuente: Elaboración propia.

Los criterios de selección de clases se concentran en abarcar los máximos y mínimos valores contenidos en la ventana de tiempo de datos medidos en terreno (alturas de olas y periodos de olas).

Por lo tanto, a cada clase de periodos y alturas de olas se le aplicaron las diferencias medias (error absoluto medio).

Tabla 7-16: Error absoluto medio por clases de periodos.

Clases	Tp [s]	Diferencia media
Clase 1	<6	0,000
Clase 2	6 - 8	0,000
Clase 3	8 - 10	0,000
Clase 4	10 - 12	1,910
Clase 5	12 - 14	0,822
Clase 6	14 - 16	1,524
Clase 7	16 - 18	-0,162
Clase 8	18 - 20	-0,925
Clase 9	>20	-0,455

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-17: Error absoluto medio por clases de alturas significativas.

Clases	Hs [m]	Diferencia media
Clase 1	<1	0,000
Clase 2	1 - 1,5	0,006
Clase 3	1,5 - 2	-0,019
Clase 4	2 - 2,5	-0,024
Clase 5	2,5 - 3	0,050
Clase 6	3 - 3,5	0,181

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que la elaboración de las diferencias medias para cada rango de clases es un proceso iterativo en donde los mejores resultados obtenidos se presentaron en las Tabla 7-16 y Tabla 7-17.

b. Ajuste de data NOAA en aguas profundas

Para ajustar la data NOAA fue necesario estimar un factor de ponderación por cada clase a cada una de las diferencias medias, la cual se obtuvo producto de un proceso iterativo comparando la serie medida con la simulada hasta superar un umbral y converger en un resultado. Cabe destacar, que el ajuste se le realizó a la data de oleaje en aguas profundas utilizada para forzar el modelo.

El proceso iterativo para el factor de ajuste se obtuvo cuando los valores de correlación de las alturas significativas y periodo peak del oleaje superaron el 50%. Dado a que no se modificaron las direcciones peak del oleaje, se estimó que el error absoluto dato a dato al comparar la dirección medida con la modelada no debió superar los ± 10 [°].

Por lo tanto, el mejor factor de ajuste para cada clase de alturas y periodos se presenta a continuación en las Tabla 7-18 y Tabla 7-19

Tabla 7-18: Factor de ajuste para las alturas de olas significativas por clase.

Clases	Hs [m]	Diferencia media	F. ponderación	Factor ajuste
Clase 1	<1	0,000	0,000	0,000
Clase 2	1 - 1,5	0,006	1,000	0,006
Clase 3	1,5 - 2	-0,019	1,200	-0,023
Clase 4	2 - 2,5	-0,024	1,500	-0,035
Clase 5	2,5 - 3	0,050	1,200	0,061
Clase 6	3 - 3,5	0,181	1,500	0,271

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-19: Factor de ajuste para los periodos peaks por clase.

Clases	Tp [s]	Diferencia media	F. ponderación	Factor ajuste
Clase 1	<6	0,000	0,000	0,000
Clase 2	6 - 8	0,000	0,000	0,000
Clase 3	8 - 10	0,000	0,000	0,000
Clase 4	10 - 12	1,910	0,500	0,955
Clase 5	12 - 14	0,822	0,500	0,411
Clase 6	14 - 16	1,524	0,500	0,762
Clase 7	16 - 18	-0,162	0,500	-0,081
Clase 8	18 - 20	-0,925	0,500	-0,463
Clase 9	>20	-0,455	0,500	-0,228

Fuente: Elaboración propia.

A cada dato de altura de ola y periodo peak que se encontró en cada una de las clases se le aplicó su respectivo factor de ajuste (Tabla 7-18 y Tabla 7-19). Con ello fue posible obtener los mejores resultados de correlación y error relativo medio, los cuales se presentan a continuación.

c. Resultados obtenidos

Las series medidas se compararon gráficamente mediante la superposición de los datos simulados. Además, se calcularon las bondades de los ajustes mediante regresiones lineales, errores absolutos y errores relativos medios.

En la Figura 7-15 se muestra la comparación entre las series de tiempo medidas y simuladas, cabe destacar que la ventana de calibración se estableció como el total de la extensión de los datos utilizados con el fin de verificar los resultados dato a dato (ventana de tiempo en la que el ADCP registró datos). La serie con mayor dispersión de datos es claramente la dirección peak del oleaje, en donde ciertamente la dirección modelada se ubica muy cercana al promedio de la data total (235[°] aproximadamente).

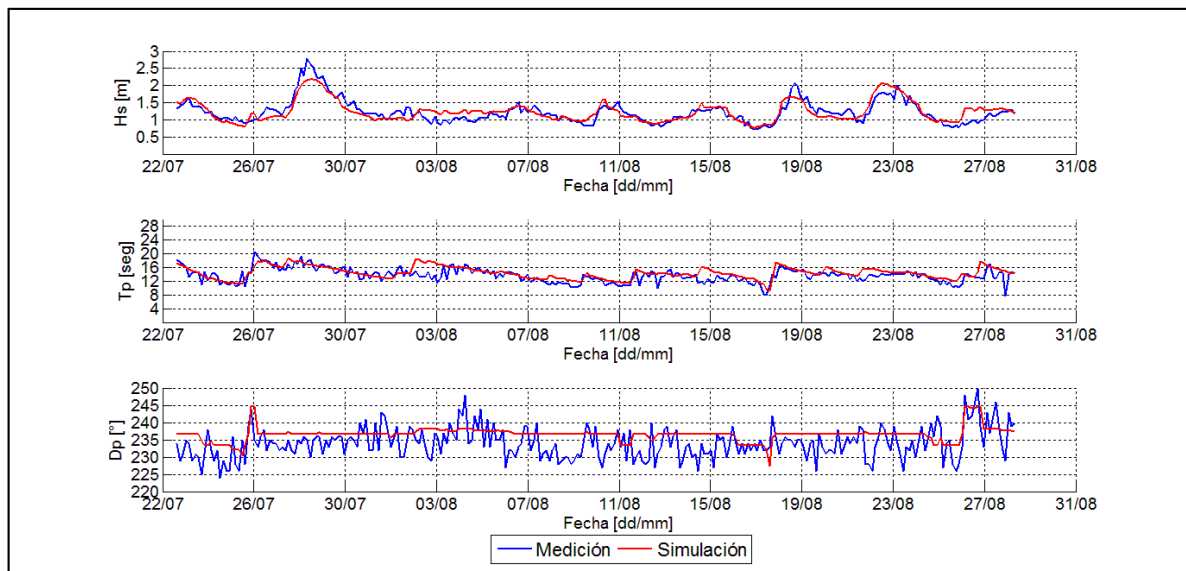


Figura 7-15: Comparación de series de tiempo, medidas versus simuladas.

Fuente: Elaboración propia.

Las series de los periodos peaks y las alturas significativas simuladas poseen mejor relación con respecto a las series medidas. El modelo no pudo reproducir los valores más altos de alturas de olas, esto puede deberse a que no se están considerando todos los mecanismos forzantes del oleaje, tales como el viento, presiones y condiciones locales, lo cual podría subestimar el clima de oleaje en el sitio del proyecto (alrededor del 10%) y en la interacción con la estructura.

El resultado de la regresión lineal obtenida para las alturas significativas del oleaje demuestra que la tendencia de los datos poseen una pendiente del 75%, con un índice de correlación cercano al 85% (ver siguiente figura).

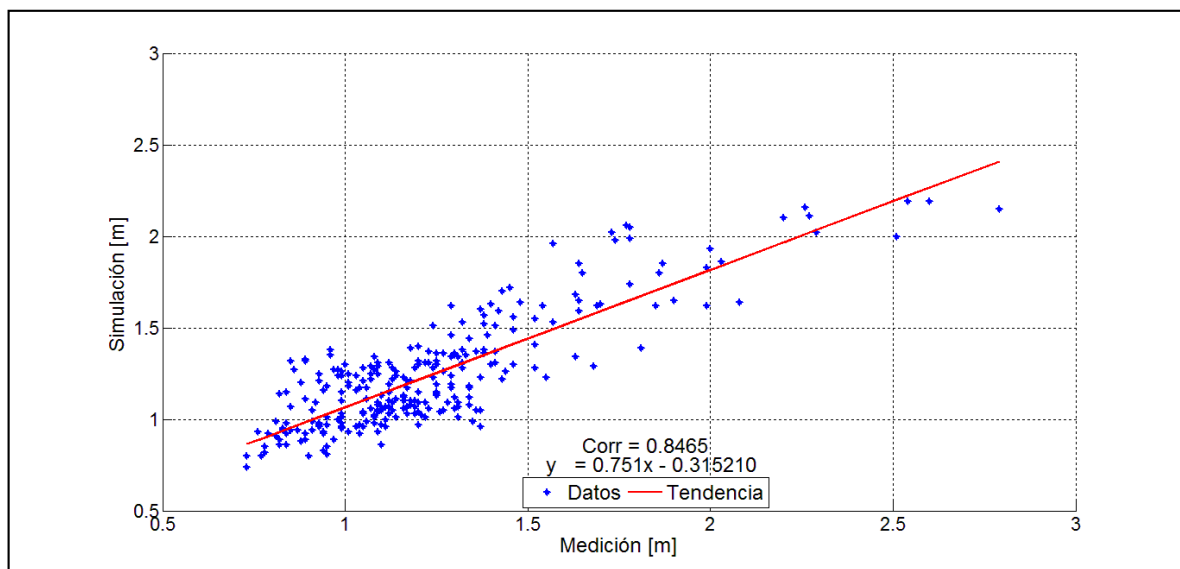


Figura 7-16: Regresión lineal de alturas significativas, modelo de transferencia de oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

La regresión lineal realizada para los periodos peaks del oleaje muestra que la tendencia de los datos poseen una pendiente del 57% acompañado de índice de correlación un tanto superior al 67%.

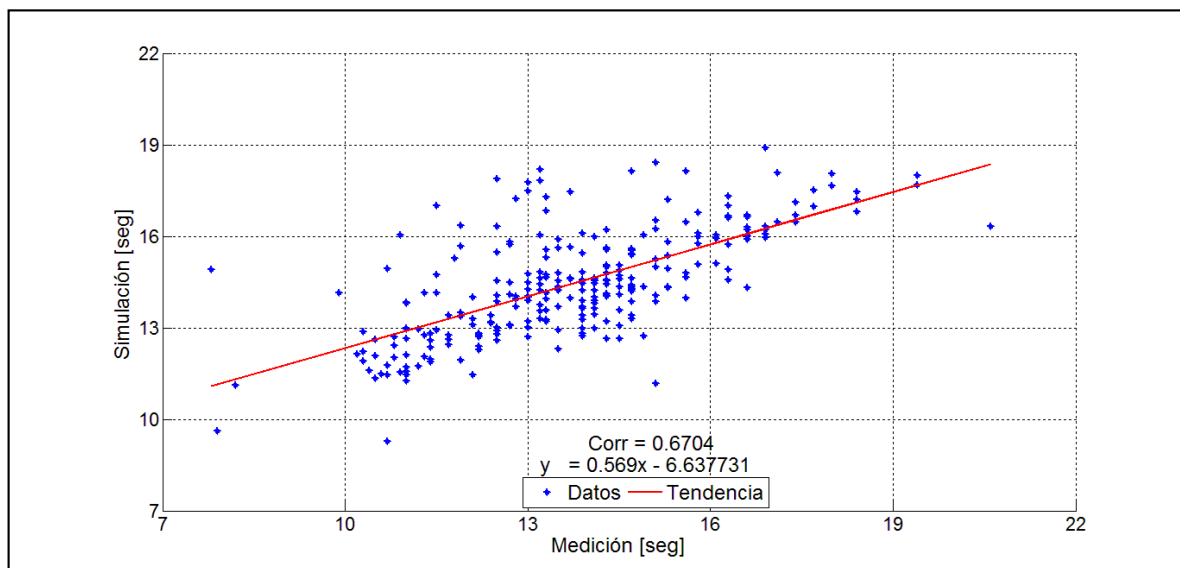


Figura 7-17: Regresión lineal de periodos peaks, modelo de transferencia de oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

La regresión lineal realizada para las direcciones peaks del oleaje muestran que la tendencia de los datos poseen una pendiente cercana al 19% con un índice de correlación un tanto superior al 41%. Esta dispersión de los datos puede tener origen en que no se consideraron todos los mecanismos forzantes, además se está suponiendo que no existen fenómenos locales que interfieran en la propagación del oleaje hacia la costa o que las direcciones utilizadas para forzar el modelo no se relacionaron directamente con las mediciones. En la siguiente figura es posible apreciar los resultados para las direcciones peaks.

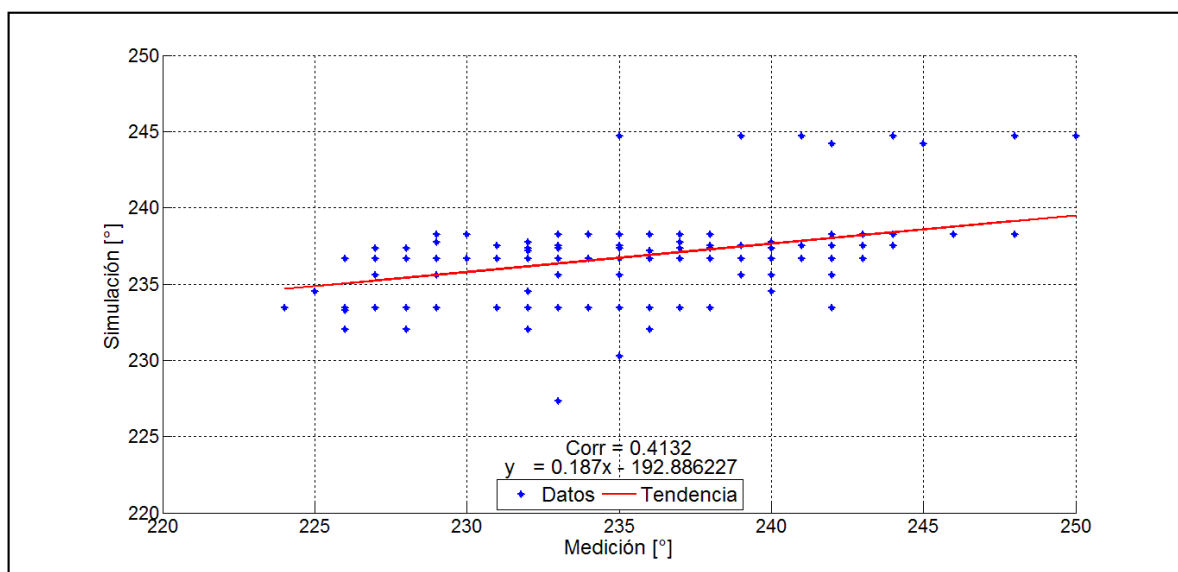


Figura 7-18: Regresión lineal de direcciones peaks, modelo de transferencia de oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

Los errores absolutos se encuentran en promedio entre los -0,6 y +0,4[m] para las alturas significativas, entre -4 y +7[s] para los periodos peaks y -10 a +10[°] para las direcciones peaks del oleaje. Para cada serie se tiene que el error relativo medio es de: 2% para las alturas significativas, 6% para los periodos peaks y de 1% para las direcciones peaks. Un análisis descriptivo se presenta en la Figura 7-19.

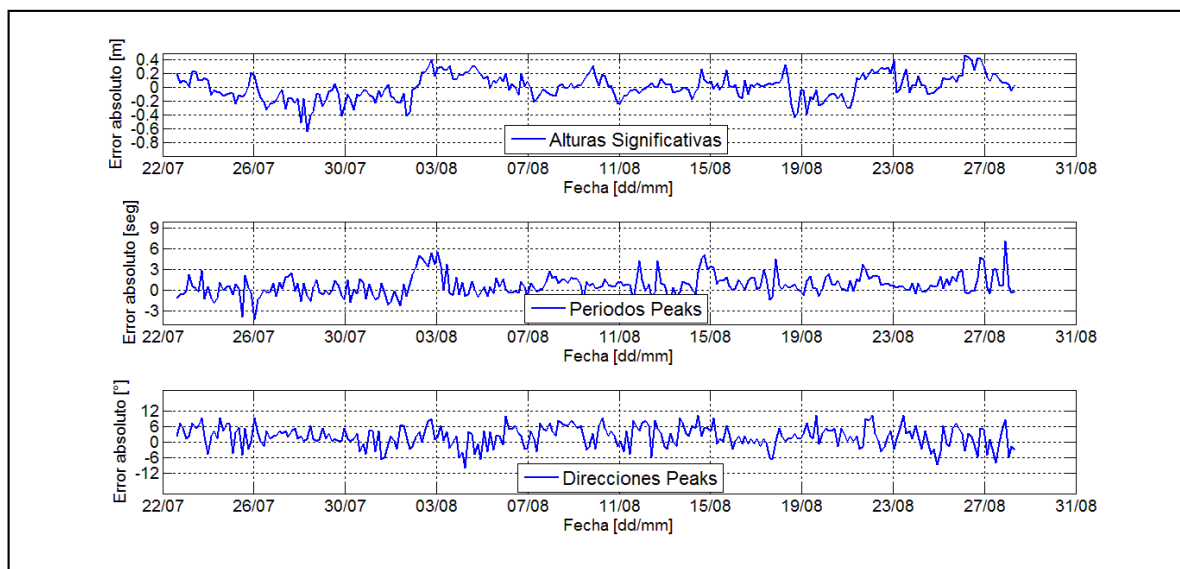


Figura 7-19: Errores absolutos durante toda la serie de tiempo simulada.

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3. CLIMA DE OLAJE AGUAS PROFUNDAS CON DATOS AJUSTADOS

La data de oleaje (30 años, NOAA modelo CFRS-WWIII) fue sometida a la metodología propuesta en 6.3.3, utilizando los factores de ajuste obtenidos anteriormente en el acápite 7.3.2.3 letra C. Sin embargo, este resultado no puede ser considerado válido ya que no se cuenta con datas de oleaje medidas en otros periodos de tiempo necesarias para validar el modelo y la metodología de calibración alternativa. Esta data de oleaje modificada recibió el nombre de "data NOAA ajustada correspondientes a aguas profundas".

A continuación, se presenta el clima de oleaje resultante para la serie de tiempo en cuestión.

La distribución de alturas de olas (resultados mostrados en la Tabla 7-20) más frecuentes se encuentran en el orden de los 1,5 a 3[m] contemplando más del 84,3% del total de la muestra. En cuanto a los periodos observados, el 93,6% se concentra entre los 10 y los 18[s]. La probabilidad de excedencia de que existan alturas de olas superiores a los 3[m] es de aproximadamente el 12%, mientras que la probabilidad de excedencia para periodos superiores a los 18[s] es de alrededor del 3,4%.

Tabla 7-20: Distribución de Hs y Tp, datos NOAA ajustado.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,5-1				7		1					8	0,01	100,00
1-1,5		31	161	999	944	620	264	83	26		3128	3,57	99,99
1,5-2	18	138	1078	6250	8425	5174	2434	606	172	2	24297	27,72	96,42
2-2,5		154	680	4597	13344	8260	3465	794	230	6	31530	35,97	68,71
2,5-3		67	194	1389	6453	7015	2385	480	98	6	18087	20,63	32,74
3-3,5		3	71	229	1776	3807	1330	238	40	2	7496	8,55	12,11
3,5-4			13	35	238	1219	758	117	16		2396	2,73	3,56
4-4,5			1	6	4	237	273	53	4		578	0,66	0,82
4,5-5						21	88	19			128	0,15	0,16
5-5,5							13	2			15	0,02	0,02
5,5+							1				1	0,00	0,00
Total	18	393	2198	13512	31184	26354	11011	2392	586	16	87664	N° Datos	
A(%)	0,02	0,45	2,51	15,41	35,57	30,06	12,56	2,73	0,67	0,02			
C(%)	100,00	99,98	99,53	97,02	81,61	46,04	15,98	3,42	0,69	0,02			

Fuente: Elaboración propia.

El oleaje incidente de los datos analizados se dividen en dos cuadrantes, el tercero y el cuarto. Claramente, la predominancia es del tercero, siendo la dirección principal más frecuente la SW con un 54,7%. La dirección SSW es la segunda más frecuente representando el 33,6% del total de los 30 años de datos (ver Tabla 7-21).

Tabla 7-21: Distribución de Dp y Hs, datos NOAA ajustado.

Dirección [°]	Altura Significativa [m]											Total	A(%)	C(%)
	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5	5-5,5	5,5+			
N												0	0,00	100,00
NNE												0	0,00	100,00
NE												0	0,00	100,00
ENE												0	0,00	100,00
E												0	0,00	100,00
ESE												0	0,00	100,00
SE												0	0,00	100,00
SSE												0	0,00	100,00
S			3	1								4	0,00	100,00
SSW		573	6426	10470	7161	3394	1116	228	55	10		29433	33,57	100,00
SW	7	1544	13311	17273	10077	4011	1260	350	73	5	1	47912	54,65	66,42
WSW		384	1524	1387	455	60	13					3823	4,36	11,77
W		142	551	499	89	9						1290	1,47	7,41
WNW	1	453	2288	1802	305	22	7					4878	5,56	5,93
NW		32	194	98								324	0,37	0,37
NNW												0	0,00	0,00
Total	8	3128	24297	31530	18087	7496	2396	578	128	15	1	87664		
A(%)	0,01	3,57	27,72	35,97	20,63	8,55	2,73	0,66	0,15	0,02	0,00	N° Datos		
C(%)	100,00	99,99	96,42	68,71	32,74	12,11	3,56	0,82	0,16	0,02	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla es posible observar la distribución de frecuencias relativas, acumuladas y probabilidad de excedencia para las direcciones y periodos del oleaje.

Tabla 7-22: Distribución de Dp y Tp, datos NOAA ajustado.

Dirección [°]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
N											0	0,00	100,00
NNE											0	0,00	100,00
NE											0	0,00	100,00
ENE											0	0,00	100,00
E											0	0,00	100,00
ESE											0	0,00	100,00
SE											0	0,00	100,00
SSE											0	0,00	100,00
S	2	2									4	0,00	100,00
SSW	16	389	1991	6593	10062	7485	2418	418	60	1	29433	33,57	100,00
SW		2	203	6655	19746	14627	5231	1172	266	10	47912	54,65	66,42
WSW			4	264	1189	1737	577	52			3823	4,36	11,77
W					115	819	320	31	5		1290	1,47	7,41
WNW					72	1636	2290	648	227	5	4878	5,56	5,93
NW						50	175	71	28		324	0,37	0,37
NNW											0	0,00	0,00
Total	18	393	2198	13512	31184	26354	11011	2392	586	16	87664		
A(%)	0,02	0,45	2,51	15,41	35,57	30,06	12,56	2,73	0,67	0,02	N° Datos		
C(%)	100,00	99,98	99,53	97,02	81,61	46,04	15,98	3,42	0,69	0,02			

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, más del 80% del total de la muestra se encuentra representado por los rangos de alturas y periodos antes mencionados, con una distribución de direcciones predominantes del tercer cuadrante en más del 90%.

Se puede concluir que la data de oleaje NOAA modelo CFRS ajustada es idéntica a la data sin ajuste, al menos en términos estadísticos de frecuencia.

A continuación, se analizan las respectivas rosas de oleaje en función de las alturas de ola y los periodos en las Figura 7-20Figura 7-21.

Reafirmando, las direcciones principales predominantes vienen del tercer cuadrante (SW y SSW) con una parte mucho menor que incide desde el cuarto cuadrante (<10%). La altura de ola más frecuente corresponde al rango de los 2 a 2,5[m] cercano al 35% del total de la muestra, seguidos por otro lado por el rango de los 1,5 a 2[m] con casi un 28% y el rango de los 2,5 a 3[m] con alrededor del 21%.

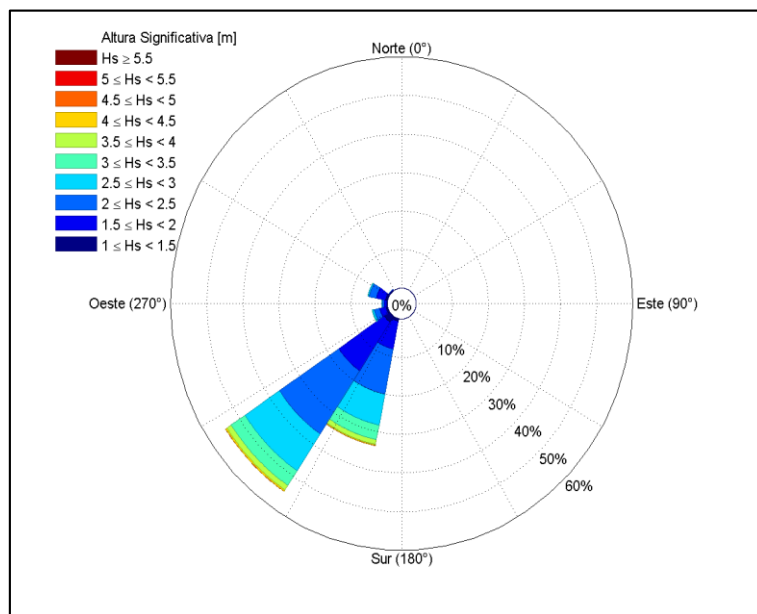


Figura 7-20: Rosa de oleaje en función de Hs, datos NOAA ajustado.
Fuente: Elaboración propia.

Los periodos del oleaje tienen una tendencia de mayor ocurrencia entre los 12 y 16[s], donde claramente el rango con más frecuencia se encuentra entre los 12 y 14[s] con alrededor del 35% de los datos.

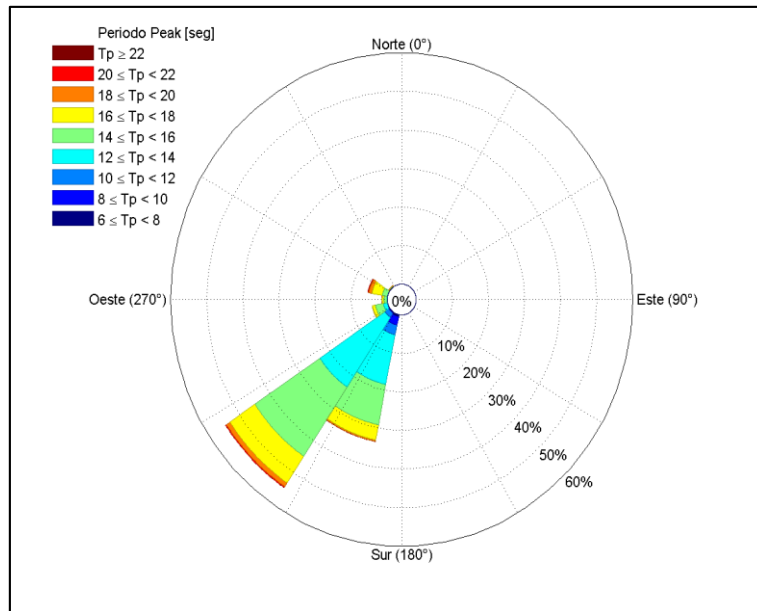


Figura 7-21: Rosa de oleaje en función de T_p , datos NOAA ajustado.
Fuente: Elaboración propia.

SHOA (2005) indica que el oleaje se encuentra separado por dos componentes, la de tipo sea o mar de carácter local y la de tipo *swell* o mar de fondo. La primera dice que abarcan periodos entre los 4 y 8[s] y la segunda desde los 10 a 25[s]. Si lo anterior es aplicado a los datos analizados, se tiene que el 97% de los datos se compone por mar de fondo y el restante por mar producido por fenómenos locales.

Nuevamente, se re afirma que la data de oleaje NOAA original no posee cambios estadísticos con respecto a la misma data ajustada.

7.3.4. MODELACIÓN PARA OBTENCIÓN DE COEFICIENTES DE AGITACIÓN

Dado a que el sitio de interés se encuentra a 20[m] de profundidad (respecto NRS), y que en el sector no dominan efectos de difracción, se utilizó el modelo numérico MIKE 21 SW, modelo desarrollado y calibrado en el acápite 7.3.

7.3.4.1. GENERACIÓN DE CASOS UNITARIOS

Antes de generar los casos unitarios a propagar es necesario definir los límites mínimos y máximos de las alturas significativas y periodos peaks del oleaje. A continuación, en la Tabla 7-23 se presentan los rangos antes mencionados.

Tabla 7-23: Límites de data de oleaje NOAA ajustada.

Límites	Hs [m]	T_p [s]	D_p [°]
Mínimo	0,93	5,26	189,50
Máximo	5,50	23,69	308,67

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, las combinaciones de los casos unitarios propuestos fueron realizadas considerando los intervalos que se muestran en la Tabla 7-24.

Tabla 7-24: Límites de las combinaciones de propagaciones unitarias.

Variables	Mínimo	Máximo	Intervalo
Periodos [s]	4,00	24,00	2,00
Direcciones [°]	180,00	315,00	15,00

Fuente: Elaboración propia.

El total de combinaciones a propagar es de 110 estados de mar, cada uno con una altura significativa unitaria.

7.3.4.2. COEFICIENTES DE AGITACIÓN Y DE CAMBIO EN LA DIRECCIÓN

Los coeficientes de cambio en la altura de la ola y de cambio en la dirección fueron realizados de acuerdo al resultado de la propagación de los 110 estados de mar unitario. A continuación, en las figuras Figura 7-22 y Figura 7-23 se presentan los resultados obtenidos.

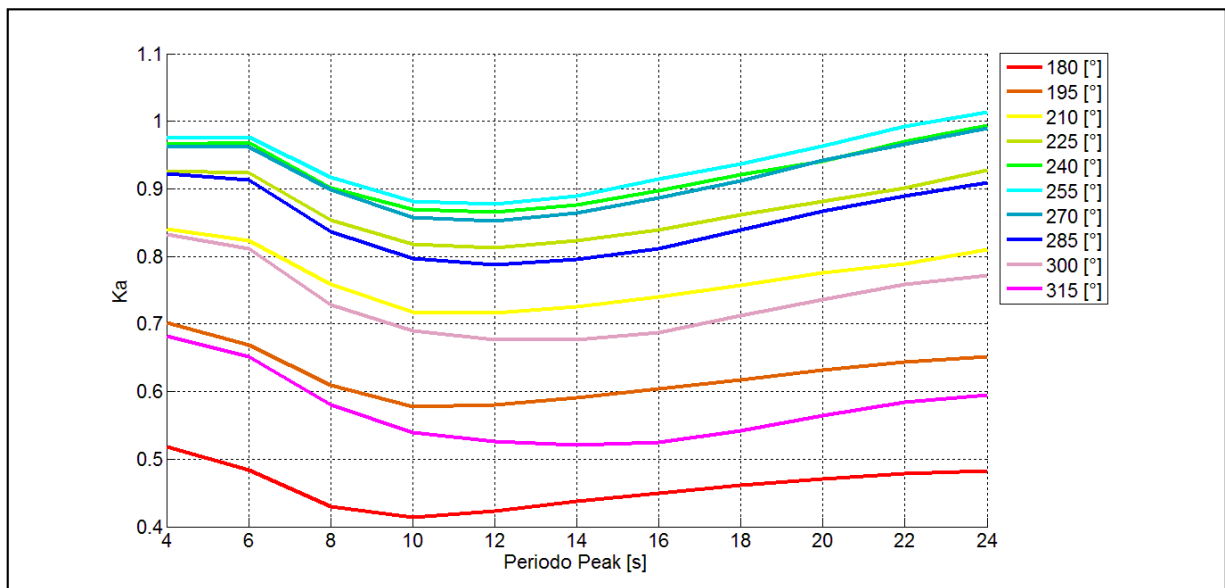


Figura 7-22: Coeficientes de agitación en "sitio de interés".

Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes de agitación o de cambio en la altura de la ola no poseen valores superiores a la unidad, lo cual indica que la zona estudiada no concentra energía, generando el efecto contrario (dispersión). Además, se observa que entre los periodos de 6 y 10[s] la altura de la ola disminuye notablemente. En cualquier sea el caso, el oleaje sufrirá disminución en su altura de ola no menor al 40%, exceptuando cuando los coeficientes de agitación son igual a la unidad y a 1,01 (caso de los 255[°]) para periodos entre los 22 y 24[s].

Es posible notar que las direcciones límites, 180 y 315[°] (direcciones en aguas profundas), poseen los coeficientes de agitación más bajos, lo que indica que estos frentes de olas son

los que más pierden energía. De modo contrario, los casos con menos disipación de energía corresponden a las direcciones propagadas desde los 240 hasta los 270[°].

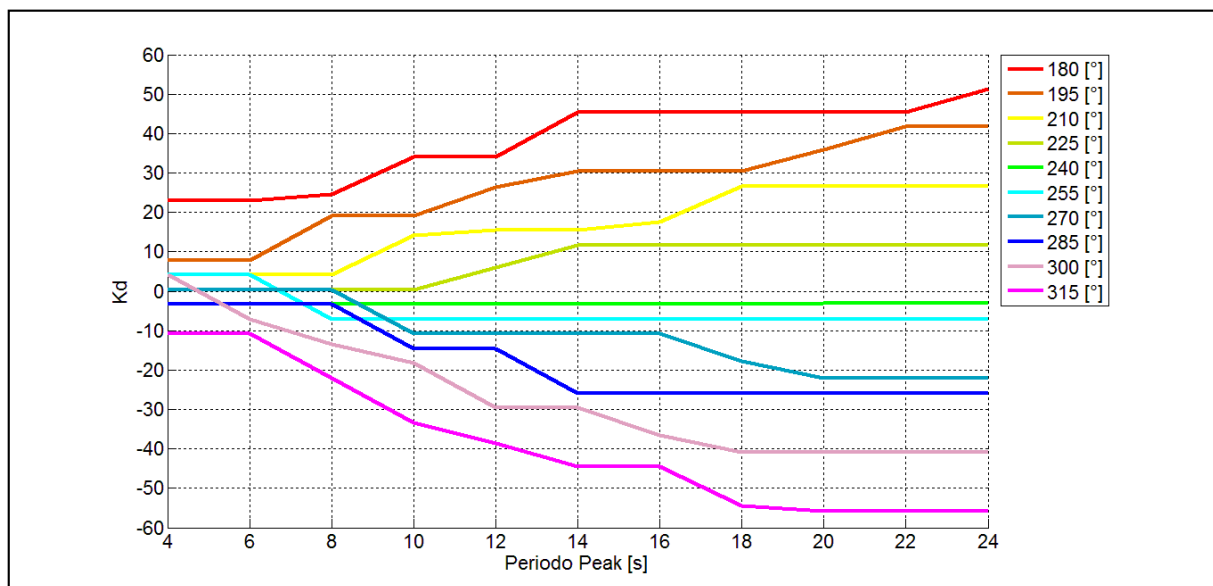


Figura 7-23: Coeficientes de cambio en la dirección en "sitio de interés".

Fuente: Elaboración propia.

Las direcciones límites, 180 y 315[°], poseen los cambios en la dirección más grandes de todos los casos propagados (en todos los periodos), quedando en 240 y 255[°] respectivamente en el sitio de interés, para un periodo de 24[s]. Lo anterior, dejaría que ambos frentes de olas quedaran casi perpendiculares a la línea de costa. El mismo comportamiento se repite con los periodos más grandes, 10 a 24[s], u oleaje de mar de fondo. Lo anterior indica que la mayor parte de los frentes de olas tienden a alinearse con la costa del sector (considerando un azimuth de -30 grados aproximadamente).

7.3.5. APLICACIÓN DE COEFICIENTES A DATOS DE AGUAS PROFUNDAS

A la serie de tiempo con datos de oleaje en aguas profundas (ajustada) se le aplicaron los coeficientes de agitación y de cambio en la dirección del oleaje. Esto se realizó utilizando la metodología propuesta en el acápite 6.3.6. Para realizar este proceso fue necesario discriminar los coeficientes de agitación y de cambio en la dirección en rangos de clases tal como se muestran en la Tabla 7-25.

Tabla 7-25: Rangos por clase para periodos y direcciones.

Clases	Dirección [°]	Rango de dirección [°]	Periodo [s]	Rango de periodo [s]
Clase 1	180	180 - 187,5	4	4 - 5
Clase 2	195	187,5 - 202,5	6	5 - 7
Clase 3	210	202,5 - 217,5	8	7 - 9
Clase 4	225	217,5 - 232,5	10	9 - 11
Clase 5	240	232,5 - 247,5	12	11 - 13
Clase 6	255	247,5 - 262,5	14	13 - 15
Clase 7	270	262,5 - 277,5	16	15 - 17
Clase 8	285	277,5 - 292,5	18	17 - 19
Clase 9	300	292,5 - 307,5	20	19 - 21
Clase 10	315	307,5 - 315	22	21 - 23
Clase 11	-	-	24	23 - 24

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron 10 clases para direcciones y 11 para los periodos, de las cuales se logran 110 combinaciones. Sin embargo, dado a que en la data de aguas profundas ajustada no existen valores de periodos inferiores a los 5[s], la clase 1 no es tomada en cuenta quedando solo 100 combinaciones.

Cada una de las combinaciones (Dirección - Periodo) poseen dos coeficientes, uno de agitación y otro de cambio en la dirección, los cuales se asocian a cada estado de mar de aguas profundas que se encuentra en cada rango. Este proceso fue posible mediante la utilización de un código de programación realizado en Matlab 2013a (ver Anexo 2), elaborado específicamente para el presente estudio.

7.3.6. CLIMA DE OLAJE EN SITIO DE INTERÉS

Con los datos de oleaje transferidos al sitio de interés se obtuvo un análisis de clima medio para condiciones de mar local. Para lo anterior, fue necesario confeccionar distribuciones de incidencia y rosas de oleaje, necesarias para obtener las características estadísticas medias del sector en cuestión.

En la Tabla 7-26 se puede observar que la distribución de alturas de olas se concentra en torno al 91,36% para valores entre los 1 y 2,5[m]. En cuanto a los periodos, es posible notar que el 89,77% se concentran entre los 12 y los 18[s].

Tabla 7-26: Distribución de Hs y Tp, en el sitio de interés.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,5-1		30	154	105	298	260	116	41	10		1014	1,16	100,00
1-1,5	18	256	1325	1979	11217	5243	2910	684	154	3	23789	27,14	98,84
1,5-2		103	583	1149	15708	14331	5028	882	234	16	38034	43,39	71,71
2-2,5		4	121	197	3908	9458	4013	448	113	7	18269	20,84	28,32
2,5-3			15	21	470	2571	1930	167	47	4	5225	5,96	7,48
3-3,5				2	9	388	604	56	13		1072	1,22	1,52
3,5-4						36	162	25	1		224	0,26	0,30
4-4,5						8	21	4			33	0,04	0,04
4,5-5							3	1			4	0,00	0,00
+5											0	0,00	0,00
Total	18	393	2198	3453	31610	32295	14787	2308	572	30	87664		
A(%)	0,02	0,45	2,51	3,94	36,06	36,84	16,87	2,63	0,65	0,03	N° Datos		
C(%)	100,00	99,98	99,53	97,02	93,08	57,03	20,19	3,32	0,69	0,03			

Fuente: Elaboración propia.

Claramente, la probabilidad de que las alturas de oleas excedan los 2,5[m] es de al menos el 7,5%, mientras que para los periodos superiores a 18[s] la probabilidad es de alrededor del 3,3%.

Al observar la Tabla 7-27 es posible notar que todo el oleaje proviene desde el tercer cuadrante. La dirección principal más frecuente es la SW con un 76,8% del total, la segunda dirección más frecuente es la WSW con el 17,9% de ocurrencia. La suma de estas dos direcciones principales es del 94,7%.

Tabla 7-27: Distribución de Dp y Hs, en el sitio de interés.

Dirección [°]	Altura Significativa [m]										Total	A(%)	C(%)
	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5	+5			
N											0	0,00	100,00
NNE											0	0,00	100,00
NE											0	0,00	100,00
ENE											0	0,00	100,00
E											0	0,00	100,00
ESE											0	0,00	100,00
SE											0	0,00	100,00
SSE											0	0,00	100,00
S											0	0,00	100,00
SSW	18	301	193	34	2						548	0,63	100,00
SW	662	17478	29426	14626	4171	798	164	21	4		67350	76,83	99,37
WSW	107	3629	7097	3508	1045	273	60	12			15731	17,94	22,55
W	227	2381	1318	101	7	1					4035	4,60	4,60
WNW											0	0,00	0,00
NW											0	0,00	0,00
NNW											0	0,00	0,00
Total	1014	23789	38034	18269	5225	1072	224	33	4	0	87664		
A(%)	1,16	27,14	43,39	20,84	5,96	1,22	0,26	0,04	0,00	0,00	N° Datos		
C(%)	100,00	98,84	71,71	28,32	7,48	1,52	0,30	0,04	0,00	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

Como se dijo anteriormente, el oleaje proviene en su totalidad desde el tercer cuadrante, desde el SSW hasta el W. Las direcciones principales menos frecuentes (SSW y W) suman un 5,23% del total de los datos (Ver Tabla 7-28).

Tabla 7-28: Distribución de Dp y Tp, en el sitio de interés.

Dirección [°]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
N											0	0,00	100,00
NNE											0	0,00	100,00
NE											0	0,00	100,00
ENE											0	0,00	100,00
E											0	0,00	100,00
ESE											0	0,00	100,00
SE											0	0,00	100,00
SSE											0	0,00	100,00
S											0	0,00	100,00
SSW	18	179	351								548	0,63	100,00
SW		214	1845	3387	27915	24609	8435	768	171	6	67350	76,83	99,37
WSW			2	66	3655	6386	4268	1089	249	16	15731	17,94	22,55
W					40	1300	2084	451	152	8	4035	4,60	4,60
WNW											0	0,00	0,00
NW											0	0,00	0,00
NNW											0	0,00	0,00
Total	18	393	2198	3453	31610	32295	14787	2308	572	30	87664		
A(%)	0,02	0,45	2,51	3,94	36,06	36,84	16,87	2,63	0,65	0,03	N° Datos		
C(%)	100,00	99,98	99,53	97,02	93,08	57,03	20,19	3,32	0,69	0,03			

Fuente: Elaboración propia.

Las alturas, periodos y direcciones más frecuentes se encuentran cercanos o superior al 90% del total de la muestra. Además, es posible notar que luego de la transferencia al sitio de interés el oleaje tendió a concentrarse en dos direcciones principales, quedando los frentes de olas casi paralelos a la línea de costa.

A continuación, en las figuras Figura 7-24 y Figura 7-25 es posible encontrar rosas de oleaje en función de las alturas y frecuencia.

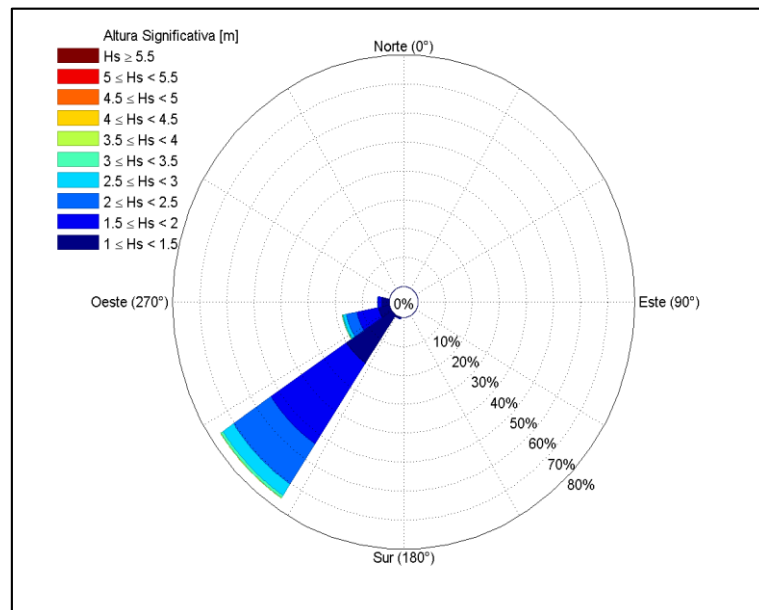


Figura 7-24: Rosa de oleaje en función H_s , datos transferidos al sitio de interés.
Fuente: Elaboración propia.

La rosa de oleaje direccional en función de las alturas de olas, indica que más del 70% de las alturas de olas se encuentra en una sola dirección, claramente SW. Además, es posible observar que las alturas más frecuentes se encuentran entre los 1,5 y 2[m].

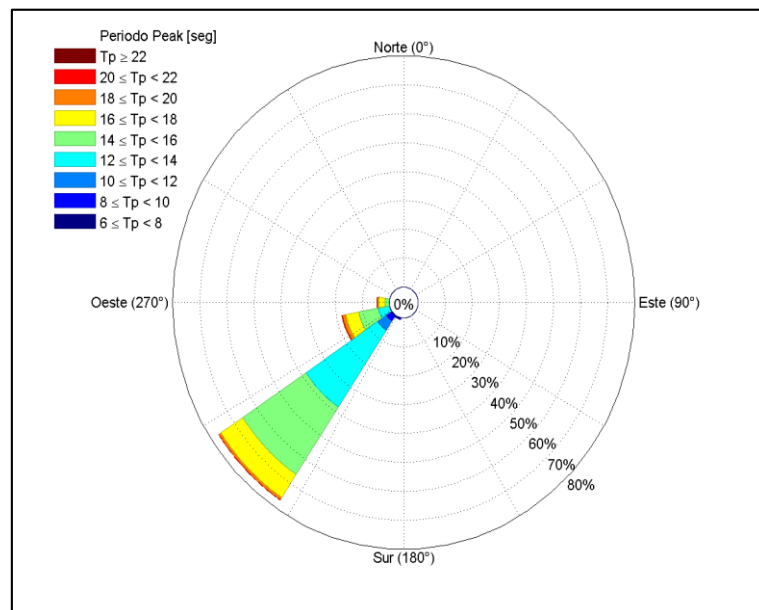


Figura 7-25: Rosa de oleaje en función de T_p , datos transferidos al sitio de interés.
Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que los periodos de olas más ocurrentes se encuentran entre los 14 y 16[s], con una frecuencia del 30%, seguidos muy de cerca por los periodos entre los 12 y 14[s] con una aparición similar.

SHOA (2005) indica que el oleaje se encuentra separado por dos componentes, la de tipo sea o mar de carácter local y la de tipo *swell* o mar de fondo. La primera indica que abarcan periodos entre los 4 y 8[s] y la segunda desde los 10 a 25[s]. Si lo anterior es aplicado a los datos analizados anteriormente, se tiene que el 97% de los datos se compone por mar de fondo y el restante por mar producido por fenómenos locales y/o atmosféricos. El resultado es similar a lo expuesto en 7.2.1 y 7.2.2 debido a que el periodo permaneció constante.

7.4. CLIMA DE OLEAJE EXTREMO

Para efectuar el análisis del clima de oleaje extremo se consideró utilizar la metodología de máximos anuales, utilizando el total de la data transferida al sitio de interés. Por tanto, se aislaron 30 eventos extremos (desde 1980 hasta 2009), los cuales se presentan a continuación en la Tabla 7-21.

Tabla 7-29: Eventos extremos aislados por año.

Fecha	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
21-05-1980 0:00	3,64	17,20	235,27
03-08-1981 21:00	4,15	17,02	236,30
09-06-1982 18:00	3,78	18,22	235,04
15-07-1983 15:00	4,04	18,14	236,99
06-07-1984 18:00	3,85	16,49	230,89
26-05-1985 15:00	4,14	17,50	229,46
25-08-1986 12:00	3,64	17,04	234,54
26-07-1987 21:00	4,16	15,41	237,53
22-11-1988 0:00	4,06	18,00	231,10
17-06-1989 3:00	3,71	17,79	232,18
28-07-1990 15:00	3,68	16,93	229,28
26-07-1991 3:00	4,24	17,81	232,60
23-08-1992 12:00	4,74	18,20	231,48
29-07-1993 0:00	3,61	16,46	231,57
19-06-1994 9:00	4,10	17,62	229,95
17-05-1995 21:00	3,27	17,13	233,84
29-05-1996 0:00	4,08	17,05	239,20
05-10-1997 0:00	3,53	15,01	232,31
29-05-1998 21:00	3,70	17,06	242,49
01-06-1999 15:00	3,44	17,78	237,72
29-07-2000 0:00	3,46	17,38	233,25
12-05-2001 18:00	2,91	17,32	230,19
10-08-2002 3:00	3,25	17,50	234,87
14-06-2003 6:00	3,75	17,10	241,88
24-06-2004 6:00	3,53	16,20	232,30
10-09-2005 21:00	3,16	13,46	235,73
03-06-2006 3:00	3,71	17,15	236,17
06-09-2007 9:00	3,96	17,75	229,65
17-07-2008 18:00	3,59	16,07	232,82
06-07-2009 9:00	3,54	16,44	238,93
Min	2,91	13,46	229,28
Max	4,74	18,22	242,49
Promedio	3,75	17,01	234,19

Fuente: Elaboración propia.

De los eventos extremos seleccionados, el máximo de ellos ocurrió el 23 de agosto de 1992 alcanzando 4,74[m], 18,2[s] de periodo peak y una dirección principal SW. La mayoría de los eventos ocurridos provienen desde la dirección SW, ya que varían entorno los 229 a 242[°], con una ocurrencia un tanto menor proveniente desde el WSW.

Para la caracterización del clima de oleaje extremo se utilizó la distribución tipo Weibull para factores de forma de 0,75, 1,0, 1,4 y 2,0, los cuales fueron probados para un intervalo de confianza del 95%. En la Tabla 7-30 se presentan los resultados del análisis extremo mencionado anteriormente.

Tabla 7-30: Extrapolación de oleaje extremo utilizando distribución Weibull.

Resumen	Distribución Weibull 95% de confianza			
	Hs [m] - k=0,75	Hs [m] - k=1,00	Hs [m] - k=1,40	Hs [m] - k=2,0
Correlación	0,88	0,92	0,96	0,98
RMS	0,31	0,17	0,10	0,06
Periodo retorno [años]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]
2	3,62	3,64	3,67	3,70
5	3,90	3,97	4,03	4,06
10	4,16	4,22	4,26	4,26
15	4,32	4,37	4,38	4,36
20	4,44	4,48	4,47	4,43
25	4,54	4,56	4,53	4,49
30	4,62	4,63	4,59	4,53
35	4,69	4,68	4,63	4,56
40	4,75	4,73	4,67	4,59
45	4,80	4,77	4,70	4,61
50	4,85	4,81	4,73	4,64
55	4,89	4,85	4,75	4,65
60	4,93	4,88	4,78	4,67
65	4,97	4,91	4,80	4,69
70	5,01	4,93	4,82	4,70
75	5,04	4,96	4,84	4,72
80	5,07	4,98	4,85	4,73
85	5,10	5,01	4,87	4,74
90	5,13	5,03	4,89	4,75
95	5,15	5,05	4,90	4,76
100	5,18	5,06	4,91	4,77

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior es posible observar que el mejor ajuste y menor error cuadrático medio se encuentra para el factor de forma $k=2,0$, en donde la correlación lograda fue del 98%¹⁷.

¹⁷

Nota: Es importante recordar que el modelo de oleaje no logró representar los valores peak de la serie de datos de oleaje medido, dado esto es que los resultados del clima extremo se encuentran subestimados en al menos un 10%.

7.5. PROPUESTA DE ALTERNATIVA DE ABRIGO

A continuación se presentan las alternativas, en donde debe existir espacio suficiente para poder permitir actividades de pesca, buceo, reparación de embarcaciones, talleres, oficinas de administración y acciones destinadas al turismo, venta de productos y cocinerías. Además, como se explicará más adelante en detalle, la disposición y orientación de las alternativas deben brindar protección del oleaje reinante generando así una dársena con aguas abrigadas.

7.5.1. ALTERNATIVAS

El oleaje más frecuente en el sitio de interés proviene desde la dirección SW, en casi el 77% del tiempo. Sin embargo, la dirección principal WSW se presenta con una ocurrencia de alrededor del 17%. Los resultados observados en el acápite 7.3.6 indican que toda la data incide desde el tercer cuadrante, específicamente entre la dirección SSW y W. Dado esto, se tiene que existen cuatro direcciones principales a las cuales se podría enfrentar la defensa costera a proyectar, siendo estas SSW - SW - WSW y W.

A continuación se presentan dos alternativas, la primera (ver Figura 7-26) corresponde a la propuesta generada por GSI Ingeniería Ltda. a la DOP. El eje vertical de la figura se encuentra referido a la dirección SW. Es por esto, que gran parte de la estructura principal se encuentra perpendicular a esa dirección, Cabe destacar que la estructura secundaria se encuentra fuera del alcance del presente estudio.

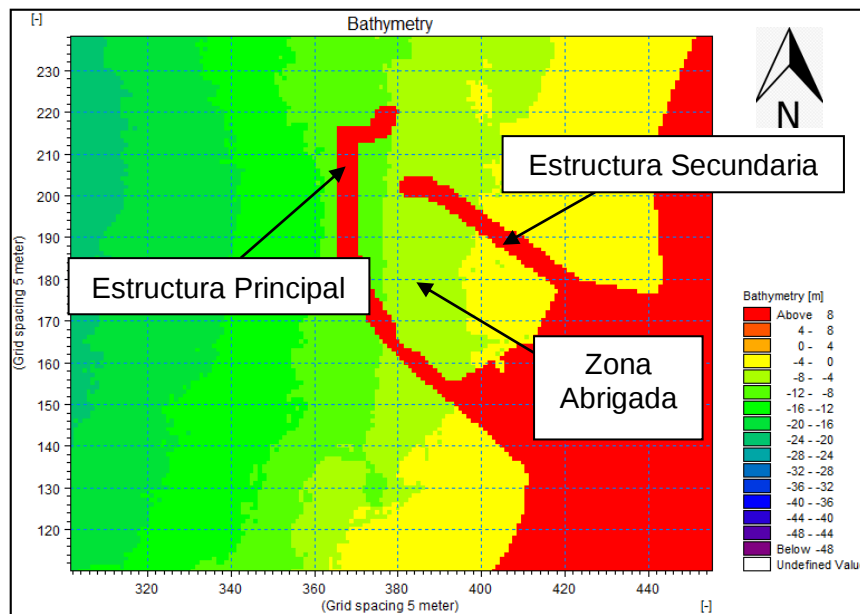


Figura 7-26: Alternativa de layout 1, propuesta por GSI a DOP.
Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

La alternativa 2 (ver Figura 7-27) se diferencia de la alternativa 1 por la forma que toma la última parte de la estructura principal, específicamente en el cabezo. Con ello se podrá

disminuir la energía de la ola mediante la refracción y difracción que ocurre cuando el oleaje avanza por esta zona, generando una desaceleración de la onda a la entrada de la zona abrigada.

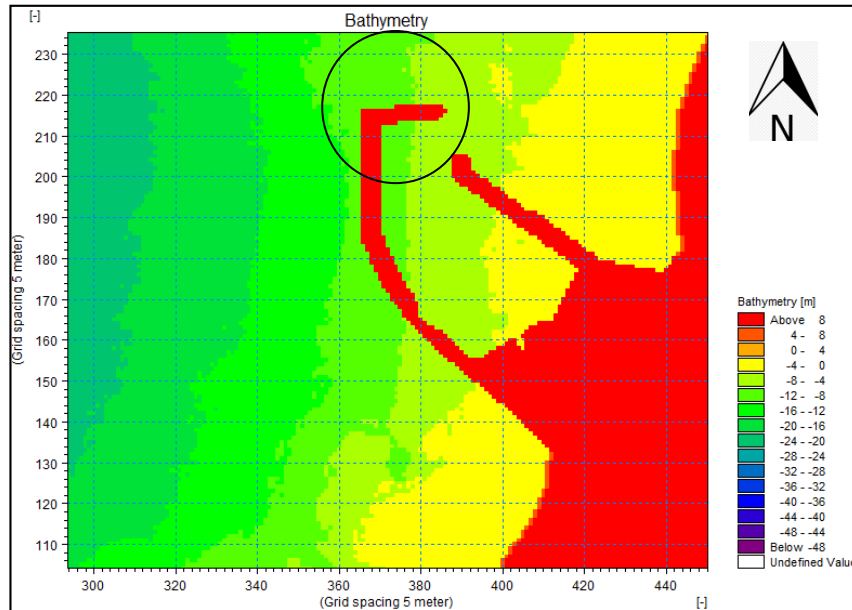


Figura 7-27: Alternativa de layout 2, propuesta elaborada por el autor.

Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

7.5.2. VERIFICACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

El criterio de verificación de las alternativas se basa en la generación de climas de oleaje dentro de las dársenas. Este proceso se realizó mediante el uso del modelo numérico de agitación MIKE 21 Boussinesq Waves, estimando los coeficientes de cambio en la altura de ola para las direcciones y periodos más frecuentes entre los años 1980 y 2009, generando una transición del oleaje entre el sitio de interés y la estructura proyectada.

7.5.2.1. CASOS UNITARIOS DE MODELACIÓN

Las condiciones medias de oleaje en el punto de interés (clima evaluado en 7.3.6) indican que las direcciones incidentes en el sector provienen desde el SSW, SW, WSW y W, sumando una ocurrencia del 99,37%. La dirección más frecuente corresponde a la SW con una aparición del 77%. Dado lo anterior, es que las direcciones a modelar se encuentran entre los 225[°] y los 270[°] con un intervalo de 15[°], es decir, 225 [°] – 240[°] – 255[°] y 270[°].

Los periodos peaks del oleaje modelados se encuentran entre los 8 y 20[s], con un intervalo de 2[s], Con este rango de periodos se consideró el 98,84% de los datos transferidos al sitio de interés.

Por lo tanto, los casos de oleaje unitario necesarios para la modelación de agitación concentran más del 98% del total de los datos evaluados. De lo anterior se obtuvieron 28 estados de mar, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7-31: Escenarios unitarios de agitación.

N ° del caso	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
1	1	8	225
2	1	10	225
3	1	12	225
4	1	14	225
5	1	16	225
6	1	18	225
7	1	20	225
8	1	8	240
9	1	10	240
10	1	12	240
11	1	14	240
12	1	16	240
13	1	18	240
14	1	20	240
15	1	8	255
16	1	10	255
17	1	12	255
18	1	14	255
19	1	16	255
20	1	18	255
21	1	20	255
22	1	8	270
23	1	10	270
24	1	12	270
25	1	14	270
26	1	16	270
27	1	18	270
28	1	20	270

Fuente: Elaboración propia.

7.5.2.2. MODELACIÓN NUMÉRICA DE AGITACIÓN

Al igual que el procedimiento desarrollado en el acápite 7.3.2, los modelos para la verificación de la agitación se confeccionaron siguiendo la metodología propuesta por García (2009) y adaptada por el autor. A continuación se presentan cada uno de los criterios finales, producto de un proceso iterativo, utilizados para la modelación de la agitación para verificación de las estructuras propuestas.

a. Pre proceso

Definición del problema a resolver

Debido a que es necesario poner a prueba las alternativas de las estructuras propuestas, el modelo debe resolver adecuadamente los fenómenos que provocan el cambio de los frentes de oleaje cuando sienten el fondo, efectos de difracción, refracción, asomeramiento, rotura del oleaje y reflexión. El modelo que se utilizó fue MIKE 21 BW, el cual resuelve la aproximación de Boussinesq mediante el método de diferencias finitas.

Lugar de implementación del modelo

- El modelo al ser de propagación desde una zona de aguas intermedias hacia aguas someras cumple el criterio lineal $d/L < 0,5$.
- Las direcciones que se deben analizar son: 225, 240, 255 y 270[°]. Por lo tanto, los modelos tienen que ser capaces de propagar el oleaje en esas direcciones.
- El dominio del modelo debe considerar una extensión media de al menos 4 a 5 veces la longitud de la onda, estimada a una profundidad límite desde donde se propagarán los casos unitarios.
- La extensión de la línea de costa debe ser la adecuada para evitar que lleguen efectos de sombras numéricas al sitio de interés, para evitar que los resultados se vean afectados.

A cada dirección de propagación, se le asignó un dominio de cálculo. Por lo tanto, se generaron cuatro grillas de cálculo idénticas en sus propiedades.

En la Figura 7-28 se presenta el dominio para la situación completamente SW, para ello fue necesario girarla a 45[°] con respecto a la horizontal.

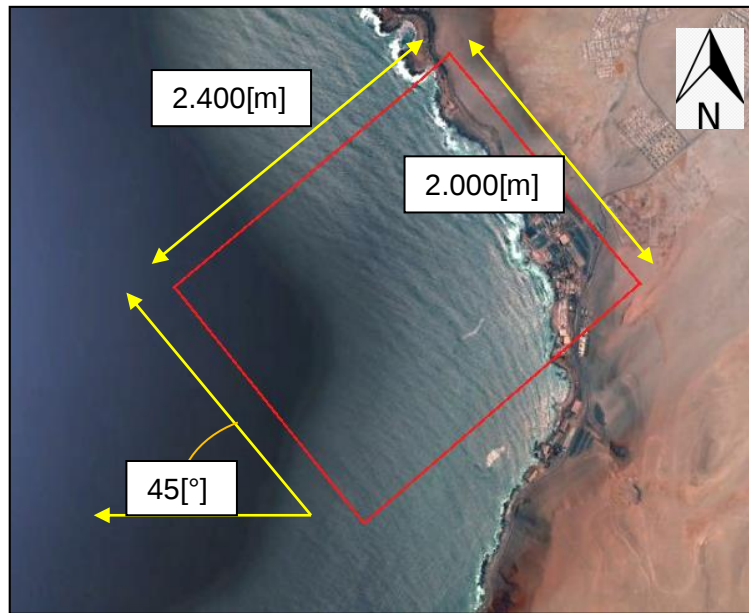


Figura 7-28: Dominio para situación 225 [°].

Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

Los demás dominios para las direcciones 240, 255 y 270[°], poseen las mismas dimensiones espaciales, solo fue necesario variar el ángulo con respecto a la horizontal 30, 15 y 0[°] respectivamente.

Condiciones de borde

- Condiciones de borde cerradas: Se consideró que la línea de costa corresponde a frontera cerrada (incluyendo la estructura).
- Condiciones de borde abiertas: Se consideró que los límites del dominio (en la zona mojada) que cumplan el criterio $d/L < 0,5$, se clasificarán como condiciones de borde abiertas.

Las forzantes consideradas corresponden a los casos unitarios definidos en la Tabla 7-31, Los cuales son utilizados en la condición de borde abierta más lejana a la estructura.

En todo el dominio de cálculo se consideró el nivel medio del mar.

Las condiciones de borde cerradas delimitan el área que forma el trazo 1-A-D-2 y la línea de costa. Mientras que las condiciones de borde abiertas se componen por los trazos 1-B, B-C y C-2 (ver Figura 7-29).

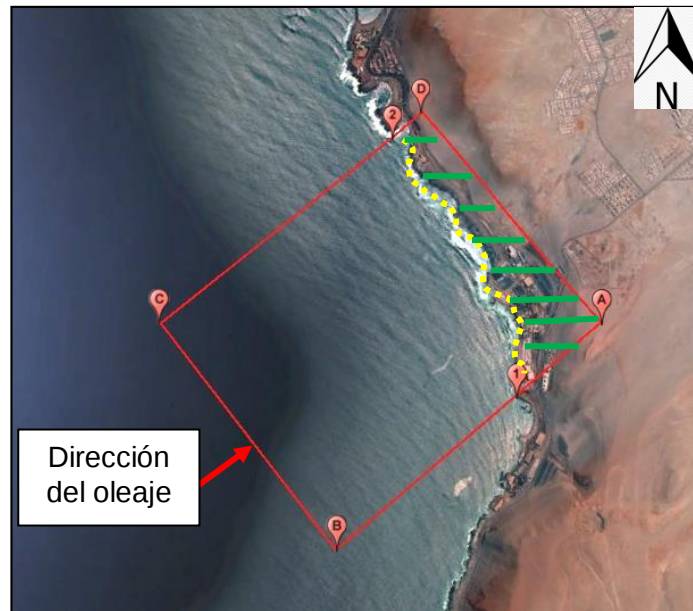


Figura 7-29: Condiciones de borde, situación 225[°].
Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

Batimetría

Las sondas batimétricas utilizadas corresponden a las que se usaron para confeccionar el modelo de transferencia en el acápite 7.3.2. De todos modos, son detalladas a continuación.

- Información batimétrica proveniente de cartas náuticas digitalizadas:
 Carta N° 1000: Rada de Arica a Bahía de Mejillones lado Sur.
 Carta N° 1100: Rada de Arica a Bahía de Iquique.
 Carta N° 1111: Rada y puerto de Arica.
- Información batimétrica medida en terreno mediante levantamiento topobatimétrico
- Información línea de costa, extraída desde imágenes satelitales provenientes de Google Earth Pro, previo proceso de geo-referenciarlas.

Las tres fuentes de información batimétrica están geo referenciadas al mismo sistema de referencia planimétrico y altimétrico, Universal Transversal de Mercator WGS84 Huso 19 Sur y al nivel de reducción de sondas respectivamente.

Como se dijo anteriormente, se utilizaron sondas extraídas desde cartas náuticas y desde levantamientos batimétricos en el sector. Claramente, este último es el que presenta mayor densidad (ver Figura 7-30).

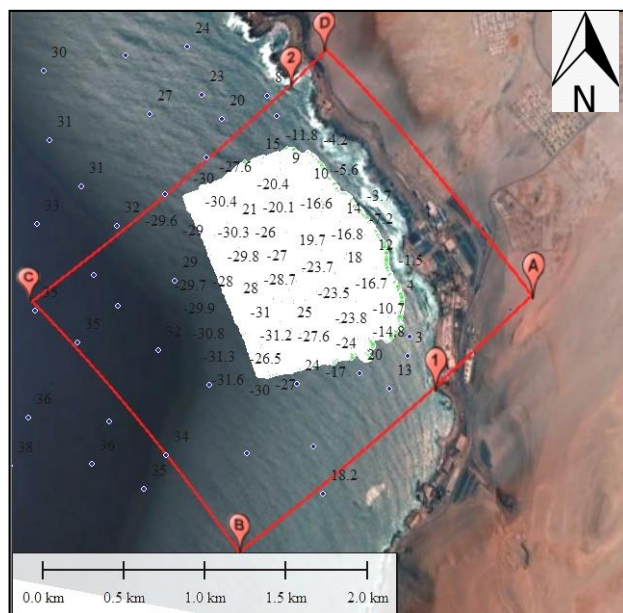


Figura 7-30: Sondas utilizadas en modelos de agitación, fuentes de información varias.
Fuente: Elaboración propia con imagen Google Earth Pro.

Malla de cálculo

Para el desarrollo de los modelos de agitación se utilizaron cuatro mallas de cálculo, una para cada dirección (225, 240, 255 y 270[°]). El área total de la grilla es de 4.800.000[m²], en la componente X posee una extensión de 2.400[m] y en Y la extensión es de 2.000[m]. La grilla de cálculo es de tipo regular, por lo que se compone de elementos cuadriculados, con una resolución espacial de 5[m] en la horizontal y en la vertical. Por lo tanto, se tienen 480 elementos en DX y 400 en DY, sumando un total de 192.000 elementos.

A continuación, en la Figura 7-31 se presenta la grilla de cálculo elaborada para la situación de 225[°] (SW).

Los criterios para la definición del tamaño de los elementos fueron asignados a partir de la herramienta de MIKE ZERO **MIKE 21 BW Model Setup Planner**.

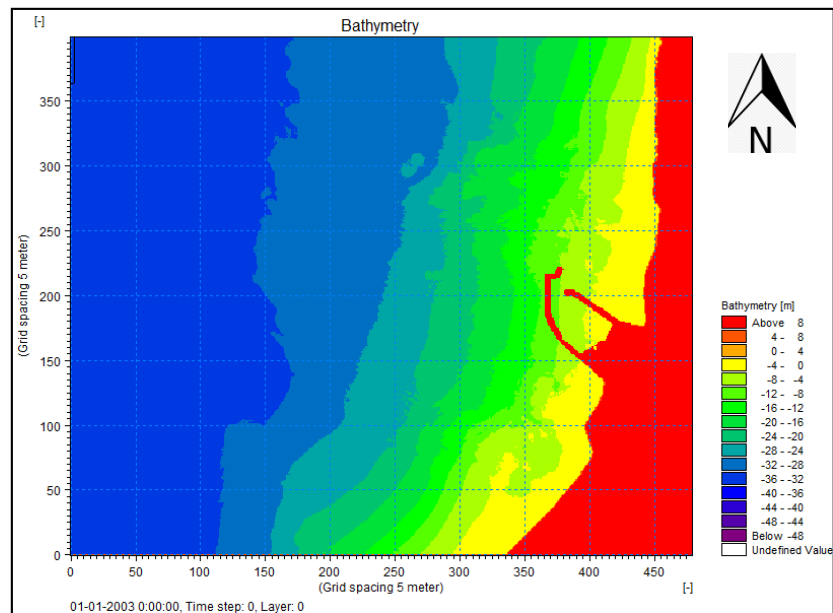


Figura 7-31: Malla de cálculo, situación 225[°].
Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

b. Proceso

Paso del tiempo

El paso del tiempo, en este caso depende absolutamente del tamaño de los elementos y del número de *Courant*, el cual en ningún momento debe sobrepasar la unidad. Es por esto, que se calculó un paso del tiempo de 0,05[s], otorgando una estabilidad numérica de 0,188021. Cabe destacar, que el periodo de simulación fue de 180 minutos, obteniendo así un número de 216.000 pasos de tiempo.

Los criterios para la definición del paso del tiempo fueron asignados a partir de la herramienta de MIKE ZERO **MIKE 21 BW Model Setup Planner**.

Parámetros de la modelación

Los parámetros definidos en la interfaz gráfica del modelo corresponden a las esponjas de los elementos (las cuales permiten que no se genere reflexión en las condiciones de bordes abiertas), las porosidades de los distintos materiales en la línea de costa y de las estructuras, y finalmente la paleta generadora de oleaje.

A continuación, a modo de ejemplo, se detallan cada uno de los parámetros calibradores para la dirección 225[°].

Las esponjas utilizadas se confeccionaron en los bordes abiertos de la malla de cálculo, considerando 20 capas. El valor base de la capa más extrema posee un valor de 7, mientras que decrece en potencia de 0,7 hacia el interior de la grilla. Estos valores fueron determinados a partir de las recomendaciones del manual "Step By Step Guide – MIKE21BW". En la siguiente figura es posible observar el resultado de la grilla de porosidad.

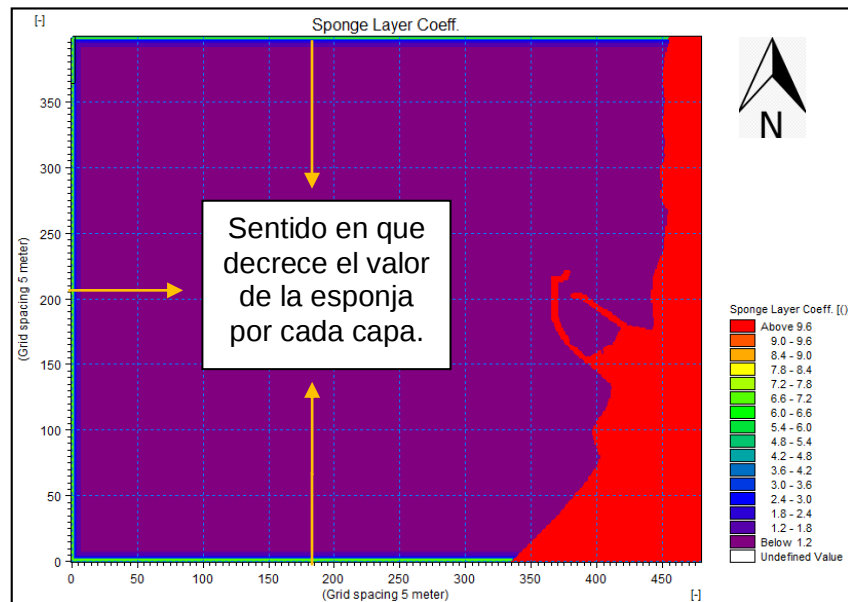


Figura 7-32: Esponja numérica, situación 225[°].
Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

Para generar los coeficientes de porosidad es necesario tener en cuenta que se debe calcular el coeficiente de reflexión en las estructuras y en la línea de costa. Este último, depende de las características del oleaje incidente y de las propiedades de los elementos que componen la condición de borde cerrada, vale decir, si estos elementos son o no permeables. A continuación se presenta el gráfico de reflexión obtenido para un oleaje incidente normal a la costa, unitario y de 8 segundos.

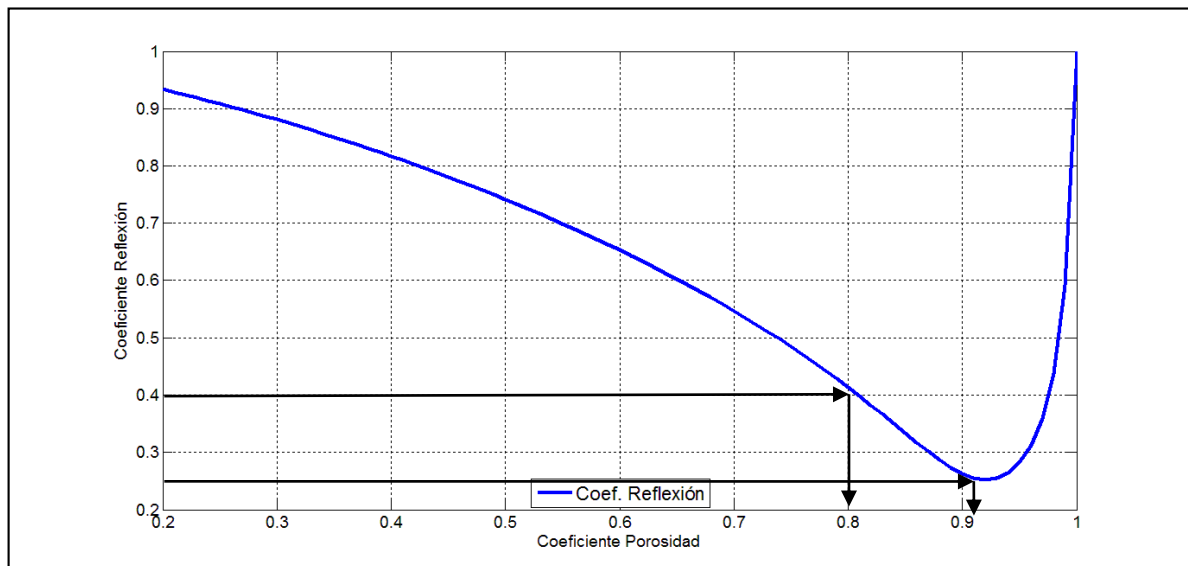


Figura 7-33: Coeficientes de reflexión/Coeficientes de porosidad, para 8[s].
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura es posible observar los distintos coeficientes de reflexión, los cuales dependen si es que se considera la existencia de playa natural o estructuras más completas como rompeolas, paredes verticales, entre otros.

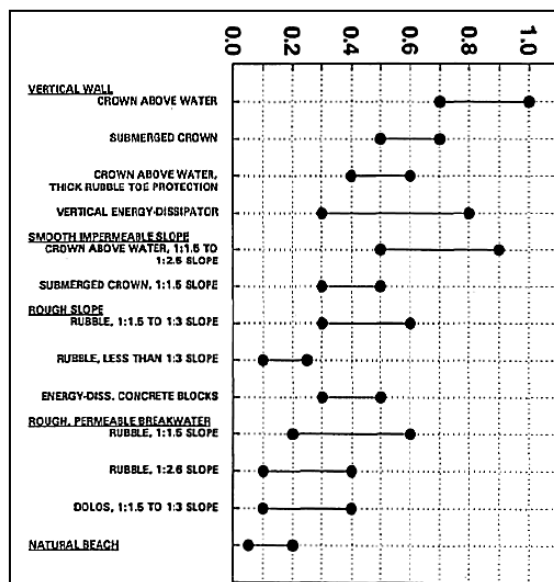


Tabla 7-32: Coeficientes de reflexión para periodos < 20[s].
Fuente: (DHI, 2012).

Dado a que la estructura está compuesta por elementos tipo roca, cubos o cubípodos, el coeficiente de reflexión se estimó con un valor de 0,4 en el exterior (coef, porosidad = 0,81) y 0,6 para el interior del rompeolas

. El resto de la condición de borde está compuesto por la línea de costa, la cual está conformada en su mayoría por arena, estimándose un coeficiente de reflexión de 0,25 (coef, porosidad=0,92).

Obteniendo así, los coeficientes de porosidad en todo el dominio de cálculo del modelo.

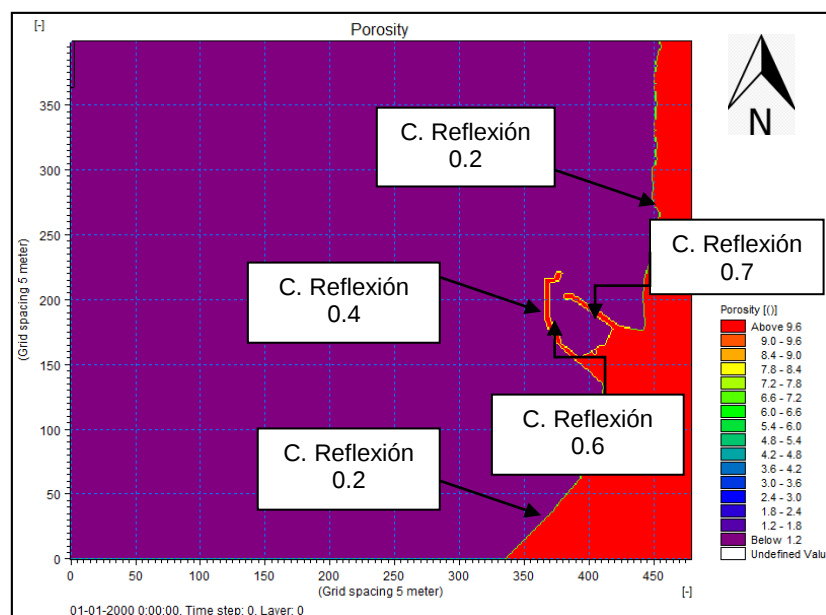


Figura 7-34: Coeficientes de porosidad, situación 225[°].

Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

La forzante, paleta de oleaje, fue confeccionada mediante el uso de espectros sintéticos tipo **Jonswap** para una altura de ola unitaria, periodo de 8[s] y una dirección de propagación 0[°] en coordenadas científicas. Recordar que la grilla de cálculo para la situación 225[°], fue girada 45[°] con respecto al eje vertical, referido al Norte verdadero.

Por último, se solicitaron que los resultados del modelo fueran promediados en la fase de la onda, entregando salidas cada 30[s] de la altura significativa de la onda. Esto, permitirá conocer los coeficientes de agitación fuera y dentro de la zona abrigada por las estructuras de protección proyectadas.

c. Post proceso

Los modelos unitarios, utilizados para la obtención de coeficientes de agitación, son evaluados en un punto dentro de la zona abrigada. Las coordenadas se presentan en la siguiente tabla y en la Figura 7-35 la disposición espacial dentro de la zona de proyecto.

Tabla 7-33: Nodo de agitación dentro de zona abrigada, coordenadas UTM [m].

Elemento coordinado	Coordenada Este [m]	Coordenada Norte [m]
NODO AGITACIÓN	360.421 m E	7.953.462 m S

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7-35: Ubicación nodo agitación dentro de zona abrigada.

Fuente: Google Earth Pro.

Se extrajeron los resultados para cada estado de mar simulado, exactamente en el último paso del tiempo. Esto se debe a que luego de las 2 horas y 10 minutos de modelación la agitación pasa a generar una condición de estado de mar estable, donde las iteraciones convergen y los valores dentro del dominio varían tendiendo a un número fijo. Para verificar lo anterior se ubicaron tres puntos de control dentro de cada modelo unitario, el primero a los 35, el segundo a los 31 y por último a 14 [mNRS] (ver Figura 7-36). El punto de control de los 35 metros de profundidad se instaló cerca de la paleta generadora de oleaje con el fin de verificar (aparte de lo antes mencionado) que el oleaje en esta zona se acerque a la unidad.

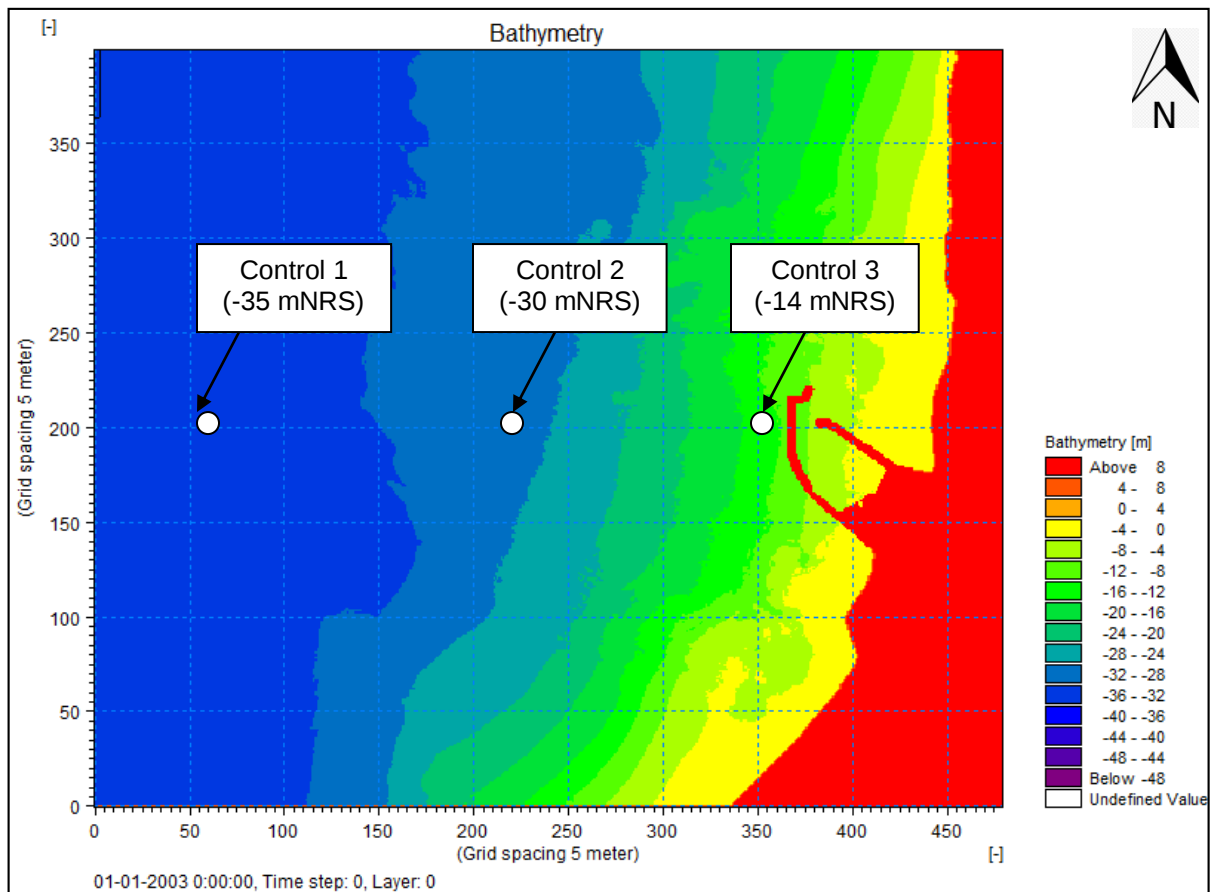


Figura 7-36: Puntos de control, verificación convergencia.

Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

La figura anterior ilustra los puntos de control antes mencionados para la condición SW.

Por tanto, para cada configuración se solicitaron las series de tiempo de las alturas significativas durante todo el periodo de simulación (3 horas). A continuación, en la Figura 7-37 se presenta una figura que muestra la evolución en los coeficientes de agitación.

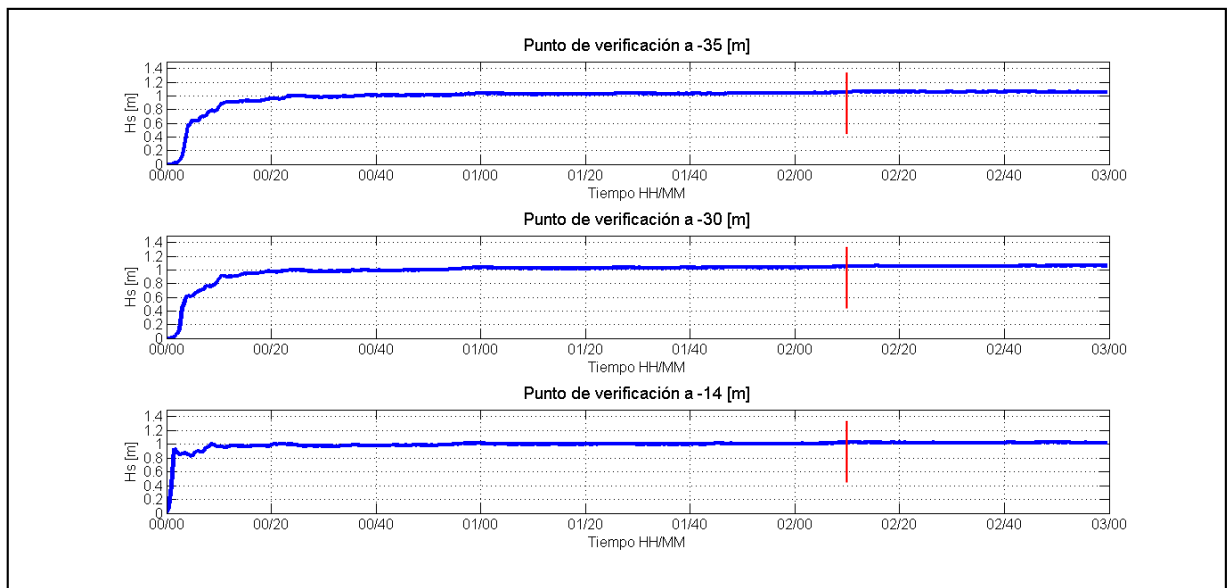


Figura 7-37: Puntos verificación Hs, convergencia de valores.
Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, pasadas las 2 horas y 10 minutos de simulación las alturas significativas indican que existe una condición estable (valores convergen), por lo que se justifica realizar una modelación de tres horas. Además, en el punto de verificación ubicado cercano a los -35 [mNRS], se puede apreciar que en el último paso del tiempo es muy cercano a la unidad, lo que indica que el modelo de agitación no sobrevalora ni subestima los coeficientes. Cabe destacar que el procedimiento de verificación se efectuó para todas las modelaciones de los casos unitarios de la Tabla 7-31.

Teniendo en cuenta lo anterior es que se extrajeron los coeficientes de agitación al término de la tercera hora de modelación, los cuales fueron utilizados para transferir el oleaje desde el punto de interés hasta el interior de la zona abrigada, específicamente en el Nodo de agitación definido en la Tabla 7-33. Con lo anterior, se obtuvieron tablas de incidencias (Hs vs Tp) con el resumen del clima de oleaje dentro de la dársena para las direcciones 228, 240, 255 y 270[°].

Clima de oleaje interior dársena alternativa 1

La distribución de oleaje proveniente desde el SW dentro de la dársena posee alturas significativas máximas entre los 0,4 y 0,45[m] con una ocurrencia del 0,01%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 37,9%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,25[m], correspondiente al 95,9% de de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 12 y 14[s] con una ocurrencia del 45% (ver Tabla 7-34).

Tabla 7-34: Distribución de Hs y Tp para la dirección 225[°], alternativa 1.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0-0,05			111	22	3						136	0,26	100,00
0,05-0,1			1450	2582	6929	103	52	7			11123	21,33	99,74
0,1-0,15			107	619	14994	3064	875	100			19759	37,89	78,41
0,15-0,2				21	1538	8607	1922	211	1		12300	23,59	40,52
0,2-0,25					18	5068	1694	57			6837	13,11	16,94
0,25-0,3						1121	548	24			1693	3,25	3,83
0,3-0,35						111	142	12			265	0,51	0,58
0,35-0,4						8	26				34	0,07	0,07
0,4-0,45							3	1			4	0,01	0,01
Total	0	0	1668	3244	23482	18082	5262	412	1	0	52151	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	3,20	6,22	45,03	34,67	10,09	0,79	0,00	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	96,80	90,58	45,55	10,88	0,79	0,00	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de oleaje proveniente desde los 240[°] dentro de la dársena posee alturas significativas máximas entre los 0,3 y 0,35[m] con una ocurrencia del 0,18%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 42,6%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,25[m] correspondiente al 98% de de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 14 y 16[s] con una ocurrencia del 43% (ver Tabla 7-35).

Tabla 7-35: Distribución de Hs y Tp para la dirección 240[°], alternativa 1.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0-0,05			6	3	1						10	0,04	100,00
0,05-0,1				193	3633	288	133	29	5		4281	15,45	99,96
0,1-0,15				13	4091	5135	2115	390	60		11804	42,61	84,51
0,15-0,2					304	5169	2658	382	94		8607	31,07	41,90
0,2-0,25						1221	1069	141	52		2483	8,96	10,83
0,25-0,3						147	276	36	9		468	1,69	1,87
0,3-0,35						12	31	7			50	0,18	0,18
Total	0	0	6	209	8029	11972	6282	985	220	0	27703	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	0,02	0,75	28,98	43,22	22,68	3,56	0,79	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	99,98	99,22	70,24	27,03	4,35	0,79	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de oleaje proveniente desde los 255[°] dentro de la dársena posee alturas significativas máximas entre los 0,3 y 0,35[m] con una ocurrencia del 0,04%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 59,5%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,2[m] correspondiente al 96,3% de de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 16 y 18[s] con una ocurrencia del 46,7% (ver Tabla 7-36).

Tabla 7-36: Distribución de Hs y Tp para la dirección 255[°], alternativa 1.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,05-0,1					63	160	129	63	8		423	8,77	100,00
0,1-0,15					11	897	1359	505	98		2870	59,48	91,23
0,15-0,2						413	633	194	113		1353	28,04	31,75
0,2-0,25						23	118	14	8		163	3,38	3,71
0,25-0,3						1	12	1			14	0,29	0,33
0,3-0,35							2				2	0,04	0,04
Total	0	0	0	0	74	1494	2253	777	227	0	4825	Nº Datos	
A(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,53	30,96	46,69	16,10	4,70	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,47	67,50	20,81	4,70	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de oleaje proveniente desde el NW dentro de la dársena posee alturas significativas máximas entre los 0,25 y 0,3[m] con una ocurrencia del 0,05%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 62,7%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,2[m] correspondiente al 98,7% de de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 16 y 18[s] con una ocurrencia del 51,46% (ver Tabla 7-37).

Tabla 7-37: Distribución de Hs y Tp para la dirección 270[°], alternativa 1.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,05-0,1					23	278	131	6			438	22,77	100,00
0,1-0,15					2	408	704	89	3		1206	62,68	77,23
0,15-0,2						60	148	33	14		255	13,25	14,55
0,2-0,25						1	6	6	11		24	1,25	1,30
0,25-0,3							1				1	0,05	0,05
Total	0	0	0	0	25	747	990	134	28	0	1924		
A(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	38,83	51,46	6,96	1,46	0,00	N° Datos		
C(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,70	59,88	8,42	1,46	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

Dado lo anterior es posible concluir que dentro de la dársena para todas las direcciones propagadas existen alturas de olas entre los 0,0 y 0,45[m], donde el rango más ocurrente se ubica entre los 0,1 y 0,15[m] con periodos que van entre los 12 hasta los 18[s].

La cantidad de estados de mar propagados desde el punto de interés hasta el nodo de agitación fue de 86.603 (producto de la sumatoria de todas las direcciones involucradas), correspondientes al 98,8% del total de los datos aguas profundas.

Para determinar la operatividad, en base a los resultados obtenidos de la transferencia de oleaje al nodo de agitación (Tabla 7-33), es necesario verificar las curvas de excedencia, las cuales se presentan a continuación en la Figura 7-38.

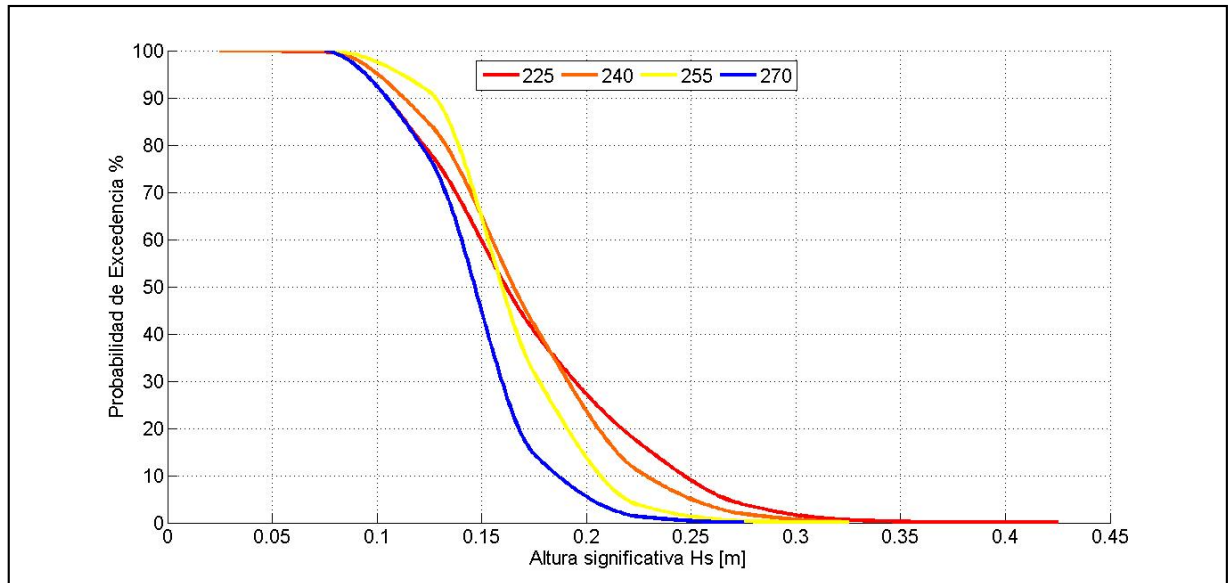


Figura 7-38: Probabilidades de excedencia de alturas de H_s , dársena, layout 1.

Fuente: Elaboración propia.

Mediante la figura anterior es posible ver que la probabilidad de que existan olas mayores a los 0,3[m] son muy bajas, menores al 1%. Del mismo modo, la probabilidad de que existan alturas de olas superiores a los 0,075[m] es del 100%.

Clima de oleaje interior dársena alternativa 2

Para la dirección proveniente desde el SW es posible apreciar que las alturas significativas del oleaje al interior de la dársena no superan los 0,4[m] (ver Tabla 7-38), en donde las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una ocurrencia del 39,5 %. Además es posible considerar que la frecuencia de alturas de olas entre los 0,05 y 0,25[m] es del 96%. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 12 y 14[s] con una ocurrencia del 45% (ver Tabla 7-38).

Tabla 7-38: Distribución de Hs y Tp para la dirección 225[°], alternativa 2.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0-0,05			822	26	5						853	1,63	100,00
0,05-0,1			845	2771	8013	187	107	15			11938	22,85	98,37
0,1-0,15			1	433	14261	4527	1256	148	26		20652	39,53	75,52
0,15-0,2				14	1193	8978	2167	180	45		12577	24,07	35,99
0,2-0,25					10	3781	1339	41	17		5188	9,93	11,92
0,25-0,3						560	313	24	9		906	1,73	1,99
0,3-0,35						48	73	3			124	0,24	0,25
0,35-0,4						1	7	1			9	0,02	0,02
Total	0	0	1668	3244	23482	18082	5262	412	97	0	52247	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	3,19	6,21	44,94	34,61	10,07	0,79	0,19	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	96,81	90,60	45,65	11,05	0,97	0,19	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de oleaje proveniente desde los 240[°] dentro de la zona abrigada posee alturas significativas máximas entre los 0,25 y 0,3[m] con una ocurrencia del 0,14%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 49,5%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,2[m] correspondiente al 97,4% de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 14 y 16[s] con una ocurrencia del 43% (ver Tabla 7-39).

Tabla 7-39: Distribución de Hs y Tp para la dirección 240[°], alternativa 2.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0-0,05			6	45	29						80	0,29	100,00
0,05-0,1				164	5981	1874	742	168	24		8953	32,32	99,71
0,1-0,15					1994	7689	3405	527	102		13717	49,51	67,39
0,15-0,2					25	2223	1750	239	81		4318	15,59	17,88
0,2-0,25						177	363	44	13		597	2,16	2,29
0,25-0,3						9	22	7			38	0,14	0,14
Total	0	0	6	209	8029	11972	6282	985	220	0	27703	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	0,02	0,75	28,98	43,22	22,68	3,56	0,79	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	99,98	99,22	70,24	27,03	4,35	0,79	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de oleaje proveniente desde los 255[°] dentro de la zona abrigada posee alturas significativas máximas entre los 0,25 y 0,3[m] con una ocurrencia del 0,10%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 64,25%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de

olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,2 [m], correspondiente al 98 % de de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 16 y 18[s] con una ocurrencia del 47% (ver Tabla 7-40).

Tabla 7-40: Distribución de Hs y Tp para la dirección 255[°], alternativa 2.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,05-0,1					61	250	268	95	11		685	14,20	100,00
0,1-0,15					13	926	1474	553	134		3100	64,25	85,80
0,15-0,2						309	435	122	81		947	19,63	21,55
0,2-0,25						9	71	7	1		88	1,82	1,93
0,25-0,3							5				5	0,10	0,10
Total	0	0	0	0	74	1494	2253	777	227	0	4825	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,53	30,96	46,69	16,10	4,70	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,47	67,50	20,81	4,70	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

La distribución de oleaje proveniente desde el NW posee alturas significativas máximas entre los 0,3 y 0,35[m] con una ocurrencia del 0,05%. Además, las alturas más frecuentes se ubican entre los 0,1 y 0,15[m] con una frecuencia de aparición del 58%. Del mismo modo, es posible considerar un rango más extenso como alturas de olas más frecuentes, el cual varía entre los 0,05 y 0,2[m], correspondiente al 96% de de la muestra analizada. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 16 y 18[s] con una ocurrencia del 51% (ver Tabla 7-41).

Tabla 7-41: Distribución de Hs y Tp para la dirección 270[°], alternativa 2.

Altura Significativa [m]	Periodo Peak [s]										Total	A(%)	C(%)
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22+			
0,05-0,1					12	66	31	6			115	5,98	100,00
0,1-0,15					11	408	598	92	10		1119	58,16	94,02
0,15-0,2					2	241	320	32	18		613	31,86	35,86
0,2-0,25						29	39	4			72	3,74	4,00
0,25-0,3						3	1				4	0,21	0,26
0,3-0,35							1				1	0,05	0,05
Total	0	0	0	0	25	747	990	134	28	0	1924	N° Datos	
A(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	38,83	51,46	6,96	1,46	0,00			
C(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,70	59,88	8,42	1,46	0,00			

Fuente: Elaboración propia.

Dado lo anterior es posible concluir que dentro de la dársena para todas las direcciones propagadas existen alturas de olas entre los 0,0 y 0,4[m], donde el rango más ocurrente se ubica entre los 0,1 y 0,15[m] con periodos que van entre los 12 hasta los 18[s].

La cantidad de estados de mar propagados desde el punto de interés hasta el nodo de agitación fue de 86603 (producto de la sumatoria de todas las direcciones involucradas), correspondientes al 98.8 % del total de los datos de aguas profundas.

Mediante la Figura 7-39 es posible ver que la probabilidad de que existan olas mayores a los 0,3[m] tienden a cero. Del mismo modo, la probabilidad de que existan alturas de olas superiores a los 0,075[m] es del 100%.

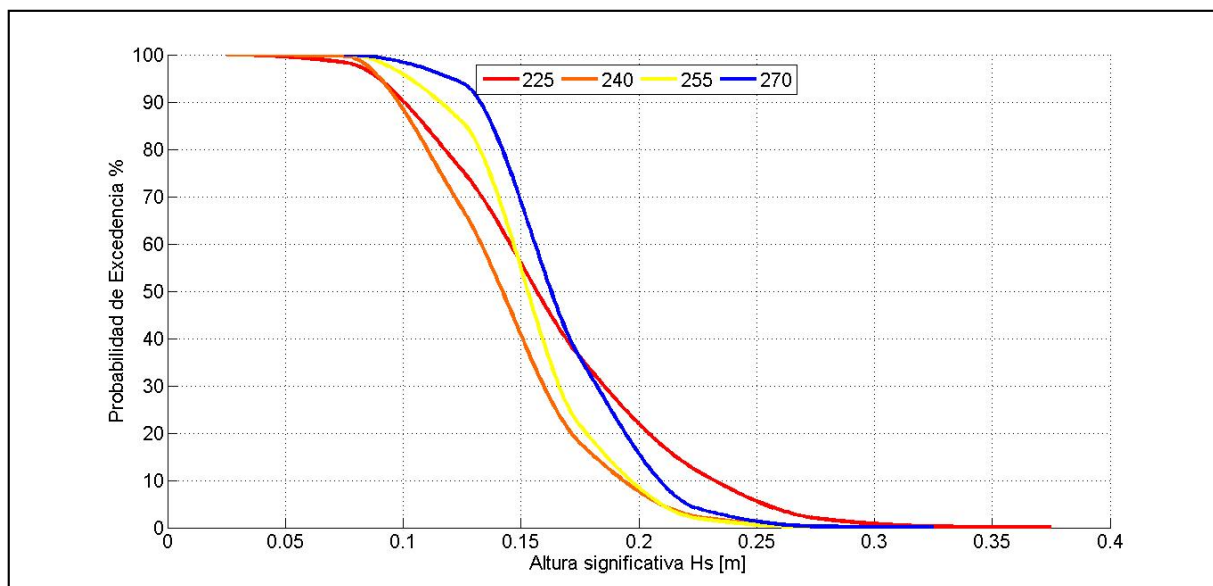


Figura 7-39: Probabilidades de excedencia de alturas de H_s , dársena, layout 2.

Fuente: Elaboración propia.

7.5.3. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE LAYOUT

Las actividades dentro de la dársena o zona de abrigo generada por las estructuras de protección, constan del manejo, fondeo y atraque de embarcaciones menores. Para garantizar que el oleaje dentro de la dársena se encuentre dentro de los límites recomendados por la ROM 3.1-99 (ver Tabla 7-42), se determina que la máxima altura de ola significativa dentro de la dársena debe ser en torno a los 0,4[m].

Tabla 7-42: Condiciones límites de operación naves menores y mayores.

	Velocidad absoluta del viento $V_{10,1 \text{ min}}$	Velocidad absoluta de la corriente $V_{0,1 \text{ min}}$	Altura de ola H_s
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m ³	22 m/s	1.5 m/s	1.2 m/s
> 60.000 m ³	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m/s
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	1.5 m/s	0.6 m
• Acciones en sentido transversal al muelle			
— Petroleros			
< 30.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.0 m
30.000-200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.2 m
> 200.000 TPM	20 m/s	0.7 m/s	1.5 m
— Graneleros			
Cargando	22 m/s	0.7 m/s	1.0 m
Descargando	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Transportadores de Gases Licuados			
< 60.000 m ³	16 m/s	0.5 m/s	0.8 m
> 60.000 m ³	16 m/s	0.5 m/s	1.0 m
— Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
— Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Transatlánticos y Cruceros (1)	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
— Pesqueros de pesca fresca	22 m/s	0.7 m/s	0.4 m

Fuente: (ROM, 2000).

En la Tabla 7-43 se expone un segundo criterio denominado PIANC, el cual indica valores de alturas de olas significativas recomendadas para operatividad de embarcaciones dentro de puertos, en donde si se considera solo la operación de **Naves Menores**¹⁸ dentro de la dársena. Este criterio apunta a considerar periodo del oleaje, tipo de ola enfrentada y altura de ola máxima. Por lo tanto, si se consideran naves menores de máximo 15 metros de eslora y periodos mayores a 5 segundos, es posible apreciar que si las embarcaciones enfrentan la ola por las bandas de estribor o babor (Beam Sea) el valor de altura de ola máxima recomendada es de 0,2 metros y de 0,3 metros para Head Sea (enfrentamiento del oleaje por la proa).

¹⁸ La eslora máxima de una Nave Menor es de 15 metros de longitud.

Tabla 7-43: Criterio de PIANC para operación de embarcaciones en puertos.

Ship Length (m)	Beam/Quartering Seas		Head Seas	
	Period (s)	Height H_s (m)	Period (s)	Height H_s (m)
4 - 10	< 2	0.20	< 2.5	0.20
	2 - 4	0.10	2.5 - 4	0.15
	> 4	0.15	> 4	0.20
10 - 16	< 3	0.25	< 3.5	0.30
	3 - 5	0.15	3.5 - 5.5	0.20
	> 5	0.20	> 5.5	0.30
20 m	< 4	0.30	< 4.5	0.30
	4 - 6	0.15	4.5 - 7.0	0.25
	> 6	0.25	> 7.0	0.30

Fuente: (Permanent International Association of Navigation Congresses, 1995).

Dado lo anterior y conociendo las probabilidades de excedencia de las alternativas de layout para cada dirección, se definen las condiciones de operación límite utilizando el total de los datos transferidos al nodo de agitación (86603 datos) para condiciones de oleaje superiores a los 0,30[m] de altura significativa, valor más conservador con respecto al criterio de PIANC.

Tabla 7-44: Operatividad dentro de dársena según alternativas.

Condición	Excedencia	No Excedencia
Alternativa 1	0,05%	99,95%
Alternativa 2	0,01%	99,99%

Fuente: Elaboración propia.

Dadas las condiciones límites de operatividad en las dársenas de las alternativas proyectadas, se tiene que ambas cumplen el criterio propuesto en las tablas Tabla 7-42 y Tabla 7-43, sin embargo la alternativa 2 propone no superar alturas de olas mayores a los 0,30[m] el 99.99% del tiempo. Es por esto que se concluye que **la alternativa 2 es la más óptima** considerando solo la operatividad en base a las alturas significativas del oleaje al interior de la zona abrigada.

Es necesario aclarar que el presente estudio no considera para la operatividad condiciones climáticas con respecto a vientos, neblina, entre otros criterios que utiliza la Autoridad

Marítima Local para el cierre de puerto, dado esto es que los resultados son solo referenciales a una condición particular.

7.6. CLIMA DE OLEAJE EN ZONA EXPUESTA DEL ROMPEOLAS

Para la caracterización del oleaje en la cara expuesta de la alternativa seleccionada, fue necesario dividir la estructura en seis secciones o tramos como muestra la siguiente figura.

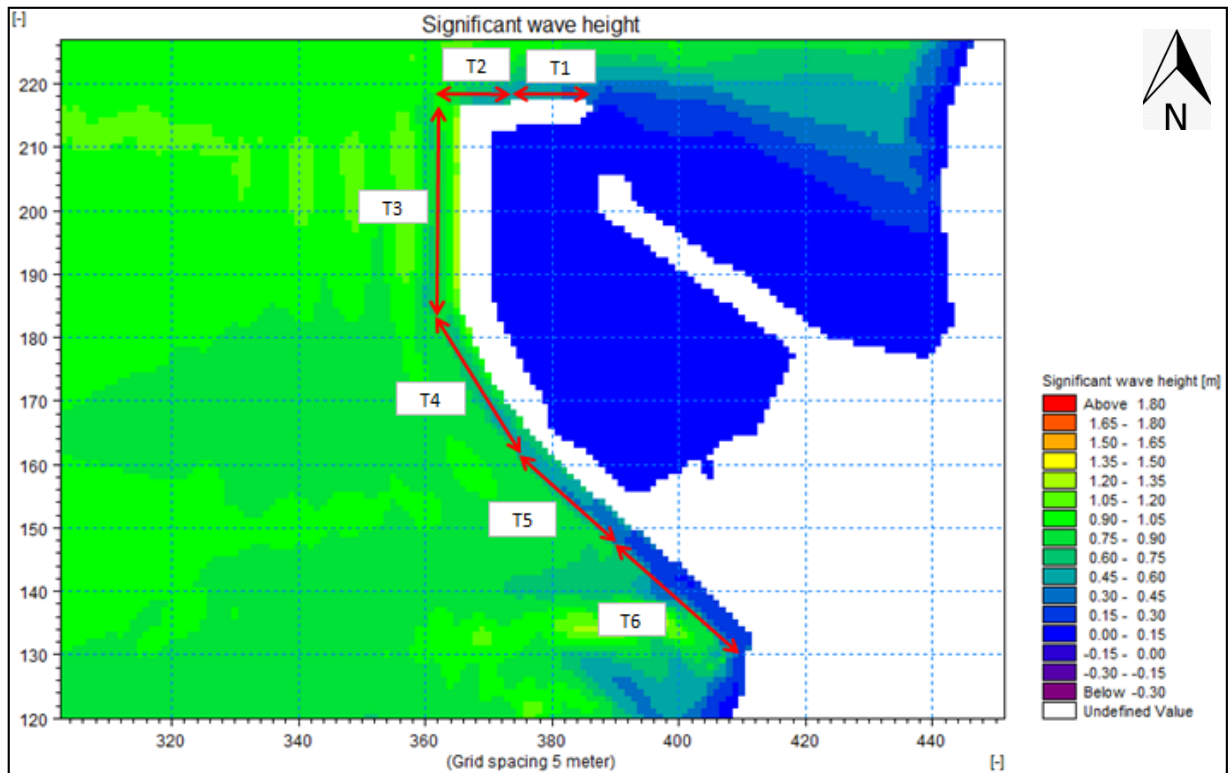


Figura 7-40: Tramos de secciones estructura de protección principal.

Fuente: Elaboración propia en MIKE ZERO.

Cabe destacar que junto con la identificación de tramos, se estimó solicitar los resultados de agitación a una distancia de 25[m] con respecto a la línea demarcada por la defensa.

Junto con lo anterior, los coeficientes identificados en cada tramo fueron promediados para caracterizarlos en un solo parámetro de agitación, el cual fue utilizado para la transferencia de los estados de mar desde el punto de interés a los sitios antes mencionados (Figura 7-40).

A continuación, se presentan dos metodologías utilizadas para el cálculo de las alturas de olas frente a la estructura.

- Metodología 1: Clima de oleaje medio con el 98% del total de los 30 años de estados de mar propagados desde el sitio de interés hacia la estructura.

- Metodología 2: Utilizando el clima de oleaje extremo, se propagó la altura de ola extrema hacia la estructura utilizando los coeficientes de agitación generados en el acápite 7.5.2.2 para distintos periodos y direcciones.

7.6.1. METODOLOGÍA 1

En este proceso se confeccionaron tablas de incidencia con la distribución de las frecuencias para alturas significativas y periodos, con cada dirección propagada y para cada tramo de la estructura. Además, se realizaron a modo de resumen curvas de excedencia en toda la extensión de la defensa costera analizada, las cuales se presentan a continuación.

TRAMO 1

Para el Tramo 1 la dirección más desfavorable corresponde a la 240[°] debido a que para una misma probabilidad de excedencia las alturas de olas son mayores. Además, las alturas sobre los 3 metros poseen una probabilidad de excedencia entre el 0 y 6%.

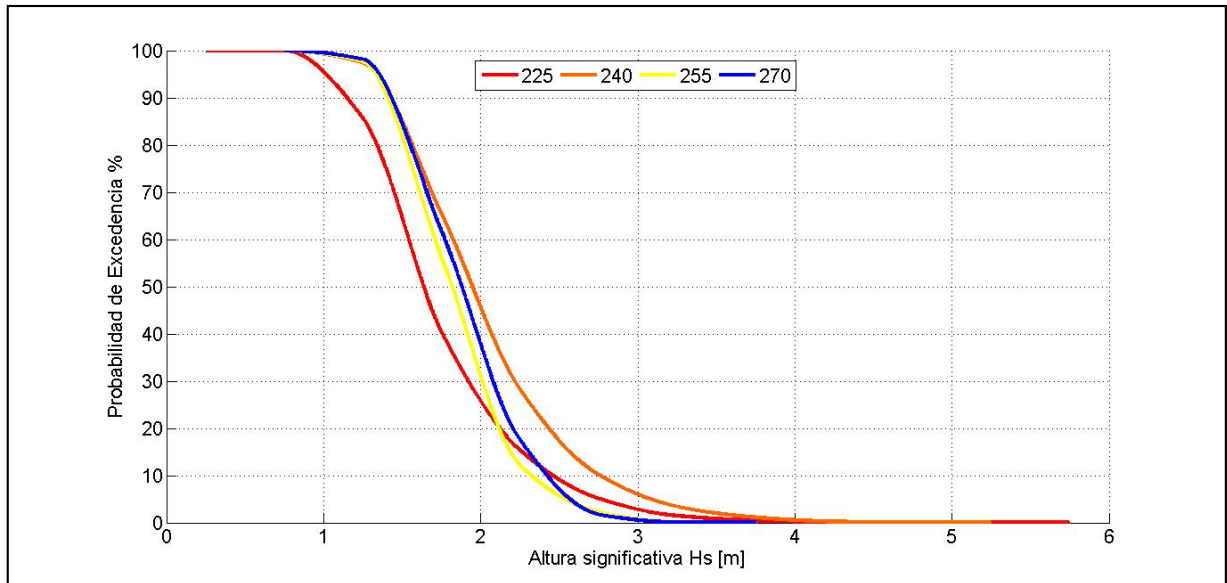


Figura 7-41: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 1.

Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 2

Para el Tramo 2 la dirección más desfavorable sigue siendo la proveniente desde los 240[°]. Además, las alturas sobre los 4 metros poseen una probabilidad de excedencia cercana al 1%.

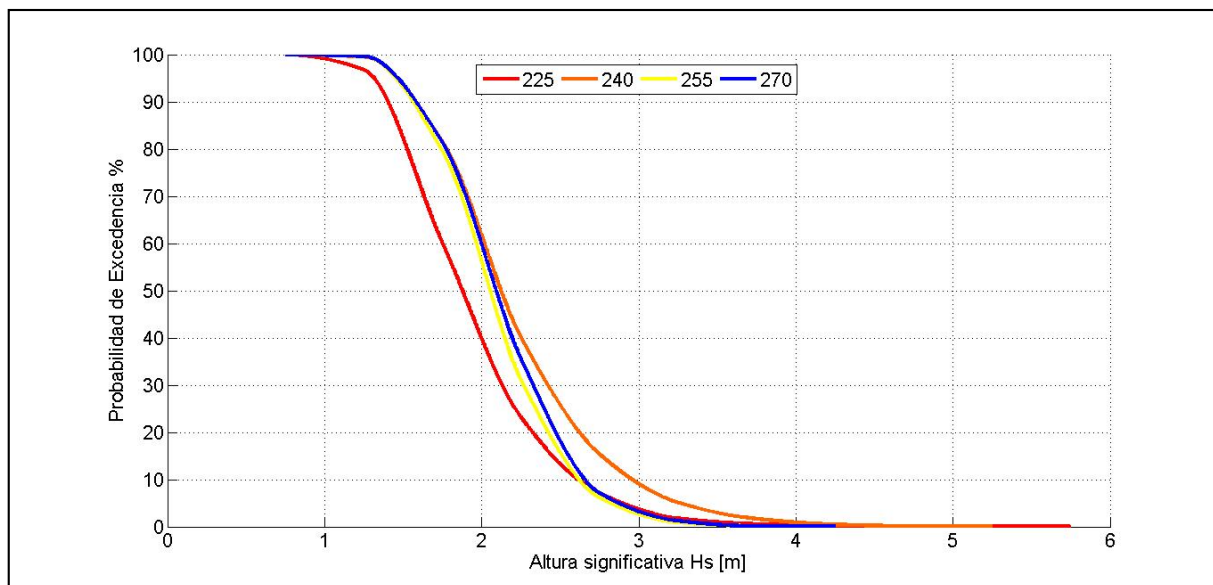


Figura 7-42: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 2.

Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 3

Para el Tramo 3 la dirección más desfavorable sigue siendo la que proviene desde los 240[°]. Además, las alturas sobre los 3,5 metros, para las direcciones 255 y 270[°] poseen una probabilidad de excedencia del 0%, mientras que las direcciones restantes poseen la misma característica para alturas superiores a los 5 metros.

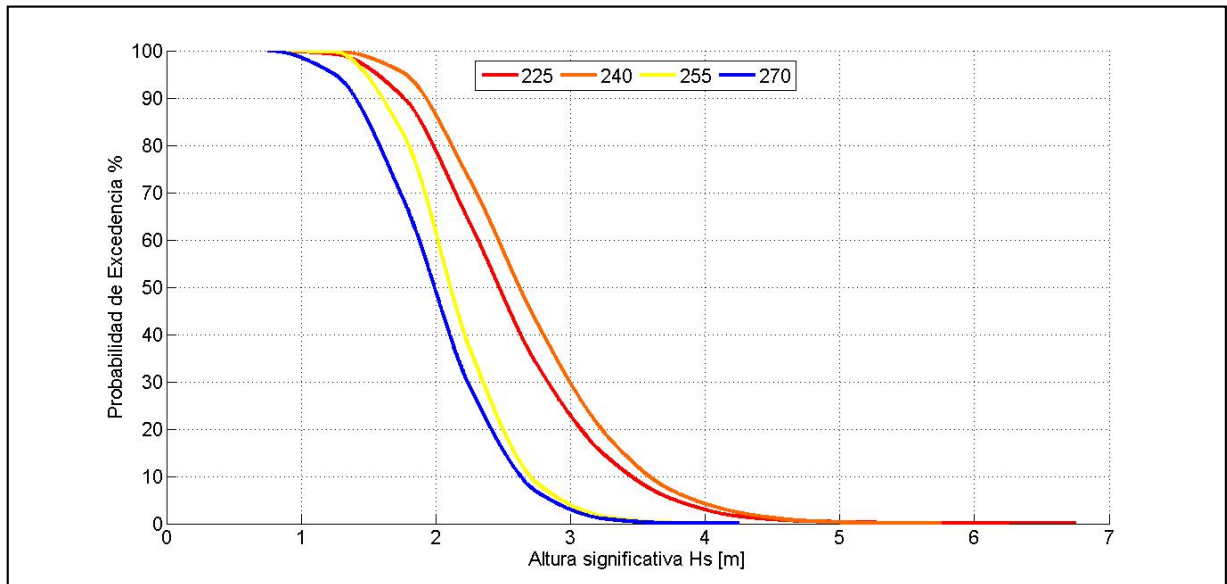


Figura 7-43: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 3.

Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 4

Para el Tramo 4 la dirección más desfavorable sigue siendo la que proviene desde los 240[°]. Además, la probabilidad de excedencia para esta misma dirección es cercana a 0% cuando las alturas de olas superan los 5,5 metros.

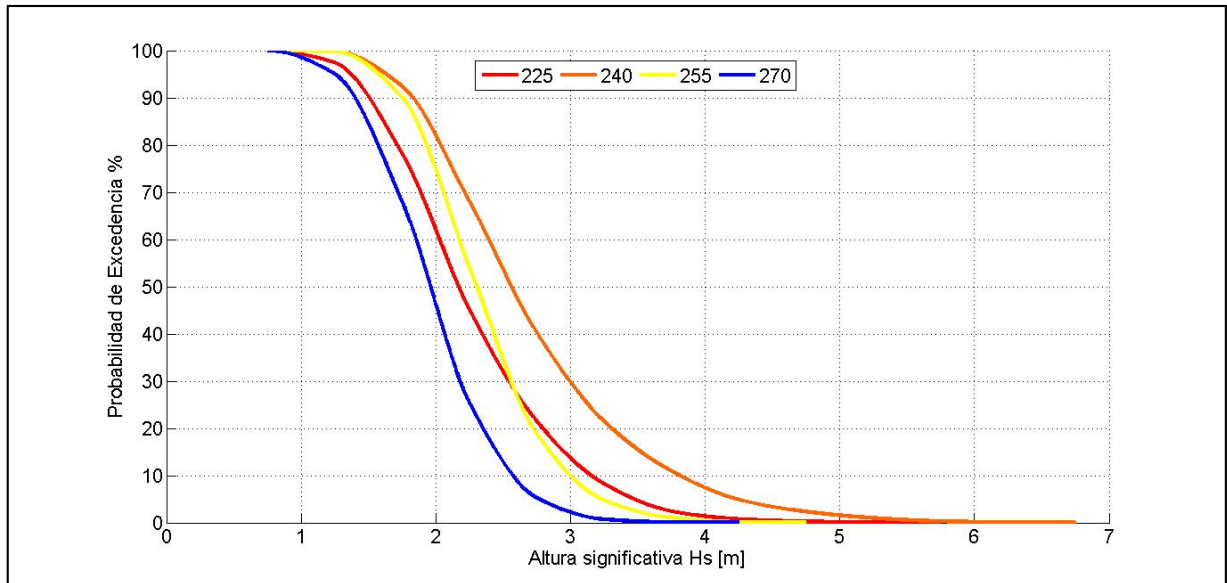


Figura 7-44: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 4.

Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 5

Para el Tramo 5 la dirección más desfavorable no se encuentra muy bien definida, se mantiene entre los 225 y 255[°]. Además, las probabilidades de excedencia para estas mismas direcciones se encuentran cercanas a 0% cuando las alturas de olas superan los 5 metros.

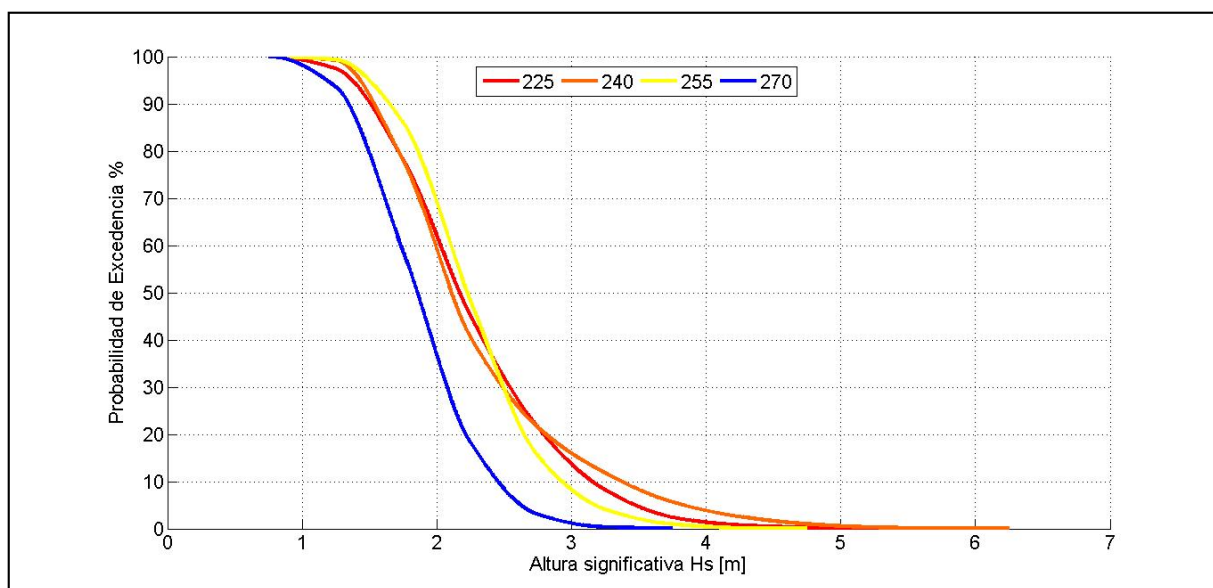


Figura 7-45: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 5.

Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 6

Para el Tramo 6 la dirección más desfavorable se mantiene en los 240[°]. Además, para una probabilidad de excedencia del 0% las alturas de olas recién corresponden a los 5 metros para todos los casos analizados.

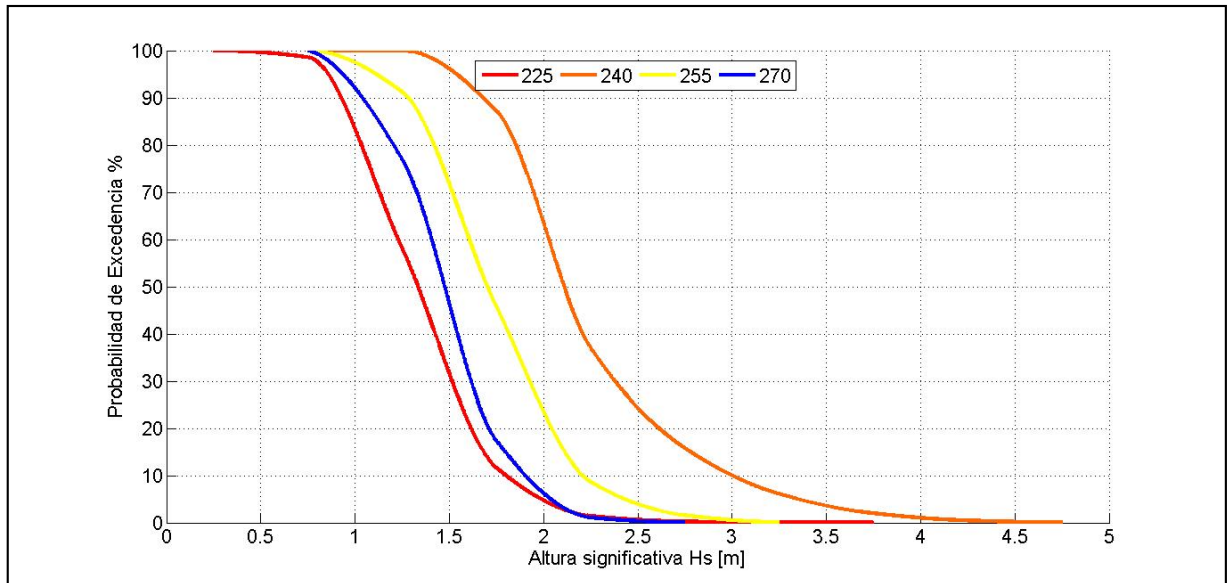


Figura 7-46: Probabilidades de excedencia de alturas de olas significativas, TRAMO 6.

Fuente: Elaboración propia.

7.6.2. METODOLOGÍA 2

El periodo de retorno (definido en el acápite 7.1) es de 70 años, considerando además el clima extremo anteriormente realizado, se tiene que la altura de ola extrema corresponde a 4,7 metros.

Dado lo anterior y en sustento al clima de oleaje medio realizado en el sitio de interés, se tiene que la ola de diseño debe ser propagada para las direcciones 225, 240, 255 y 270[°], con periodos peaks entre los 8 y 20 segundos utilizando los coeficientes de agitación resultantes de los modelos de agitación realizados con MIKE 21 BW (ver acápite 7.5.2.2). En la siguiente tabla es posible apreciar los resultados del análisis planteado anteriormente.

Tabla 7-45: Oleaje para 70 años de Tr transferido al pie de la estructura.

TRAMOS		Periodo peak [s]							TRAMOS		Periodo peak [s]						
		8	10	12	14	16	18	20			8	10	12	14	16	18	20
Dirección 225 [°]	Tramo 1	2.5	2.8	2.9	3.4	4.2	4.7	5.1	Dirección 255 [°]	Tramo 1	3.1	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	5.2
	Tramo 2	3.1	3.4	3.5	3.7	4.1	4.6	5.3		Tramo 2	3.4	3.9	4.0	4.3	4.2	4.6	5.2
	Tramo 3	2.9	3.1	3.3	3.8	3.8	4.2	5.0		Tramo 3	3.1	2.9	3.2	3.5	3.7	3.9	4.7
	Tramo 4	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	4.0	4.7		Tramo 4	3.1	2.9	3.2	3.9	4.1	4.3	4.9
	Tramo 5	2.6	2.7	2.8	3.2	3.6	3.9	4.2		Tramo 5	3.0	3.0	3.3	3.9	4.2	4.7	5.1
	Tramo 6	1.7	2.0	2.0	2.6	2.8	3.1	3.1		Tramo 6	2.6	2.8	3.0	3.2	3.5	3.7	4.0
Dirección 240 [°]	Tramo 1	3.1	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	5.2	Dirección 270 [°]	Tramo 1	3.1	3.2	3.9	4.2	4.5	4.5	5.2
	Tramo 2	3.4	3.9	4.0	4.3	4.2	4.6	5.2		Tramo 2	3.1	3.3	3.7	4.0	4.4	4.3	5.4
	Tramo 3	3.1	2.9	3.2	3.5	3.7	3.9	4.7		Tramo 3	2.8	2.9	3.0	3.3	3.5	3.9	4.1
	Tramo 4	3.1	2.9	3.2	3.9	4.1	4.3	4.9		Tramo 4	2.3	2.4	2.8	3.4	3.6	4.2	4.3
	Tramo 5	3.0	2.9	3.3	3.9	4.2	4.7	5.1		Tramo 5	2.0	2.4	2.8	3.4	3.7	4.2	4.5
	Tramo 6	2.6	2.8	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0		Tramo 6	1.8	2.3	2.5	2.8	3.4	3.3	3.8

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7-45 muestra un resumen con la transferencia de la altura de ola extrema para un periodo de retorno de 70 años en el pie de la estructura proyectada. Se observa que los casos más desfavorables se concentran para un periodo peak de 20 segundos en los tramos 1, 2 y 3 para todas las direcciones analizadas. Sin embargo, recurriendo al análisis de clima medio en el sitio de interés, realizado en el acápite 7.3.6, se tiene que el periodo y dirección más frecuente del oleaje se ubica entre los 12 y 16 segundos con una probabilidad conjunta del 73%, en donde la dirección más frecuente corresponde a la SW.

A continuación, los resultados expuestos en la Tabla 7-45 se expresan mediante 4 figuras, cada uno para cada dirección analizada.

En la Figura 7-47 se observa que para los periodos más frecuentes (12, 14 y 16 segundos) las alturas de olas extremas fluctúan entre los 3,5 y casi 4 metros.

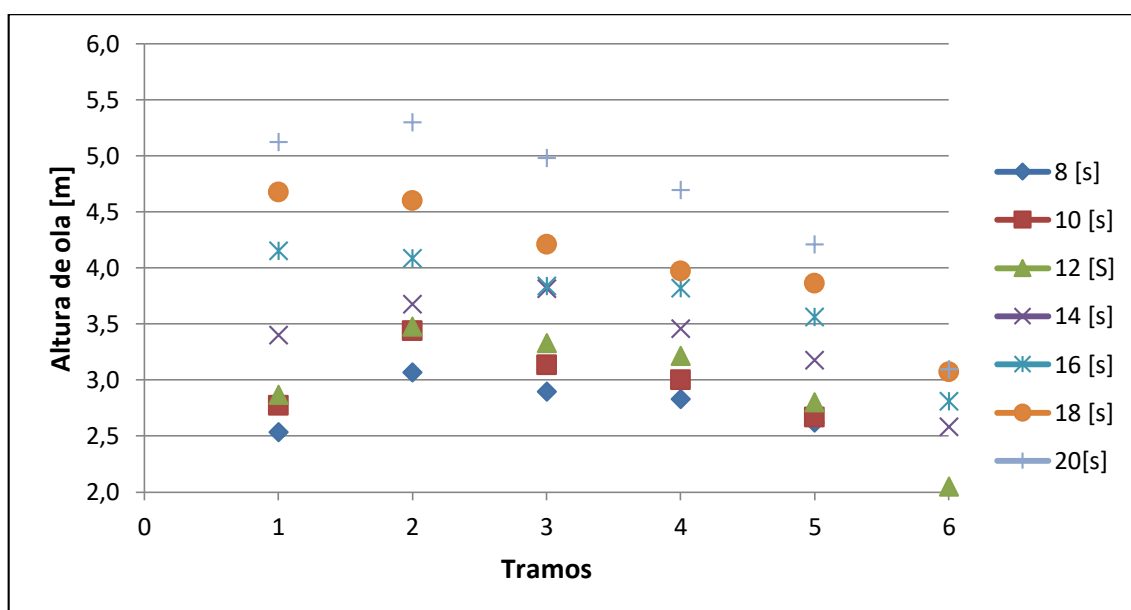


Figura 7-47: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 225[°].

Para la condición de oleaje proveniente desde los 240[°] es posible concluir que los periodos más frecuentes se encuentran asociados a alturas de olas entre los 3,25 y 3,75 metros (ver Figura 7-48).

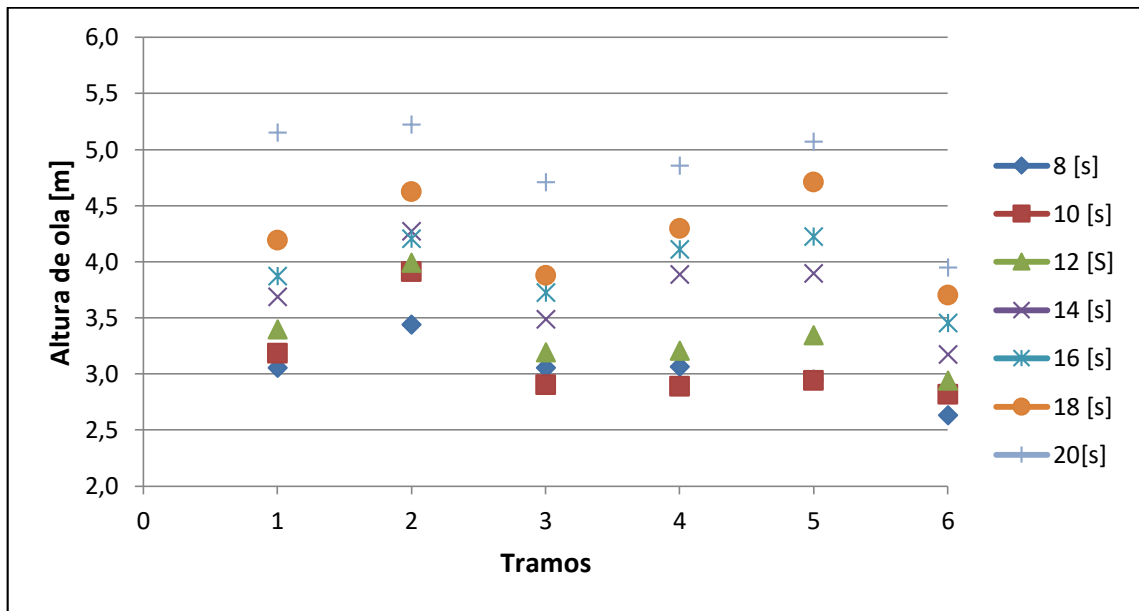


Figura 7-48: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 240[°].

Para la condición de oleaje proveniente desde los 255[°] es posible concluir que los periodos más frecuentes se encuentran asociados a alturas de olas entre los 3,25 y 3,75 metros (ver Figura 7-49).

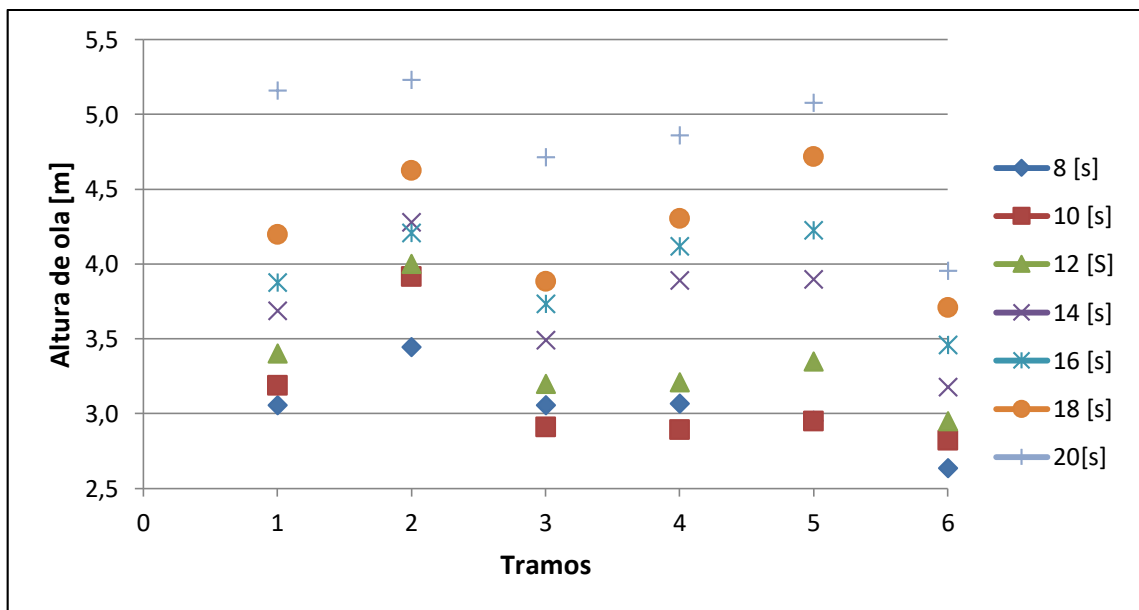


Figura 7-49: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 255[°].

Finalmente, para la condición de oleaje proveniente desde el NW es posible concluir que los periodos más frecuentes se encuentran asociados a alturas de olas entre los 3 y 3,5 metros (ver Figura 7-50).

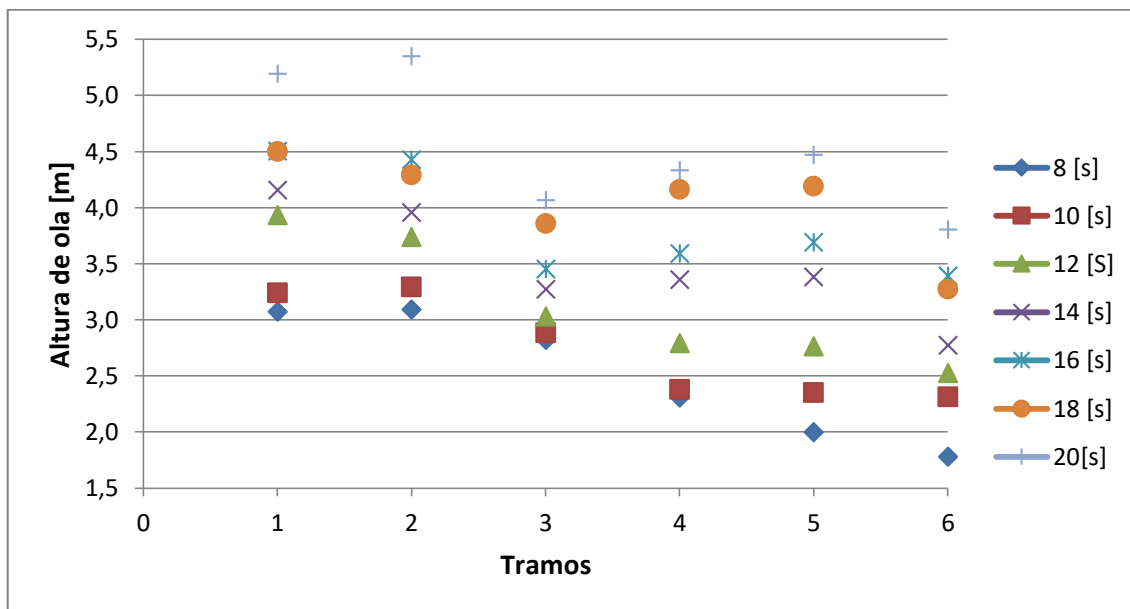


Figura 7-50: Oleaje de retorno transferido al pie de la estructura, dirección 270[°].

7.6.3. OLEAJE DE DISEÑO

De los resultados obtenidos desde la transferencia de la altura de ola extrema hacia la estructura, se tiene que las consideraciones para el cálculo de la altura de ola de diseño corresponden a:

- Probabilidad de excedencia del oleaje sobre la estructura es del 30%, según lo propuesto en el acápite 7.1, de acuerdo a las estimaciones realizadas con la metodología de Zhou Liu & Peter Fregaard (2001).
- El periodo del oleaje más frecuente en el sitio de interés se ubica en torno a los 12 y 16 segundos, con una probabilidad conjunta del 73%. Dado lo anterior, se estima que el periodo peak de diseño es de 16 segundos.
- Al igual que el punto anterior, del análisis realizado con el clima de oleaje en el sitio de interés, las direcciones más frecuentes corresponden al oleaje proveniente del SW y WSW, con un 76,83% y 19,94% de ocurrencia respectivamente. La otra dirección presente (Weste) posee una presencia del 4,6%. Dado lo anterior, y teniendo en cuenta el primer punto de esta lista, se considera como condición de diseño el oleaje proveniente del SW.

La Tabla 7-46 indica el resumen del oleaje de diseño para cada tramo de estructura, encontrando alturas desde los 4,2 metros hasta los 2,8 metros. Dado que hay alturas de olas que se asemejan, específicamente entre los tramos 1 - 2 y 3 - 4, se consideró el uso de 4 tramos, Tramo 11' con una ola de 4,2[m], Tramo 22' con una ola de 3,8[m], Tramo 33' con una ola de 3,6[m] y Tramo 44' con una ola de 2,8[m].

Tabla 7-46: Oleaje de diseño para cada tramo.

Dirección SW - Periodo Peak 16 [s]					
Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
4,2 [m]	4,1 [m]	3,8 [m]	3,8 [m]	3,6 [m]	2,8 [m]
Tramo 11'		Tramo 22'		Tramo 33'	Tramo 44'

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis realizado con la metodología 1, del acápite 7.6.1, es posible verificar que las condiciones de diseño para todos los tramos posee una probabilidad de excedencia menor al 30%.

7.7. DISEÑO DE LA ESCOLLERA

En el presente acápite se definen las condiciones, criterios y valores finales del diseño de la estructura de protección costera proyectada. Para esto, es necesario definir el diseño en tres etapas: a) diseño hidráulico (variables tales como nivel de diseño, caudales de sobrepaso, coronamiento, etc.) y b) diseño estructural (tamaño de los elementos estructurales y disposición geométrica y espacial).

7.7.1. NIVEL DE DISEÑO

Para definir el nivel de diseño se consideran los siguientes antecedentes analizados:

Marea Astronómica

El efecto astronómico tiene relación de las elevaciones del nivel del mar producto de la marea. La acción de la marea se manifiesta en dos aspectos bien diferenciados: un cambio en el nivel del mar y generación de corrientes. El cambio de nivel del mar debido a la acción de la marea astronómica tiene importantes consecuencias en la morfología de las playas por cuanto modifica sustancialmente la propagación del oleaje (asomeramiento, refracción, y muy particularmente la zona de rotura) al variar continuamente la batimetría de la misma.

En la siguiente tabla se presentan los planos mareales llevados al nivel de reducción de sondas local.

Tabla 7-47: Planos Mareales.

Planos de marea c/r NRS	Nivel [m]
Nivel medio del mar	0,77
Altura media de la pleamar	1,23
Altura media de la bajamar	0,31
Altura media de la pleamar más alta	1,35
Altura media de la bajamar más baja	0,28
Altura de la pleamar más alta	1,67
Altura de la bajamar más baja	0,05

Fuente: Elaboración propia.

Para efectos de diseño se considera la condición extrema de mareas o pleamar máxima de **1,67[mNRS]**.

Efectos Meteorológicos (Presión Atmosférica)

La presión atmosférica induce cambios en el nivel del mar: cuando esta presión aumenta (buen tiempo) el nivel del mar disminuye y cuando la presión disminuye el nivel del mar aumenta (tormentas), esto se conoce como efecto barométrico invertido. La presencia de vientos suele encubrir el efecto de la presión en los residuos meteorológicos de la marea.

Como efecto meteorológico se considerarán los **0,30 m**, obtenidos a partir consulta realizada a estación meteorológica en línea “Lluta Bajo” de Agromet en el sitio web <http://agromet.inia.cl>, donde el mínimo valor registrado fue en mayo del año 2018 con un

valor de 983 [hPa]. Sin embargo, para efectos del presente estudio se considerará un valor de **0,22 m**.

Set-up del viento

Para considerar el aumento del nivel del mar producto del efecto friccional del viento, se deben considerar parámetros tales como: longitud del Fetch, velocidad del viento, profundidades de la zona de estudio, ángulo de incidencia del viento, etc.

No se dispone de datos de viento en el sector de estudio, por consiguiente, se considera un valor de sobre-elevación por este efecto de **0,30 m**. Este valor es solo para efectos

Definición del nivel del diseño

El nivel de diseño propuesto corresponde a:

(Ec. 7-1)

$$Z_{DISEÑO} = Z_{AST} + Z_{MPA} + S_{VIENTO}$$

Cada una de las componentes previamente mencionadas es expuesta a continuación:

- Pleamar Máxima (Z_{AST}) : 1,67 [m]
- Marea M. Presión Atmosférica (Z_{MPA}) : 0,22 [m]
- Marea M. Acción del viento (S_{VIENTO}) : 0,30 [m]

Luego, el nivel $Z_{DISEÑO} = \mathbf{2,19\ m}$ sobre el NRS. Para efectos de cálculo se utilizará un $Z_{DISEÑO} = \mathbf{2,20\ m}$.

7.7.2. DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico se orienta a definir las características geométricas de la obra de abrigo, en lo referido a cotas de coronamiento, bermas y disposición de elementos de la coraza. Para ello se establecen las tasas de sobrepaso admisibles y las esperadas para la configuración propuesta.

La cota de coronamiento es determinada considerando la siguiente combinación de eventos:

Pleamar más alta + Marea meteorológica debido a la presión atmosférica + Marea meteorológica debida a la acción del viento.

$$Z_{\text{DISEÑO}} = Z_{\text{AST}} + Z_{\text{MPA}} + S_{\text{VIENTO}}$$

Cada una de las componentes previamente mencionadas es expuesta a continuación:

- Pleamar Máxima (Z_{AST}) : 1,67m
- Marea M. Presión Atmosférica (Z_{MPA}) : 0,22 m
- Marea M. Acción del viento (S_{VIENTO}) : 0,30 m

Luego, el nivel $Z_{\text{DISEÑO}} = 2,19 \text{ m sobre el NRS}$. Para efectos de cálculo del sobrepaso se utilizará un $Z_{\text{DISEÑO}} = 2,20 \text{ m}$.

*Se destaca que el valor asociado al Setup de oleaje no fue utilizado en la determinación del nivel de diseño, ya que las formulaciones que se utilizarán más adelante para el cálculo del sobrepaso consideran implícitamente este efecto.

7.7.3. SOBREPASO ADMISIBLE

Para la determinación del sobrepaso admisible se utilizarán las recomendaciones del EuroTop Segunda Edición 2018.

Las tasas de sobrepaso admisible condicionan la geometría de la estructura de protección. Estos caudales admisibles dependen de cada tipología de obra y de las condiciones de abrigo que se desean proyectar (operatividad en la zona protegida). Dado que el fin de la estructura de defensa es generar espacio para que opere una caleta de pescadores, el criterio de sobrepaso admisible debe ser tal que no se provoquen daños en las embarcaciones menores y en todas las estructuras interiores. En la siguiente tabla se indican ciertos criterios para la definición del sobrepaso admisible.

Tabla 7-48: Criterios de sobrepaso admisible medio.

Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V_{max} (l per m)
Significant damage or sinking of larger yachts; $H_{m0} > 5$ m	>10	$>5,000 - 30,000$
Significant damage or sinking of larger yachts; $H_{m0} = 3-5$ m	>20	$>5,000 - 30,000$
Sinking small boats set 5-10 m from wall; $H_{m0} = 3-5$ m Damage to larger yachts	>5	$>3,000-5,000$
Safe for larger yachts; $H_{m0} > 5$ m	<5	$<5,000$
Safe for smaller boats set 5-10 m from wall; $H_{m0} = 3-5$ m	<1	$<2,000$
Building structure elements; $H_{m0} = 1-3$ m	≤ 1	$<1,000$
Damage to equipment set back 5-10m	≤ 1	$<1,000$

Fuente: (EurOtopII, 2018).

Para el presente estudio se utilizará como criterio que la descarga media de sobrepaso sea menor a 1 l/s por metro lineal de estructura, dado que de esta forma se toma en cuenta una zona segura para embarcaciones menores de hasta 10 metros de eslora, con alturas de ola de 3 a 5 metros.

7.7.4. SOBREPASO ESTIMADO

Para determinar el sobrepaso estimado se recurre al EurOTop 2018, que indica la formulación para calcular el sobrepaso sobre un espigón simple como es el caso de estudio

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0.1035 * \exp \left[- \left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0} * \gamma_f * \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad (\text{Ec. 7-2})$$

Para pendientes 1: 2 a 1: 4/3

Donde:

q : Caudal de sobrepaso medio por metro lineal de estructura

g : Aceleración de gravedad

H_{m0} : Altura de ola al pie de la obra

R_c : Francobordo¹⁹ del rompeolas

γ_f : Factor de reducción por el tipo de coraza

γ_β : Factor de reducción por el efecto de oblicuidad del oleaje

Se considerará un γ_f de 0,52 para el caso de las rocas (2 layers), 0,5 para el caso de los cubos (2 layers) y de 0,46 para cubípodos (1 layer). Se ha determinado inicialmente 2 capas de rocas y 2 capa para cubos y 1 para cubípodos cubípodos.

Para determinar el factor de reducción por concepto de oblicuidad del oleaje se recurre a la siguiente formulación:

$$\gamma_\beta = 1 - 0,0063|\beta| \text{ para } 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \quad (\text{Ec. 7-3})$$

Para $|\beta| > 80^\circ$ utilizar $\beta = 80$.

Donde β corresponde al ángulo que se forma por el frente de oleaje incidente al espigón. En este caso determinado este ángulo en 0° . Por lo tanto $\gamma_\beta = 1,00$.

Dado que se tiene la estadística de los **30 años** de oleaje al pie rompeolas, se determinará el sobrepaso asociado a uno de estos estados de mar. Cabe señalar que los resultados irán por el lado de la seguridad considerando que se mantendrá constante el nivel de diseño que considera una pleamar máxima para todos los estados de mar durante **30 años**.

Para la obtención de los caudales de sobrepaso se analizaron variados casos para cada tramo de estructura y coronación, inicialmente y para cada uno se obtuvo la estadística de oleaje al pie de la obra. En la siguiente figura se presentan las probabilidades de excedencia para cada tramo de la estructura, identificando que el tramo más crítico corresponde al 11'.

¹⁹

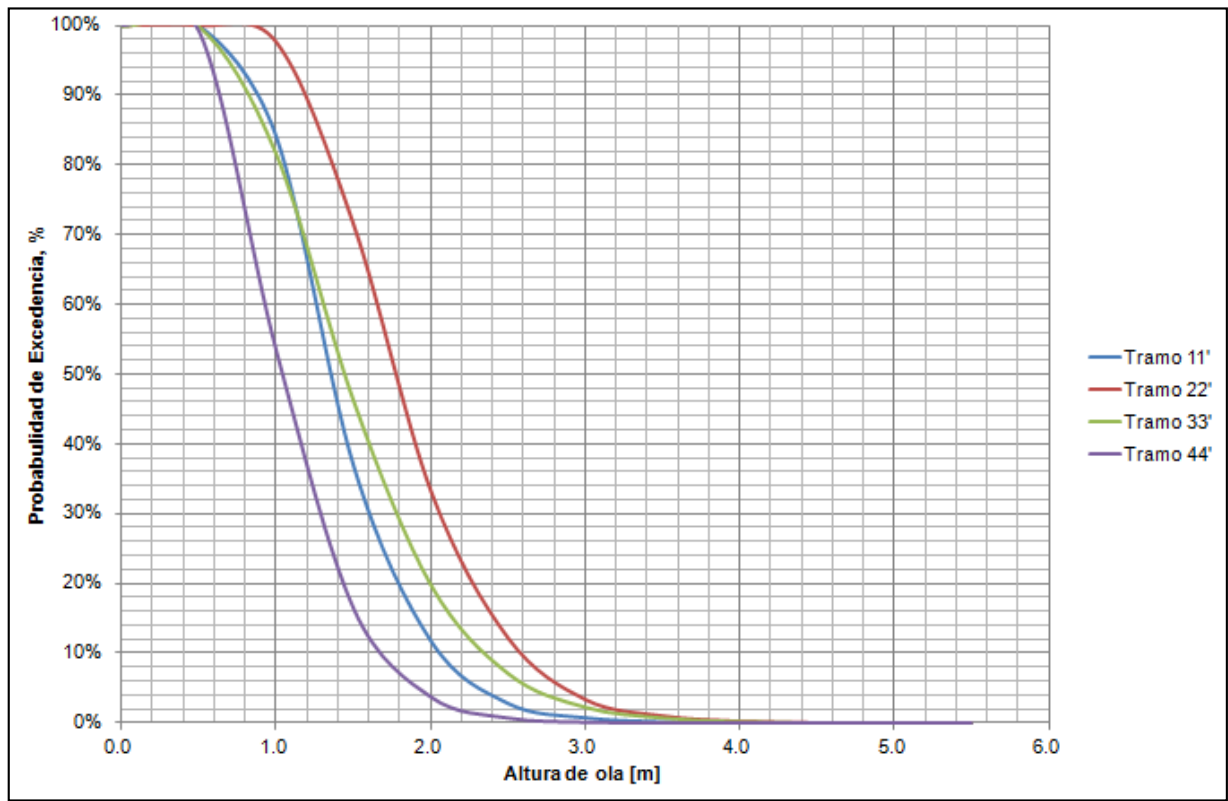


Figura 7-51: Probabilidad de excedencia 30 años de oleaje pie de la obra.

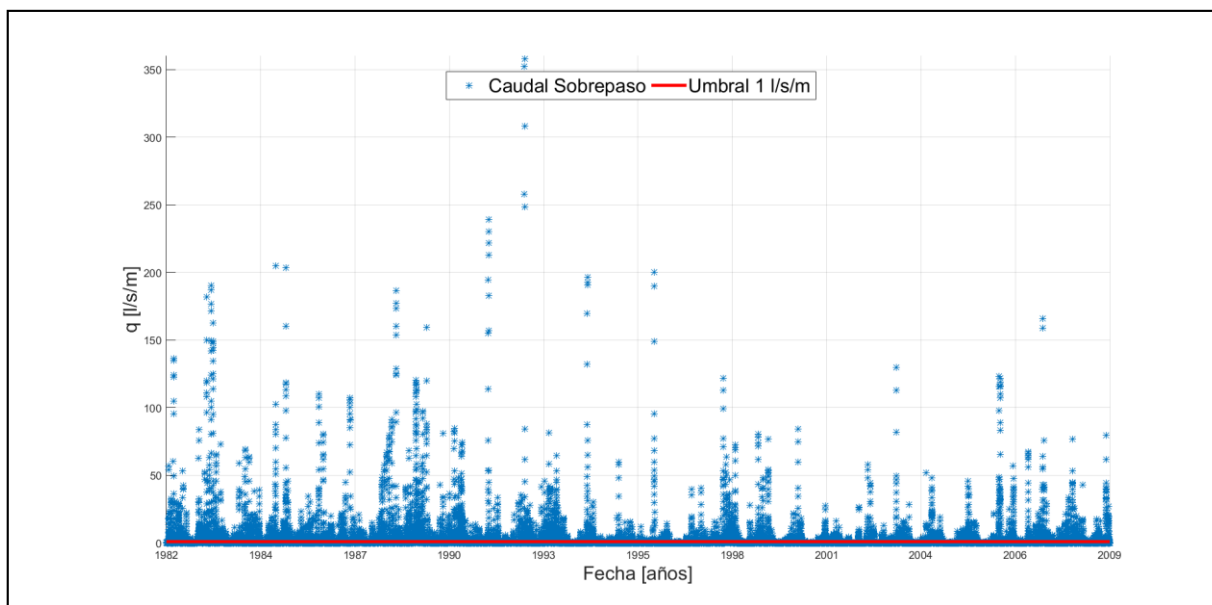
Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el Tramo 11' sea el más crítico en términos de mayor probabilidad de excedencia para una misma ola, este y todos los demás tramos poseen una probabilidad de que las alturas de ola sobre los 4 metros sea casi nula.

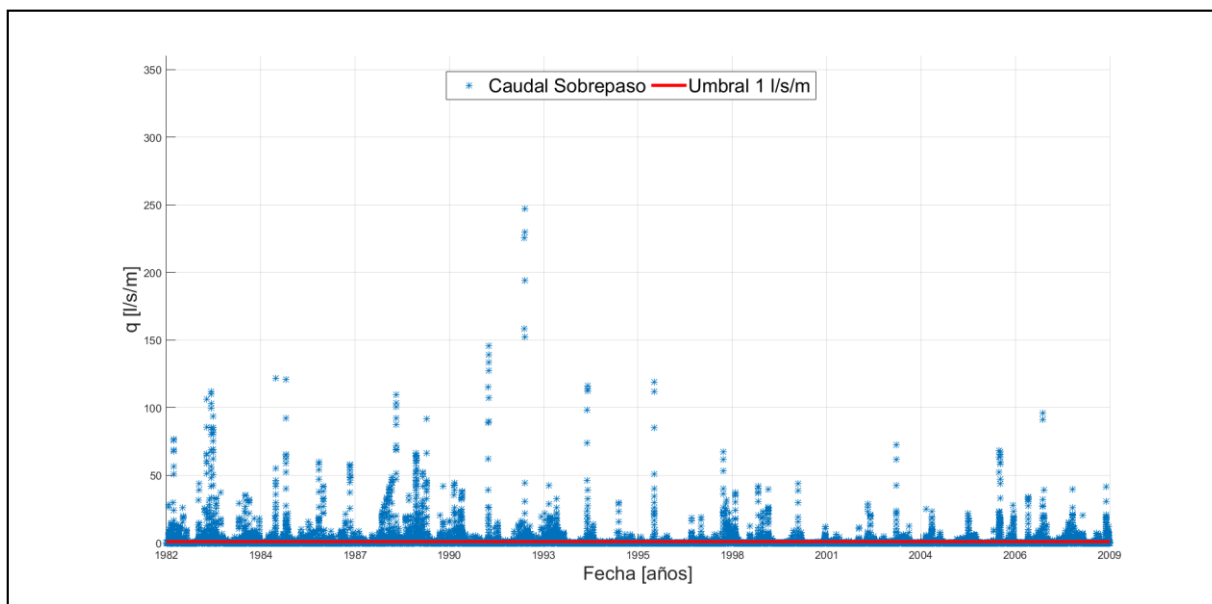
Para la definición de la cota de coronamiento se han estudiado 3 casos, correspondientes a coronamientos de +5,5[mNRS], +6,0 [mNRS] y +6,5 [mNRS]. Finalmente, otro parámetro analizado corresponde al factor de reducción por el tipo de coraza (Roca, cubos y cubípodos).

Finalmente, se modelaron 24 casos considerando todas las variables antes mencionadas. Se calcularon los caudales de sobrepaso con los 30 años de estados de mar al pie de la obra. Con esto, se obtuvieron curvas de excedencia de caudales de sobrepaso, donde se fijó un caudal admisible umbral de 1 l/s por metro lineal de estructura.

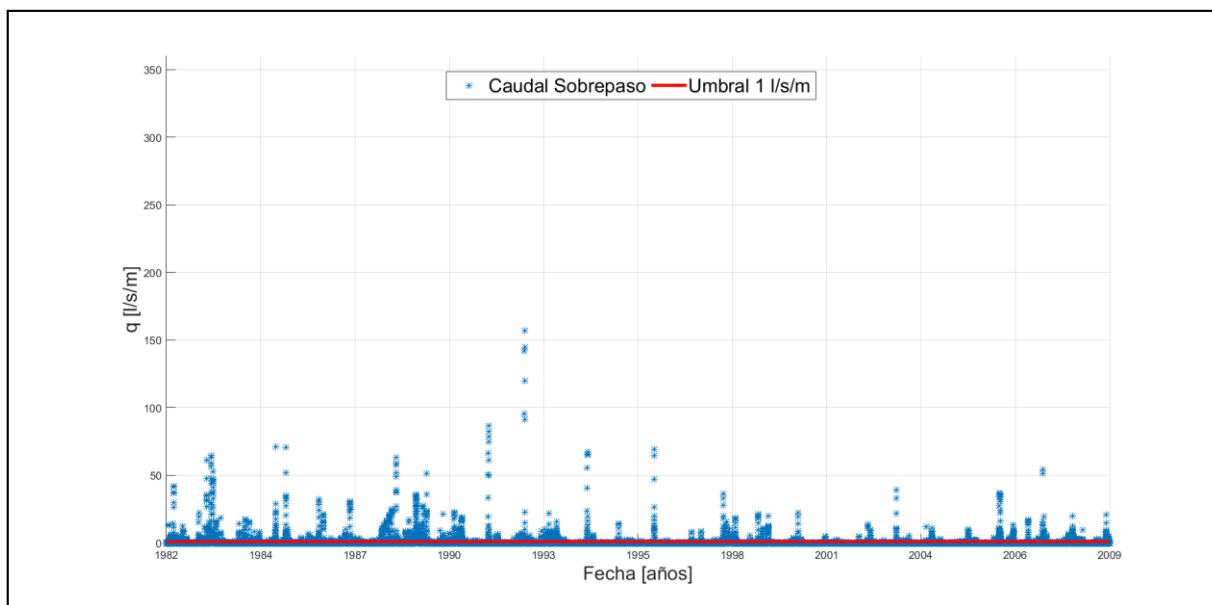
A continuación se presentan los resultados obtenidos para elementos tipo rocas, cubos y cubípodos en el Tramo 11' para las tres cotas en análisis en las figuras Figura 7-52 a la Figura 7-60.



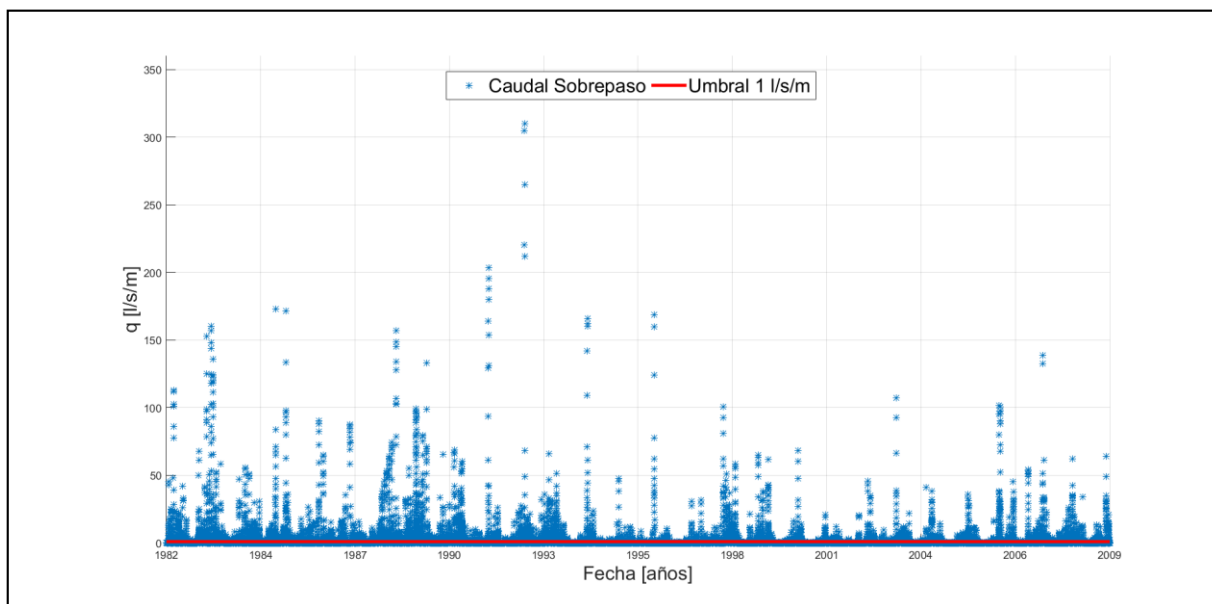
Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

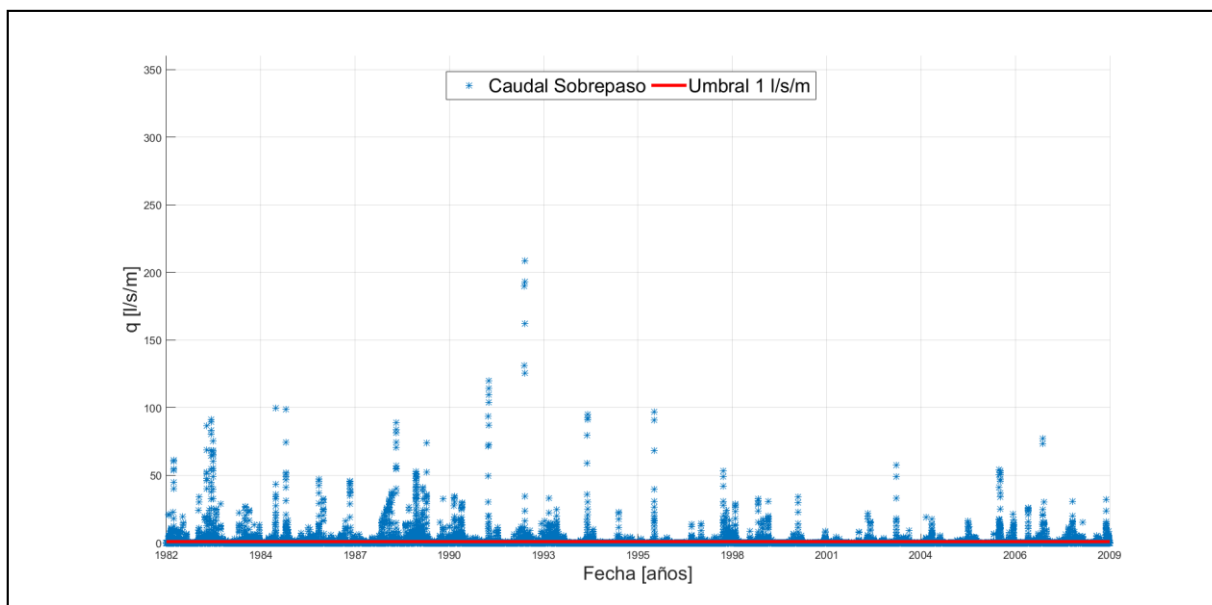


Figura 7-56: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,0 mNRS Cubos.
Fuente: Elaboración propia.

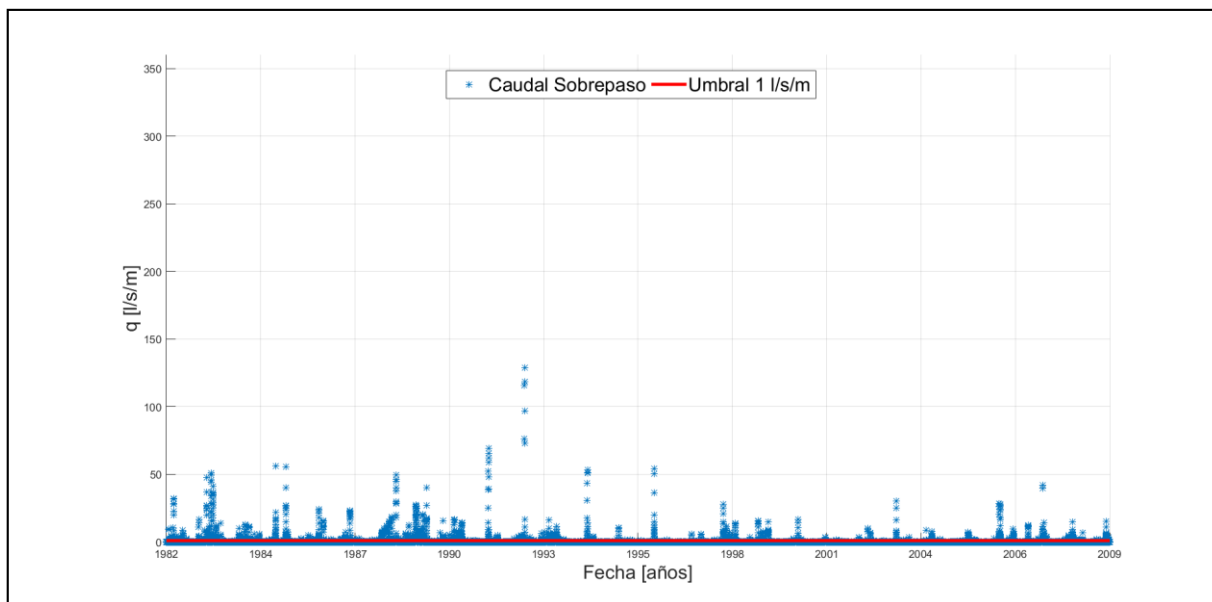


Figura 7-57: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,5 mNRS Cubos.
Fuente: Elaboración propia.

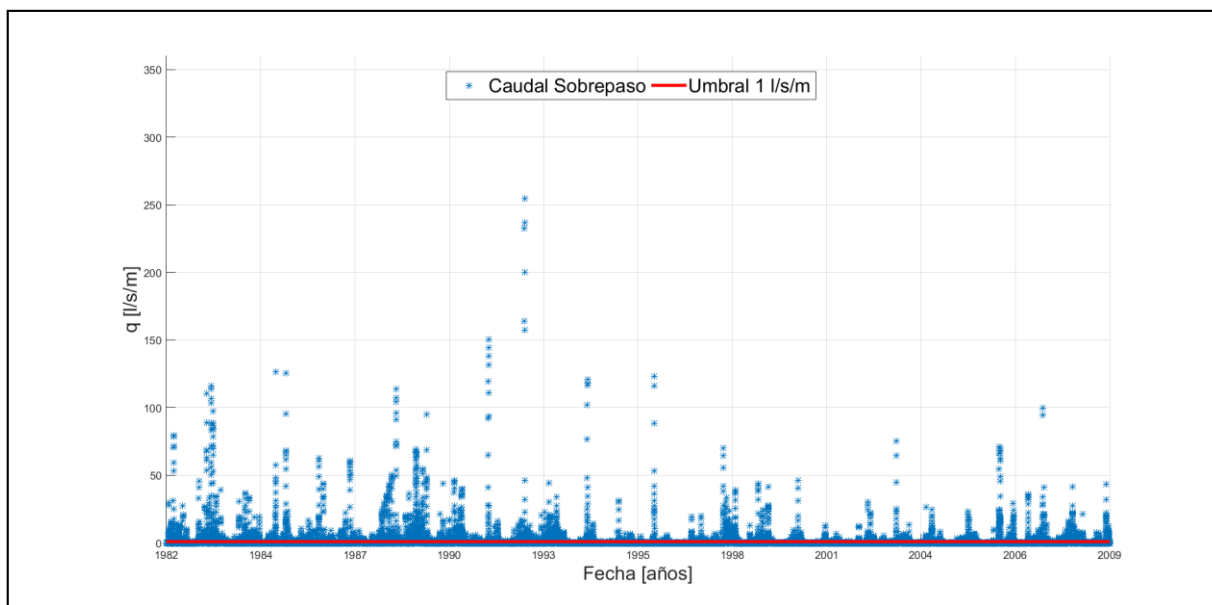


Figura 7-58: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +5,5 mNRS Cubípodos.
Fuente: Elaboración propia.

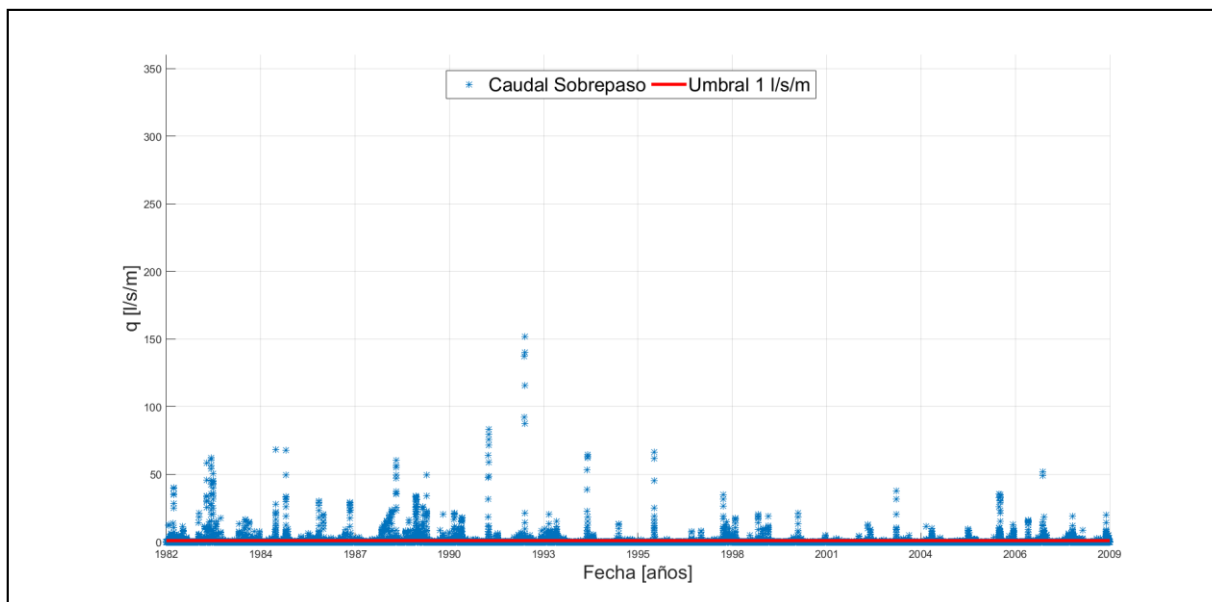


Figura 7-59: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,0 mNRS Cubípodos.
Fuente: Elaboración propia.

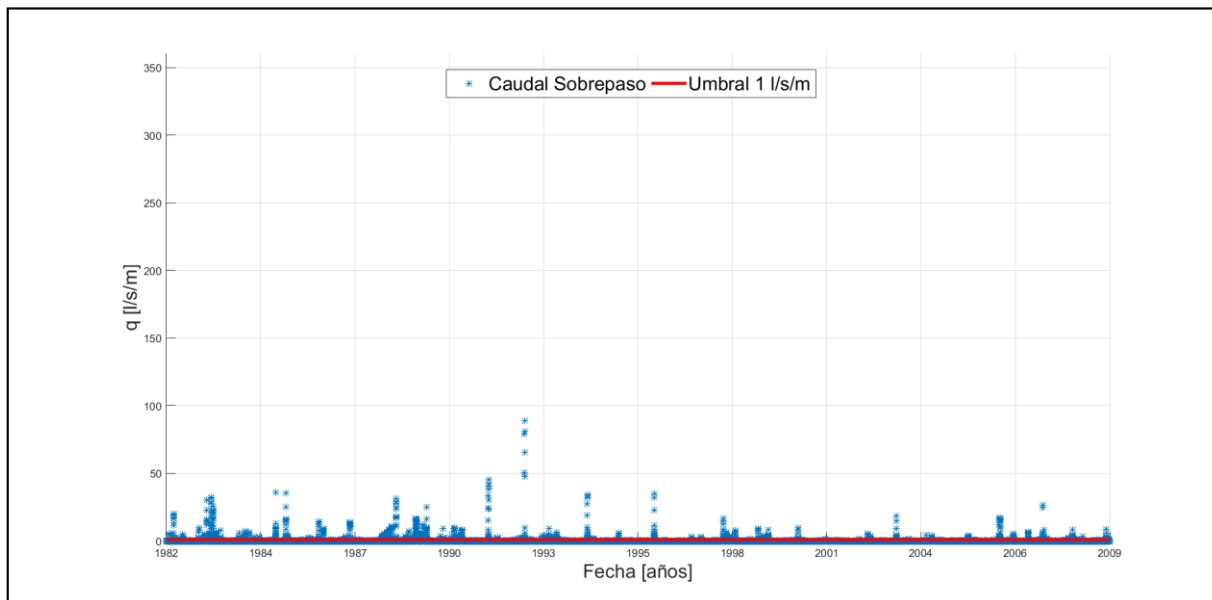


Figura 7-60: Caudales de sobrepaso Tramo 11' cota +6,5 mNRS Cubípodos.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos corresponden en determinar el número de estados de mar que supera la condición límite de 1 l/s x m y así definir una probabilidad de excedencia bajo una cota de coronamiento.

En el caso del Tramo 11' se observa que a medida que la cota de coronamiento aumenta, los estados de mar que sobrepasan el límite de caudal admisible disminuyen. A esto se le suma que los cubos/cubípodos por su estructuración generan también una disminución.

Tabla 7-49: Excedencia para caudal de sobrepaso admisible roca.

Resumen Roca 2 capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Cota 5,5	13,37%	36,80%	21,86%	4,43%
Cota 6,0	6,86%	22,67%	13,36%	1,92%
Cota 6,5	3,34%	13,87%	8,07%	0,85%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-50: Excedencia para caudal de sobrepaso admisible cubo.

Resumen Cubo 2 capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Cota 5,5	10,91%	31,64%	18,79%	3,35%
Cota 6,0	5,09%	18,91%	11,05%	1,41%
Cota 6,5	2,47%	10,88%	6,38%	0,60%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-51: Excedencia para caudal de sobrepaso admisible cubípodo.

Resumen Cubípodo 2 capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Cota 5,5	7,20%	23,50%	13,81%	2,00%
Cota 6,0	3,17%	13,33%	7,74%	0,80%
Cota 6,5	1,45%	6,85%	4,15%	0,30%

Fuente: Elaboración propia.

En términos generales los resultados anteriores indican el tiempo en el cual el sobrepaso será superior al límite de 1 l/s m. Es posible observar que el Tramo 22' es el más crítico en términos de probabilidad de excedencia, donde alcanza niveles superiores al 35% cuando la cota de coronamiento es de 5,5 mNRS.

Sin embargo, las formulaciones empíricas para el cálculo del sobrepaso admisible están consideradas para un caudal medio de acuerdo a la moda de la muestra de datos observados. Dado lo anterior es que a continuación se muestran los valores medios para cada uno de los tramos en cuestión de acuerdo a los 30 años de datos de oleaje al pie de la estructura (Ver tablas Tabla 7-52 a la Tabla 7-54).

Tabla 7-52: Caudal medio para cada tramo de estructura, roca.

Resumen Roca 2 capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Cota 5,5	1,33	5,50	3,52	0,30
Cota 6,0	0,57	2,57	1,68	0,11
Cota 6,5	0,25	1,22	0,82	0,04

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-53: Caudal medio para cada tramo de estructura, cubo.

Resumen Cubo 2 capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Cota 5,5	1,00	4,27	2,75	0,21
Cota 6,0	0,41	1,93	1,27	0,08
Cota 6,5	0,18	0,89	0,60	0,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-54: Caudal medio para cada tramo de estructura, cubípodo.

Resumen Cubípodo 2 capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Cota 5,5	0,60	2,70	1,76	0,12
Cota 6,0	0,23	1,15	0,77	0,04
Cota 6,5	0,09	0,50	0,35	0,01

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis de los valores medios, es posible apreciar que en general el caudal medio es menor a 1 L/s por metro lineal cuando la cota es de 6,5 mNRS. Por lo tanto se considerará una cota de coronamiento de 6,5 mNRS en toda la estructura.

7.7.5. ESCOLLERA DE PROTECCIÓN

Dada las condiciones de diseño antes evaluadas, se propone la verificación del diseño de estabilidad utilizando tres alternativas de elementos de coraza, i) rocas, ii) cubos de hormigón y iii) cubípodos²⁰.

La estabilidad de los elementos que componen el rompeolas dependen absolutamente de los pesos y de la trabazón entre ellos, dado esto y teniendo en cuenta el objetivo de la escollera, es que se hace importante condicionar el diseño con un nivel de averías en su rango mínimo con el fin de evitar deformaciones en el coronamiento y aumentos en las tasas de sobrepaso admisible.

La Figura 7-61 muestra secciones típicas para enrocados de protección costera en donde además es posible apreciar las relaciones propias entre el tamaño de los elementos de coraza con respecto al filtro y al núcleo, incluyendo disposiciones geométricas de configuración.

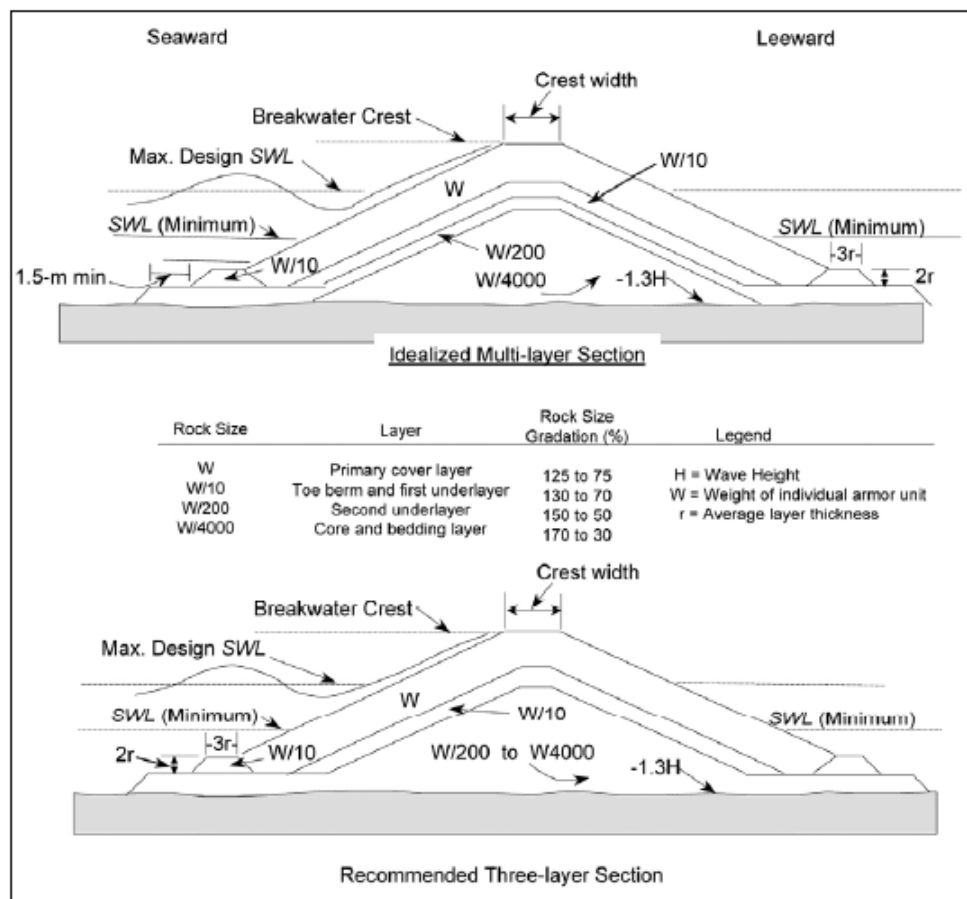


Figura 7-61: Secciones típicas de enrocados de protección costera.

Fuente: Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 (2003).

²⁰ Web link cubípodos para mayor información: <http://www.cubipod.com/>

Elementos tipo rocas

Para la verificación de la estabilidad de los elementos tipo roca, con las condiciones y solicitudes de diseño antes mencionadas, se consideró el uso de la formulación de Van der Meer 1998 para oleaje en aguas poco profundas suponiendo lo siguiente.

- $H_{2\%} = 1,4 H_s$
- Densidad de la roca: $2.700,0[kg/m^3]$
- Densidad de agua de mar: $1.025,0[kg/m^3]$
- Pendiente del talud: 1/2 (V/H)
- Nivel de daños: Inicio de averías mínimo
- Número olas de tormentas: 3.000
- Permeabilidad: 40%
- Tipo de ola: Plunging & Surging
- 2 Capas de rocas

A continuación, se presentan las ecuaciones de Van der Meer ilustradas con figuras en función de las alturas de olas y periodos peaks.

La Figura 7-62 muestra la distribución de M50 para distintas alturas de olas y periodos, sin embargo, para el periodo peak de los 16 segundos (línea magenta) se tiene que la condición más extrema (Oleaje cercano a los 4,2[m]) el tamaño de la roca debiese ser aproximadamente 17 toneladas, mientras que la condición contraria (alturas de olas de 2,8[m]) indica que la roca debiese poseer una masa media de al menos 7,0 toneladas.

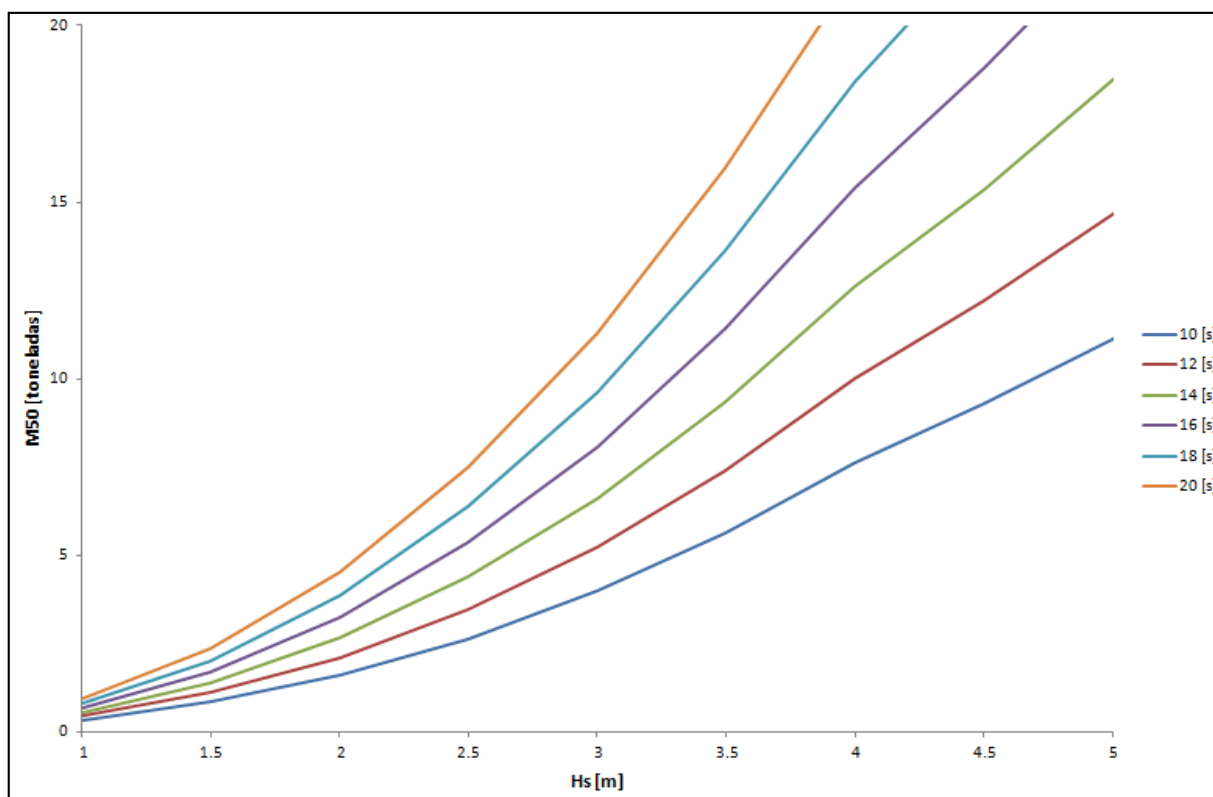


Figura 7-62: M50 Van der Meer (1998) para olas tipo Plunging, elementos tipo roca.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7-63 muestra la distribución de M50 para distintas alturas de olas y períodos, sin embargo, para el periodo peak de los 16 segundos (línea magenta) se tiene que la condición más extrema (Oleaje cercano a los 4,2[m]) el tamaño de la roca debiese ser aproximadamente 13 toneladas, mientras que la condición contraria (alturas de olas de 2,8[m]) indica que la roca debiese poseer una masa media de al menos 4 toneladas.

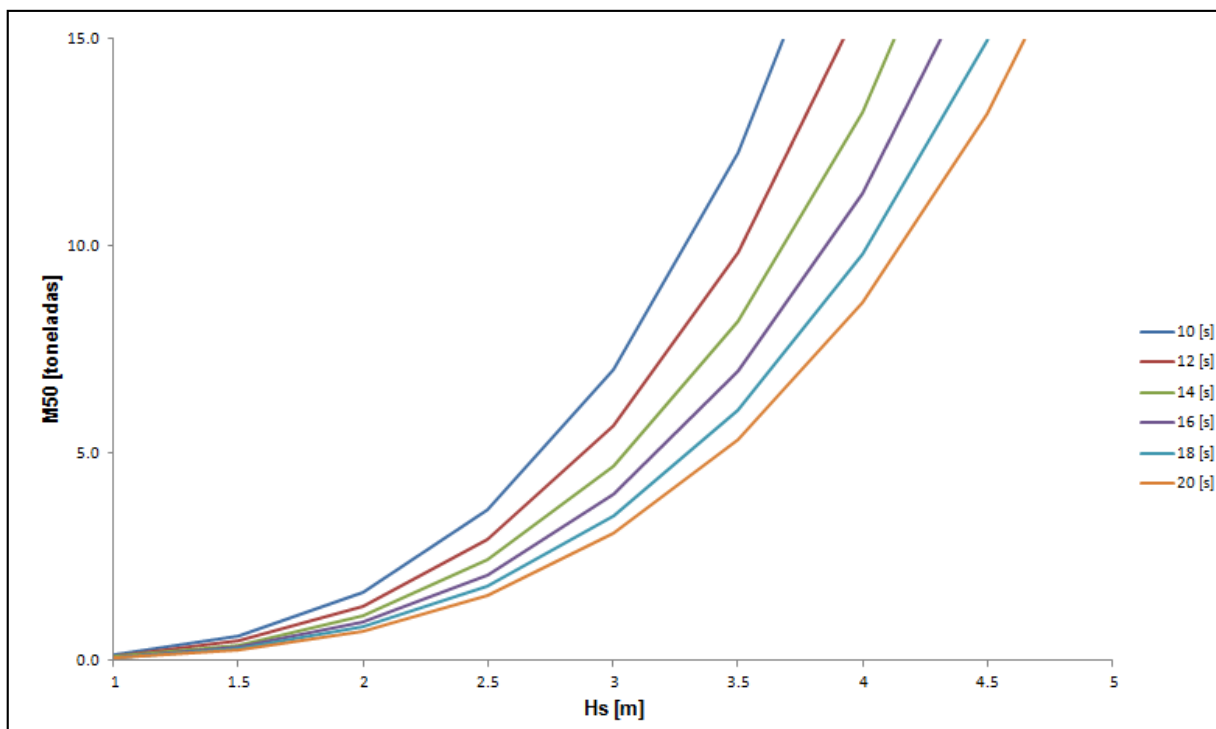


Figura 7-63: M50 Van der Meer (1998) para olas tipo Surging, elementos tipo roca.

Fuente: Elaboración propia.

Elementos tipo cubos de hormigón

Para la verificación de la estabilidad de los elementos tipo cubos de hormigón, con las condiciones y solicitaciones de diseño antes mencionadas, se consideró el uso de la formulación de Van der Meer 1988b.

- H_s altura de la ola al pie de la obra
- Densidad del hormigón: $2.400,0[kg/m^3]$
- Densidad de agua de mar: $1.025,0[kg/m^3]$
- Pendiente del talud: 1/2 (V/H)
- Nivel de daños: Inicio de averías mínimo
- Número olas de tormentas: 3.000,0
- Permeabilidad: 40%
- 2 Capa de este elemento

A continuación, se presentan las ecuaciones de Van der Meer ilustradas con figuras en función de las alturas de olas y periodos peaks.

La Figura 7-64 muestra la distribución de M50 para distintas alturas de olas y periodos, sin embargo, para el periodo peak de los 16 segundos (línea magenta) se tiene que la condición más extrema (Oleaje cercano a los 4,2[m]) el tamaño de los cubos debiese ser aproximadamente 3,5 toneladas, mientras que la condición contraria (alturas de olas de 2,8[m]) indica que los cubos debiesen poseer una masa media de al menos 1,0 toneladas.

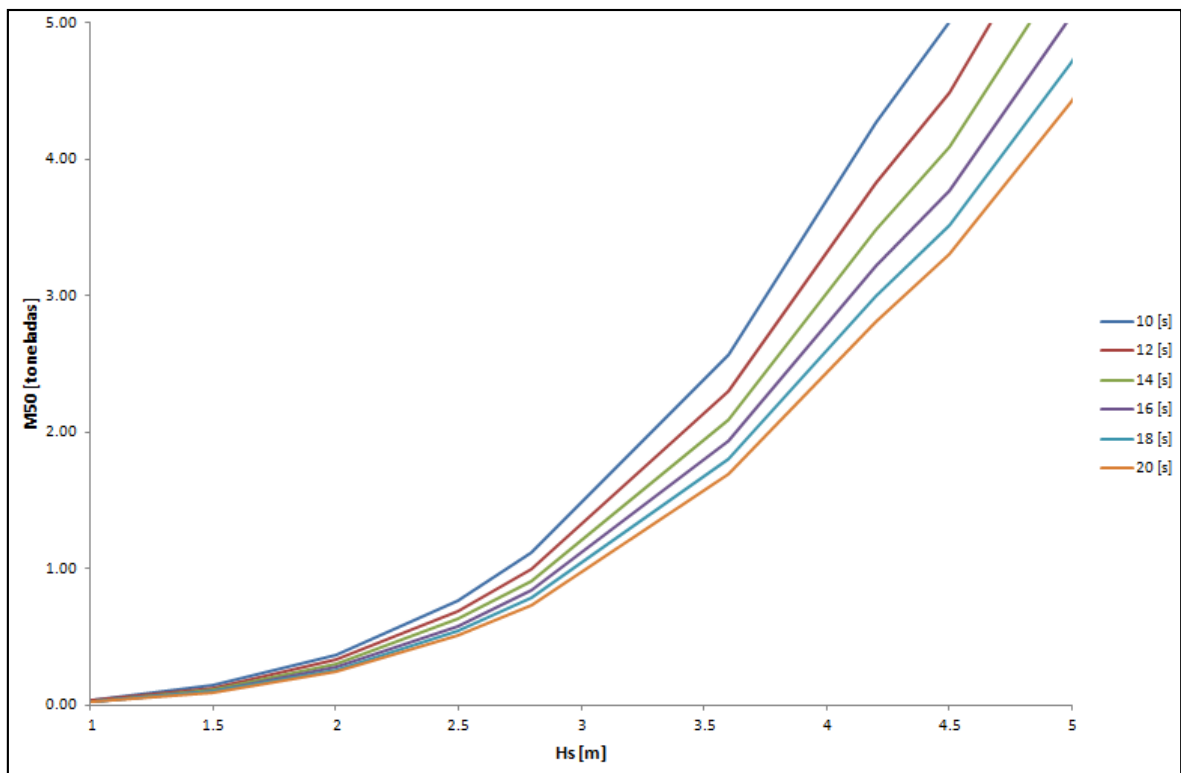


Figura 7-64: M50 Van der Meer (1988b) para elementos tipo cubos de hormigón.

Fuente: Elaboración propia.

Elementos tipo cubípodos

Para la verificación de la estabilidad de los elementos tipo cubípodos, con las condiciones y solicitaciones de diseño antes mencionadas, se consideró el uso de la formulación de Hudson (1974), la cual considera una pendiente de 3/2, por lo que para una condición de pendiente proyectada 1/2 (V/H) es más conservadora.

- H_s altura de la ola al pie de la obra
- Densidad del hormigón: $2.350,0[kg/m^3]$
- Densidad de agua de mar: $1.025,0[kg/m^3]$
- Pendiente del talud: 1/2 (V/H)
- Nivel de daños: Inicio de averías mínimo

Dado a que los cubípodos utilizan la formulación de Hudson (1974), se deben considerar coeficientes de estabilidad para 1 y 2 capas de elementos, los cuales son posible ubicarlos en la Tabla 4-1 (R. Medina & Gómez-Martin, 2016).

Coeficiente de estabilidad para tronco

- Una capa: 12,0
- Dos capas: 28,0

Coeficiente de estabilidad para cabezo

- Una capa: 5,0
- Dos capas: 7,0

A continuación, se presentan las ecuaciones de Hudson (1974) ilustradas con figuras en función de las alturas de olas y los respectivos coeficientes de estabilidad antes mencionados.

La Figura 7-65 muestra la distribución de M50 para distintas alturas de olas y coeficientes de estabilidad. Para el cabezo con una distribución monocapa ($K_d = 5$) se tiene que para la situación más desfavorable (oleaje de 4,2[m]) el elemento indicado debiese contar con una masa media de al menos 8,2 toneladas y de 3,5 toneladas para el tronco ($K_d = 12$). Del mismo modo, pero en la condición menos desfavorable (oleaje de 2,8[m] al pie de la obra), se tiene que para la composición monocapa del tronco el tamaño de los elementos debiese ser de 0,5 toneladas.

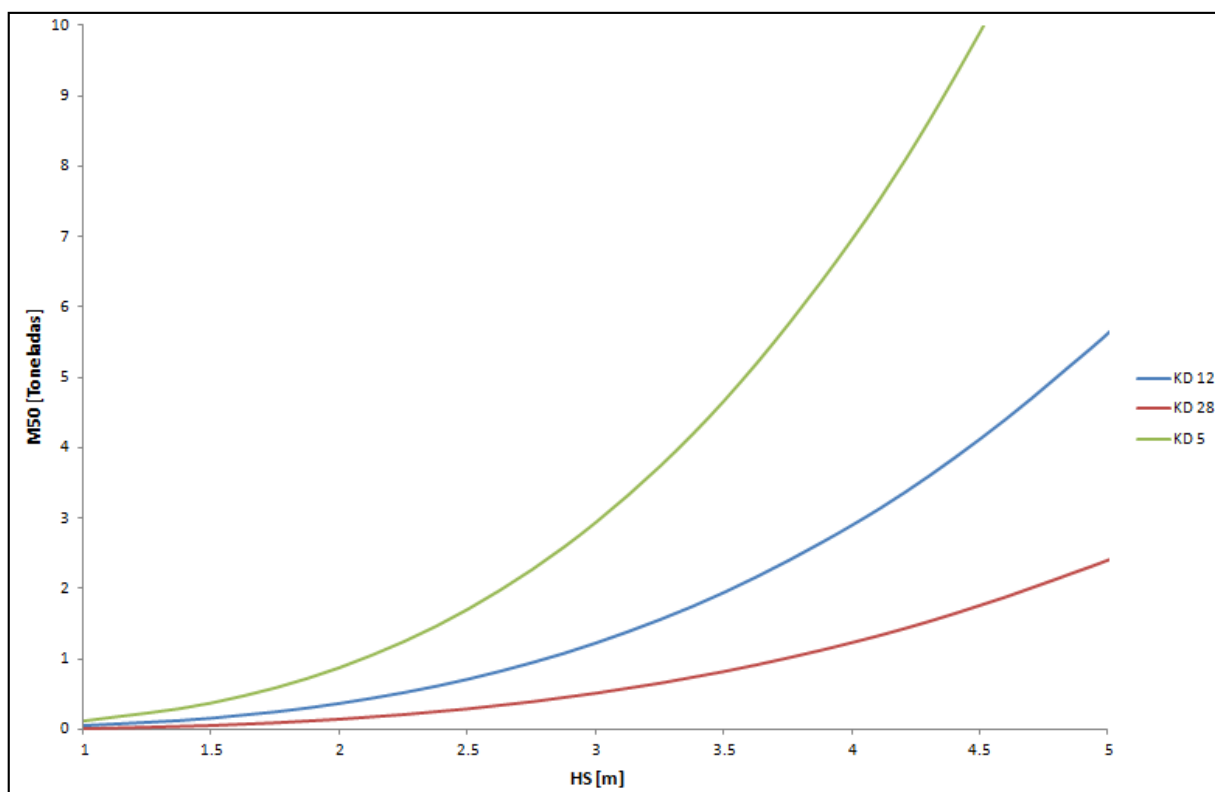


Figura 7-65: M50 Hudson (1974) para elementos tipo cubípodos.

Fuente: Elaboración propia.

Resumen tamaños de elementos para rompeolas principal

A continuación, se presenta un resumen del tamaño teórico de los elementos considerados para la estabilidad de la coraza del rompeolas principal, separados por tipo, tronco y cabezo.

Los elementos tipo roca fueron calculados de acuerdo a la formulación de Van der Meer para olas tipo *Surging*, dado que la condición de oleaje al pie del talud de la obra a proyectar posee esta característica. La condición de rotura del oleaje solo se obtuvo para el Tramo 44', en donde la ola de diseño se calculó como 2,8[m] para un pie del talud a 2,23[m] bajo el Nivel de Reducción de Sondas.

Al mirar la Tabla 7-55, es posible observar que los elementos teóricos tipo roca son poco comparables con los prefabricados, en donde los pesos nominales son de al menos 1/3 de su valor, lo cual es posible debido a los altos coeficientes de estabilidad que proporcionan. En el caso de los Cubípodos, el coeficiente de estabilidad ($K_d = 12$ para monocapa) hace que su peso sea muy similar al de los Cubos, pero con la salvedad de que estos últimos fueron considerados para una colocación de dos capas.

Tabla 7-55: Resumen estabilidad teórica coraza rompeolas principal.

Resumen		Tronco, W_{50} [ton]			
Elemento	Capas	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
Roca	2	13,4	9,4	7,7	3,1
Cubos	2	3,22	2,31	1,93	0,84
Cubípodos	2	3,53	2,59	2,12	0,47
Resumen W_{50} [ton]		Cabezo, W_{50} [ton]			
Elemento	Capas	Tramo 11'			
Cubípodos	1	8,23			

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se detalla la sección de cada tramo para cada uno de los elementos teóricos recomendados en el tronco.

Tabla 7-56: Elementos teóricos calculados para la composición de rompeolas, tronco.

Secciones Tronco W ₅₀			Tronco, W ₅₀ [ton]			
Coraza	Cubípodos	2 Capa	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
			3,53	2,59	2,12	0,47
Filtro	Roca	1 Capa	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
			0,35	0,25	0,21	0,04
Núcleo	Roca	1 Capa	Tramo 11'	Tramo 22'	Tramo 33'	Tramo 44'
			0,017	0,012	0,010	0,005

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7-57: Elementos teóricos calculados para la composición de rompeolas, cabezo.

Secciones Cabezo W ₅₀			Cabezo, W ₅₀ [ton]
Coraza	Cubípodos	1 Capa	8,23
Filtro	Roca	1 Capa	0,823
Núcleo	Roca	1 Capa	0,041

Los cálculos teóricos presentados en las tablas Tabla 7-56 y Tabla 7-57 fueron calculados para una coraza compuesta por elementos tipo cubípodos para el tronco y cabezo del rompeolas primario. Sin embargo, se considerará solo la utilización de elementos de 8,23[Ton] para el Cabezo y de 3,53[Ton] para el resto de la estructura, dado que la división de la estructura en tramos generará que se deban confeccionar un alto número de encofrados y mayor cantidad de movimientos de colocación, lo que implica mayor complejidad logística.

Consideraciones de diseño especiales

Para el proceso constructivo y de factibilidad económica, es necesario considerar lo siguiente:

- Pago de Royalty para el caso de elementos pre-fabricados cubípodos.
- Considerar que los creadores de cubípodos entregarán planos con especificaciones técnicas de los elementos, los cuales contienen las características técnicas del encofrado.
- Valor del hormigón necesario para la fabricación de los elementos.
- Considerar logística, desde la fabricación del elemento hasta el transporte.
- En el caso de los elementos tipo roca, es necesario considerar la disposición geográfica de la cantera más cercana, además de la factibilidad de explotación de los tamaños calculados.

- Costos por explotación de tamaños uniformes y no uniformes de rocas.
- Izado, transporte y colocación de los elementos, tanto prefabricados como del tipo roca de cantera.
- Desplazamiento de la grúa oruga y de camiones de 20 a 40 toneladas de carga sobre la estructura y sitios aledaños al proyecto.
- Sitio de acopio, verificar la factibilidad de instalación de faenas.

Por tanto, considerando los puntos anteriores, además teniendo en cuenta el apoyo de Raúl Pey & Compañía y Santiago Povedano (representante de Cubipods - OHL), se llegó a estimar los siguientes valores para el cálculo de la estabilidad del rompeolas principal utilizando como base los resultados teóricos obtenidos anteriormente.

Para el filtro y núcleo, del tronco y cabezo, se consideró el uso de elementos tipo rocas con una desviación estándar de $\pm 25\%$.

En la Tabla 7-58 es posible apreciar que en el tronco del rompeolas el tamaño de los elementos es parejo, no cambia con respecto al tramo en que se encuentran. Sin embargo, se consideró una solución mixta para todo el tronco, es decir, para el lado en **donde golpea** la ola se dispondrán elementos tipo **cubípodos de 4,0[ton]** y por el **lado contrario** se colocarán elementos **tipo roca de cantera de 3,0[ton]**.

Tabla 7-58: Disposición final estabilidad elementos Tronco.

Tronco	Cubípodos	Roca Cantera	
	Coraza	Filtro	Núcleo
W50	4 [ton]	0,68 [ton]	0,02 [ton]
D50	1,19 [m]	1,2 [m]	-
Volumen	1,7 [m ³]	-	-
Porosidad	42%	-	-
Rango W50	-	500 - 900 [kg]	15 - 25 [kg]

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al filtro y al núcleo de toda la estructura, cabezo y tronco, se consideró estandarizar el tamaño de sus elementos a los presentados en la Tabla 7-59. Es decir, 750 a 1250[kg] para el filtro y de 37,5 a 62,5[kg] para el núcleo, a modo de facilitar la explotación y bajar los costos de explotación en la cantera.

Tabla 7-59: Disposición final estabilidad elementos Cabezo.

Cabezo	Cubípodos	Roca Cantera	
	Coraza	Filtro	Núcleo
W50	10 [ton]	1 [ton]	0,05 [ton]
D50	1,62 [m]	1 [m]	-
Volumen	4,7 [m ³]	-	-
Porosidad	43%	-	-
Rango W50	-	750 - 1250 [kg]	37,5 - 62,5 [kg]

Fuente: Elaboración propia.

Para las condiciones de diseño del ancho de la cresta del rompeolas se consideró la utilización de la fórmula propuesta en el Coastal Engineering Manual, específicamente en el capítulo VI parte 5, Fundamentos del diseño, página 119.

(Ec. 7-4)

$$B = nK_{\Delta} \left(\frac{W}{w_a} \right)^{1/3}$$

Donde:

B : ancho de la cresta

n : número de piezas (se recomienda utilizar un mínimo de 3 elementos)

K_{Δ} : Coeficiente característico del material de la capa de coraza a utilizar

W : masa de la unidad de coraza considerada

w_a : peso específico de la unidad de coraza considerada

Por lo tanto, considerando los tramos propuestos en la Tabla 7-58 y Tabla 7-59, se pueden asumir los siguientes valores para el Tramo 11' (sector del cabezo).

$$B = 6 * 1.10 * \left(\frac{10.000}{2.350} \right)^{1/3}$$

Anteriormente se consideró un elemento tipo cubípodo de 10 toneladas con un peso específico de $2,35[Ton/m^3]$, un numero de 3 piezas y un coeficiente característico de 1,1 (válido para cubos de hormigón), obteniendo una Berma de 4,7 metros, sin embargo, se dispondrá de un ancho sobre estimado de 5,0[m]. La Berma anteriormente calculada corresponde a un tamaño suficiente para permitir el ingreso de camiones de alto tonelaje y de grúa oruga sobre la cresta del rompeolas, con el fin de generar una zona adecuada para el correcto desempeño en la etapa de construcción de la estructura.

A continuación, se presenta una resumen con el tamaño de la cresta para cada tramo de la estructura a considerar.

Tabla 7-60: Ancho de la Berma

Tramo	Berma [m]
Cabezo	5,0
T 11'	1,9
T 22'	1,9
T 33'	1,9
T 44'	1,9

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, con el fin de optimizar el proceso de colocación de los elementos, en su etapa constructiva, y teniendo en cuenta el tamaño de grúas tipo oruga y camiones de 20 a 40[ton] de carga, se considerará un ancho de berma uniforme de 5,0[m] en toda la extensión de la estructura.

En el Anexo 4, del presente documento, será posible encontrar planos, los cuales contienen el detalle del Layout seleccionado, secciones de la estructura y especificaciones técnicas. Sin embargo, a continuación se presentan los resultados obtenidos en planta y secciones transversales.

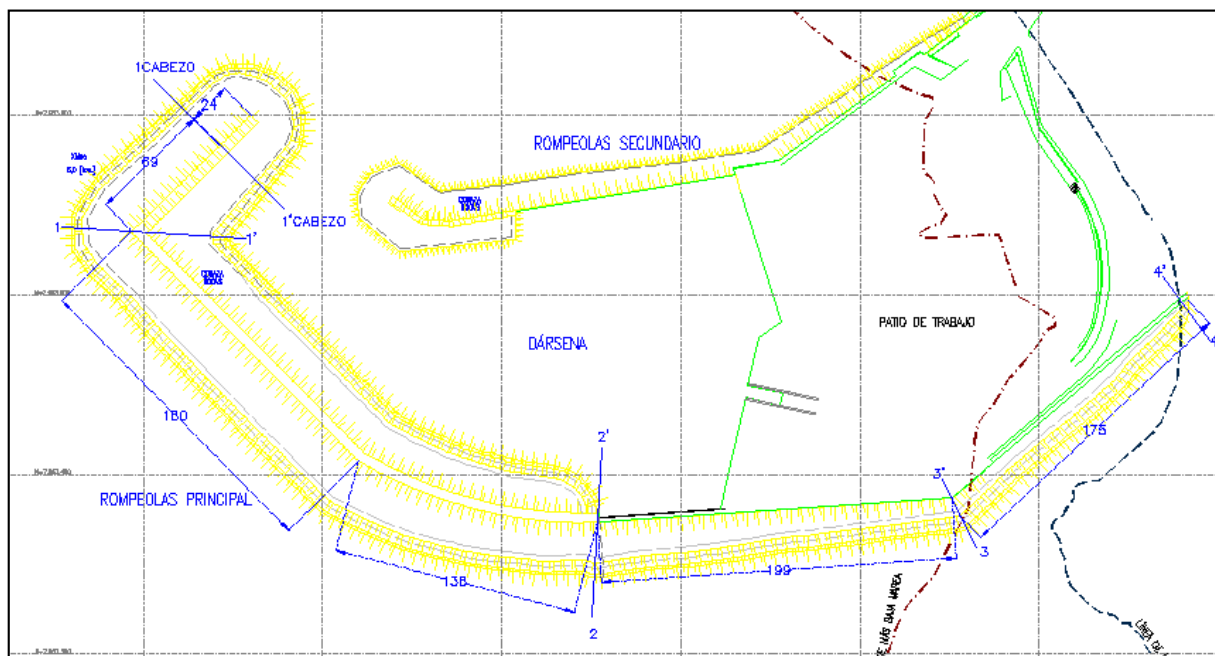


Figura 7-66: Planta Layout Rompeolas y dársena proyectada.
Fuente: Elaboración propia.

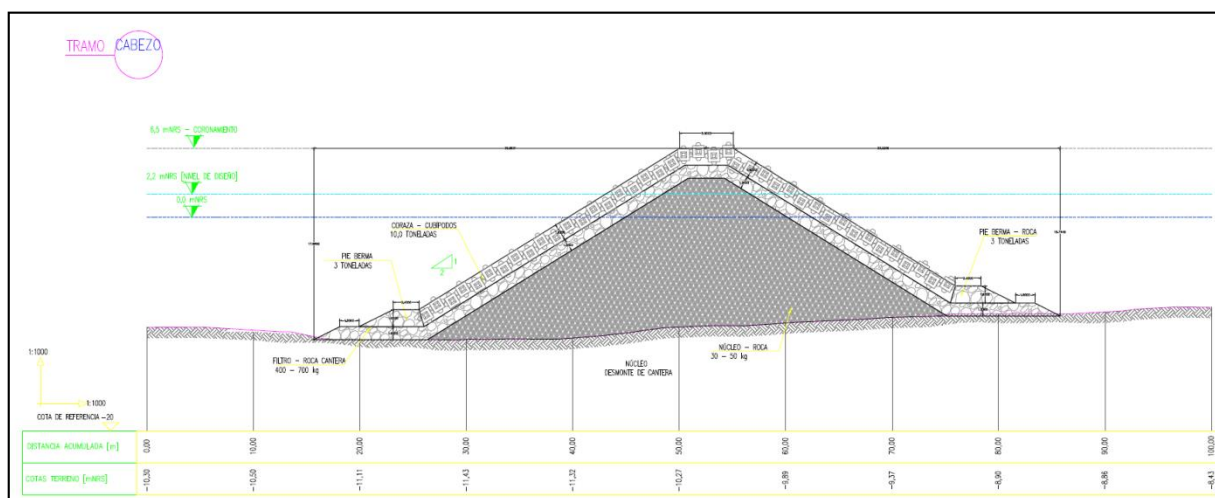


Figura 7-67: Sección Transversal Cabezo.
Fuente: Elaboración propia.

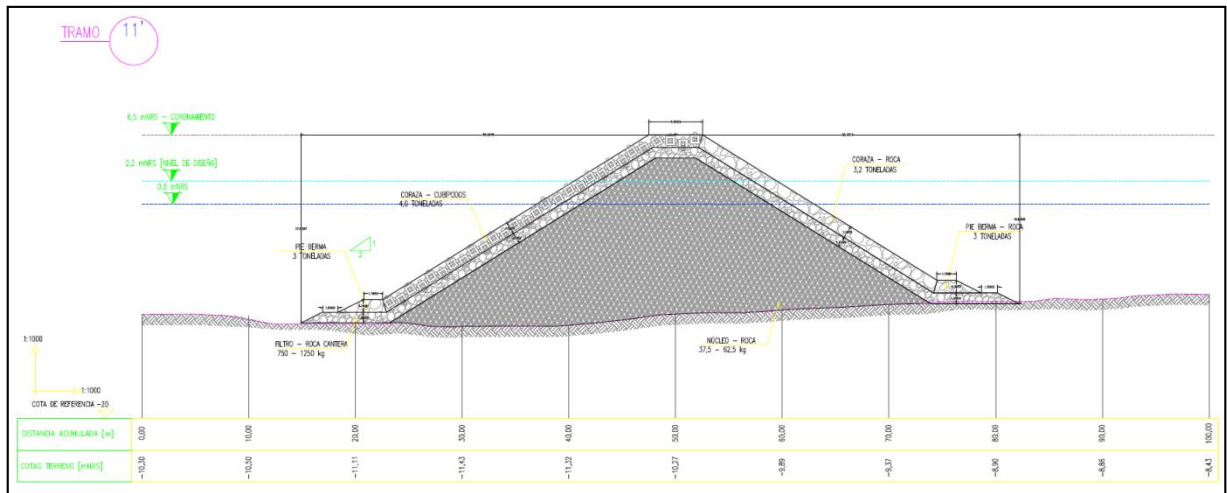


Figura 7-68: Sección Transversal Tramo 11'.
Fuente: Elaboración propia.

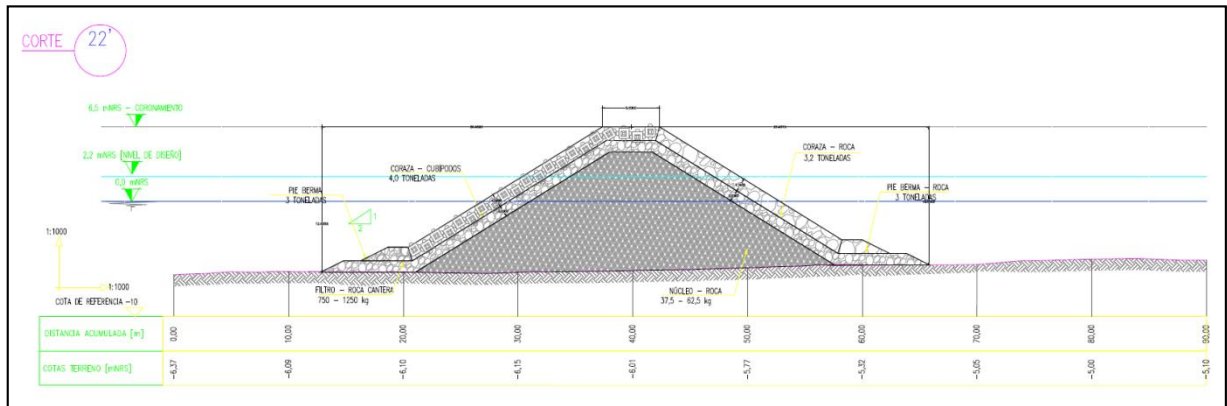


Figura 7-69: Sección Transversal Tramo 22'.
Fuente: Elaboración propia.

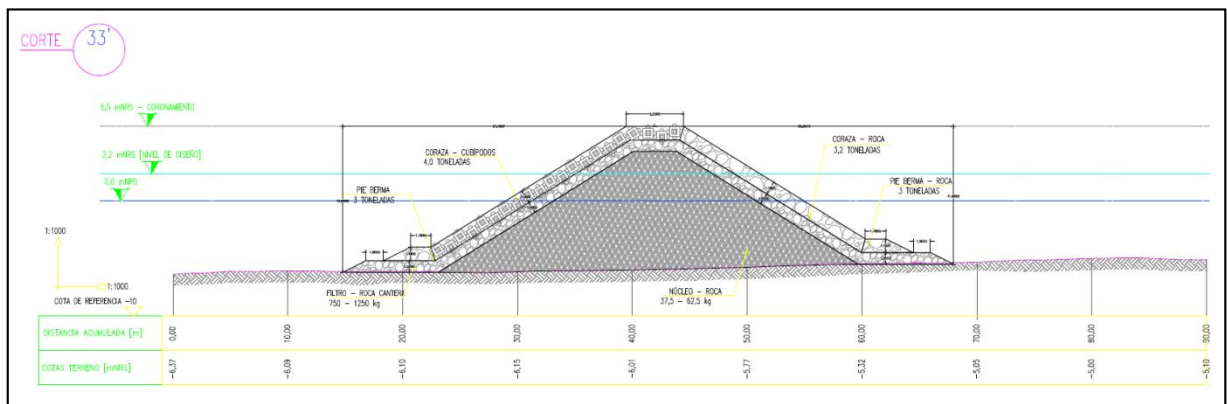


Figura 7-70: Sección Transversal Tramo 33'.
Fuente: Elaboración propia.

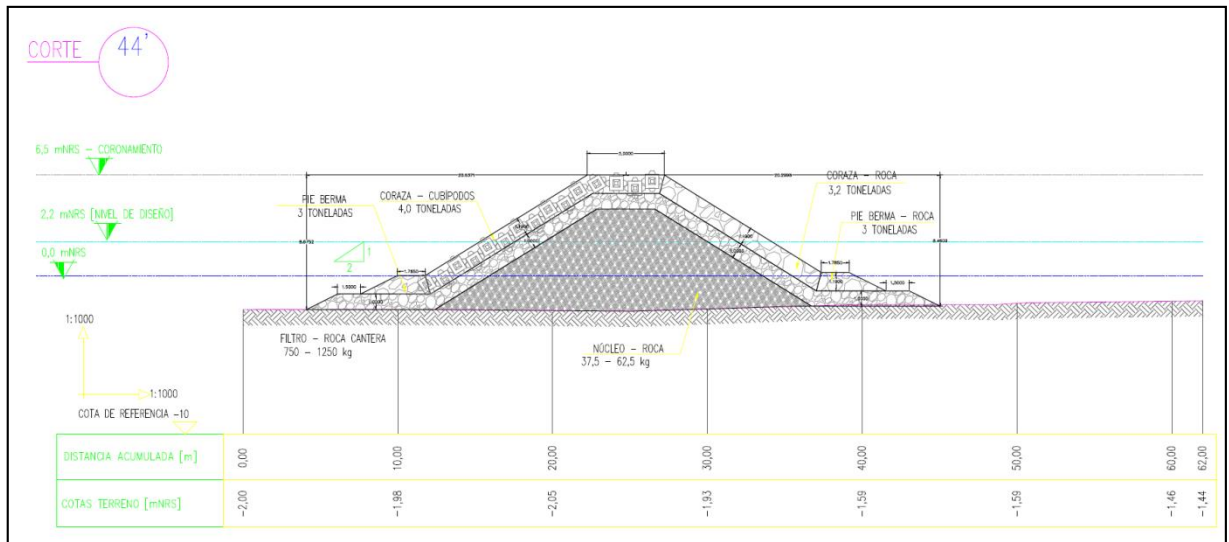


Figura 7-71: Sección Transversal Tramo 44'.
Fuente: Elaboración propia.

8. DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES

Desarrollo del clima de oleaje extremo o de diseño en el sitio de interés del proyecto

Según la Publicación SHOA 3201, página 8, se recomienda que el clima extremo u oleaje de diseño, sea definido con los datos de oleaje en aguas profundas. Lo anterior significa realizar discretización de los eventos extremos mediante metodologías tales como máximo anual, truncar las tormentas sobre cierto umbral (POT) y aislarlas, etc., sin embargo, estas técnicas implican llevar la altura de ola de diseño (escogida en aguas profundas) hacia el sitio de proyecto (generalmente en aguas poco profundas).

Al verificar las metodologías recientes, en cuanto a las técnicas de discretización de clima de oleaje extremo, es posible encontrar las siguientes:

- a. Determinación de valores extremos de oleaje: a partir del análisis en aguas profundas y en aguas someras, publicación realizada por Carlos Cárdenas Martínez, Jorge Gómez Mena & Jaime Serrano Carvajal, presentada en el VI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, SIOP 2014, Iquique, Chile.
- b. Eventos extremos de oleaje para diseño de obras, ¿Evaluar en agua profundas o en el sitio?, publicación realizada por Mauricio Molina Pereira, presentada en el VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, SIOP 2016, San Antonio, Chile.

Por tanto, según la primera publicación citada, el caso más conservador corresponde a la metodología 1, determinación de valores extremos en aguas profundas de toda la muestra, transfiriendo este oleaje hacia el sitio del proyecto. Sin embargo, se recomienda utilizar la metodología 3, la cual indica que se debe efectuar el clima extremo en el sitio de interés para determinar las alturas de ola de diseño, en donde la discretización direccional dependerá del caso a aplicar.

De acuerdo a la segunda publicación, en donde se evalúa el mismo principio, identificando ventajas importantes al aplicar el clima extremo en el sitio de interés del proyecto, dado que por efectos de la propagación, asomeramiento, refracción, difracción, etc., la ola extrema en aguas profundas puede no serlo en aguas someras, donde concluye que se debe a multi-modalidad del oleaje en las costas de nuestro país y a la configuración de nuestras costas.

Tomando en cuenta las recomendaciones anteriormente mencionadas, en el presente trabajo se optó por realizar el clima extremo en el sitio de interés del proyecto, donde con antelación se determinó que las direcciones más ocurrentes provinieron del SW y WSW con un 77% y 18% respectivamente, resultados obtenidos del proceso de transferencia del total de los datos hacia aguas poco profundas. Con ello, se estimó además que la altura de diseño debió ser propagada, desde sitio de interés hacia el pie de la estructura, para las direcciones SW a W discretizadas cada 15[°], con lo que se abarcó más del 90% del clima de oleaje en el área de proyecto, llamando este proceso como Metodología 2 (ver acápite 7.6.1), el cual fue comparado con la Metodología 1 (ver acápite 7.6.2) determinando así que las condiciones de diseño (propagación de oleaje extremo desde sitio de interés hacia la

estructura) para todos los tramos del enrocado poseen una probabilidad de excedencia cercana al 0%.

Utilización de espectros sobre parámetros de resumen

Otro punto a considerar, siempre y cuando se posean, es el uso de espectros bidimensionales del oleaje. Como se menciona en la publicación de Molina (2016), el oleaje en las costas de Chile es de carácter multimodal, lo cual se debe principalmente a las condiciones locales de cada zona, en donde se pueden encontrar aportes energéticos provenientes de todas las direcciones forzados por vientos, bajas presiones, etc. Lo anterior permitirá caracterizar de mejor manera el área de estudio, eliminando la incertidumbre de la componente local del oleaje, la cual no es discriminada al transferir parámetros de resumen desde aguas profundas hasta el sitio de proyecto. Sin embargo, según los resultados obtenidos por el modelo de oleaje MIKE 21 Spectral Waves, se obtuvo una representación aceptable de los estados de mar del mes de mediciones in-situ, en donde la representación de las tormentas (25 al 27 de Julio 2013) se caracterizaron en al menos un 80%.

Marejadas Julio 2013 y Agosto 2015

En cuanto a la data de oleaje, la extensión de la misma correspondió entre los años 1980 y 2009 (30 años de datos), la cual no consideró las tormentas ocurridas entre el 4 y 5 de Julio del año 2013 y la tormenta del año 2015, específicamente los días 9 y 10 de Agosto. Ambas tormentas, con el fin de tener un margen de las consecuencias que causaron, fueron transferidas (utilizando los coeficientes de agitación calculados en el acápite 7.3.4.2) desde su nodo de constitución (Latitud -19, Longitud -71) hacia el sitio de interés, obteniendo los siguientes resultados.

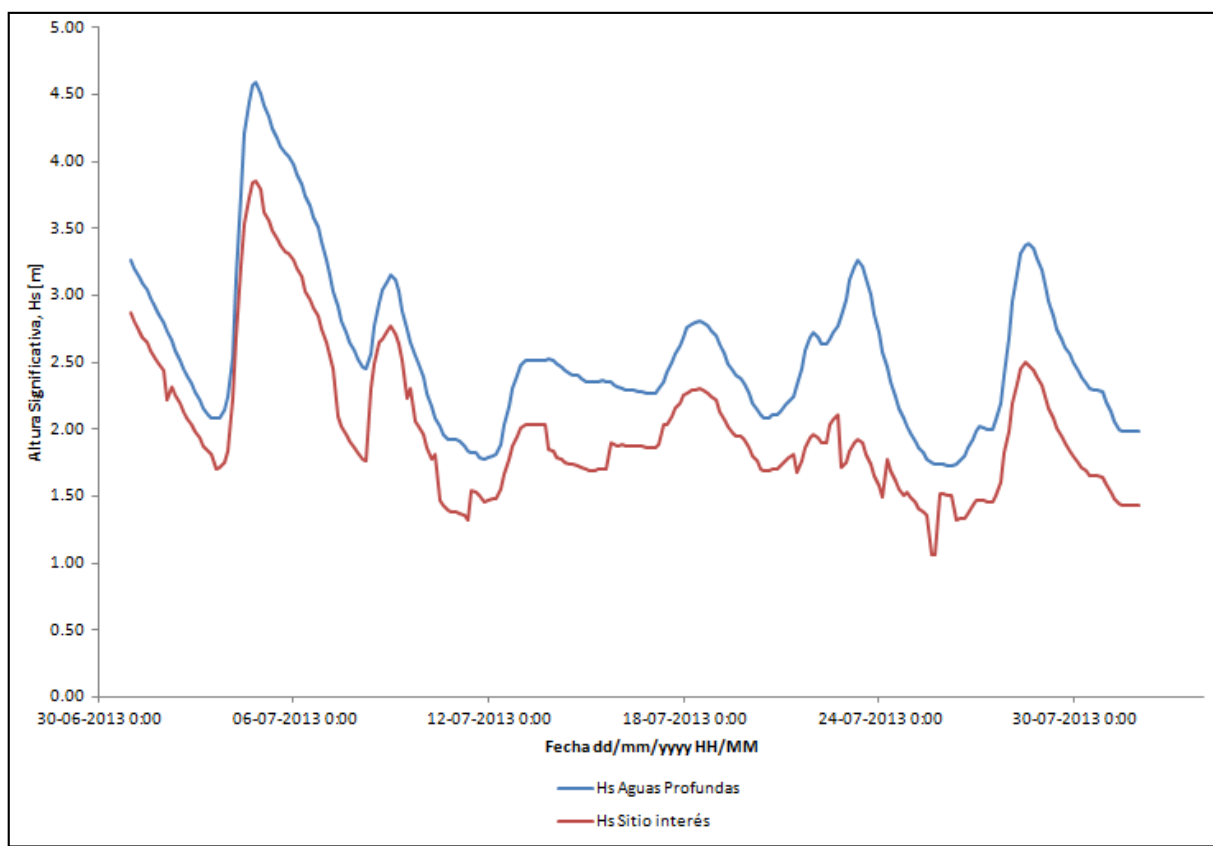


Figura 8-1: Tormenta Julio 2013, Hs para aguas profundas y someras.
Fuente: Elaboración propia.

La tormenta del 4 y 5 de Julio, dejó olas superiores a los 3,5[m] de alturas en la zona de proyecto, la cual ocurrió con una dirección incidente proveniente del SW con periodos peaks entre los 15 y 20[s]. De la Figura 8-1, es posible apreciar que entre la altura de aguas profundas y aguas someras, específicamente la mayor altura, existe una diferencia de al menos un 16%.



Figura 8-2: Marejada del 4 de Julio 2013, sector cercano a Playa Brava.
Fuente: SoyArica.cl.



Figura 8-3: Marejada del 4 de Julio 2013, sector Playa el Laucho.
Fuente: SoyArica.cl.

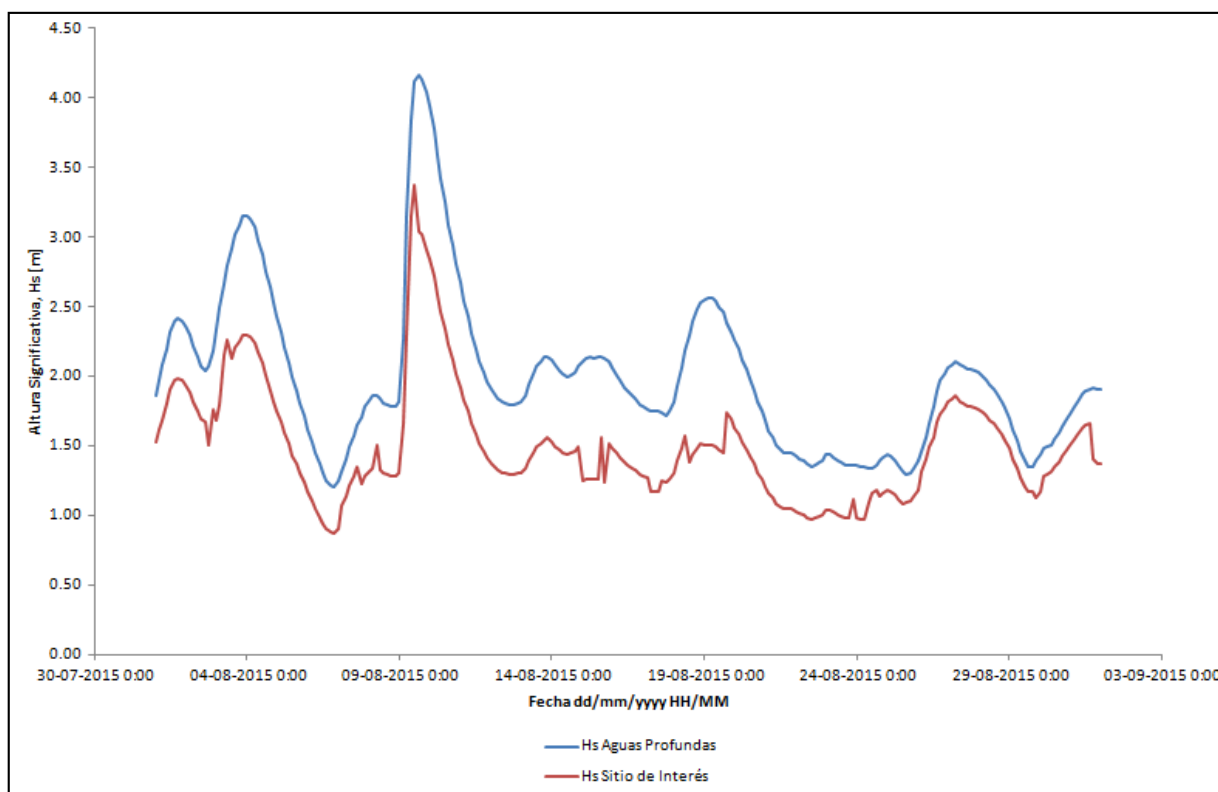


Figura 8-4: Tormentas Agosto 2015, Hs aguas profundas y someras.

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que la tormenta del año 2013, en agosto del año 2015 se obtuvieron alturas de olas superiores a los 3,3 metros en el sitio de interés, específicamente para el día 9 de Agosto durante horas de la mañana. Esta tormenta se mantuvo con una incidencia proveniente de la dirección SW, con periodos peaks entre los 15 y 17 segundos. La diferencia de la ola peak entre aguas profundas y la zona de proyecto es de casi un 20%.



Figura 8-5: Marejada 9 Agosto 2015, sector norte Puerto de Arica.

Fuente: ChileSurf.cl.

La marejada del 9 de Agosto golpeó tan fuerte las costas de Arica, que las actividades relacionadas con el Campeonato Nacional del Surf "Maui Arica Pro" tuvieron que ser suspendidas y re-asignadas para otras fechas.



Figura 8-6: Ola el Buey, marejada 9 Agosto 2015, Arica.
Fuente: ChileSurf.cl.

Por otro lado, analizando lo ocurrido entre los años 1980 y 2009, el 23 de Agosto del año 1992, ocurrió la ola extrema más grande analizada en el sitio de interés, la cual mantuvo características similares a las de los años 2013 y 2015 anteriormente mencionadas, proveniente de la dirección SW con un periodo de 18 segundos. La ola anterior, fue la utilizada como "altura de ola de diseño" para el presente proyecto.

Periodo de retorno y altura de ola de retorno

Según la distribución de oleaje escogida, en este caso Weibull con factor de forma $K = 2,0$, se calcula la altura de ola de diseño en base al periodo de retorno de la estructura. Sin embargo, la formulación que define la altura depende en gran parte del factor λ , el cual se define de la siguiente forma.

$$\lambda = \frac{\text{número de olas extremas}}{\text{número de años de la muestra}}$$

Este factor λ e incluyen en la formulación que satisface la extrapolación de las alturas de olas para " T " periodo de retorno en años, se puede escribir de la siguiente forma.

$$x^T = A \left(-\ln \left(\frac{1}{\lambda T} \right) \right)^{\frac{1}{K}} + B \quad \text{Weibull}$$

Por tanto, se pone en la duda hasta cuantos años es recomendable utilizar el periodo de retorno. Para lo anterior se propone el siguiente ejercicio.

- Metodología 1: Análisis extremo máximo anual, con data de oleaje completa de 30 años.
- Metodología 2: Análisis extremo aislando tormentas sobre umbral (POT), suponiendo una data de 30 años con 25 (Lambda = 0,85), 35 (Lambda = 1,16), 50 (Lambda = 1,66) y 100 (Lambda = 3,33) alturas de olas calificadas como tormentas.

Obteniendo como resultado lo siguiente:

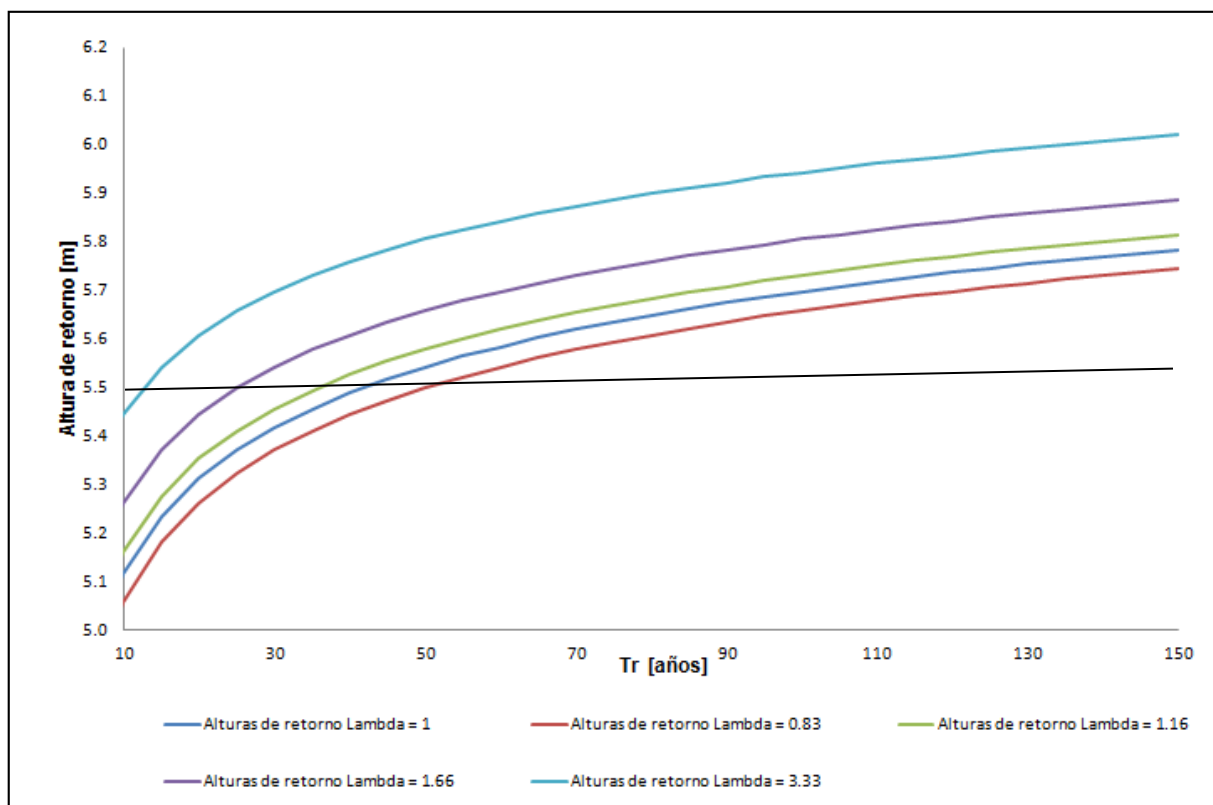


Figura 8-7: Ejercicio alturas de olas de retorno.

Fuente: Elaboración propia.

Para analizar el gráfico anterior, es necesario recurrir a la siguiente tabla, la cual resume las olas máximas ocurridas en toda la data de olas de aguas profundas, entre los años 1980 y 2009.

Tabla 8-1: Alturas de olas extremas en aguas profundas, 1980 - 2009, Arica.

N° orden	Fecha	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
1	22-08-1980 21:00	4,38	16,42	212,86
2	03-08-1981 21:00	4,82	17,02	224,63
3	09-06-1982 21:00	5,00	17,92	208,18
4	15-07-1983 18:00	5,32	18,08	210,11
5	06-07-1984 18:00	4,59	16,49	219,22
6	11-09-1985 12:00	4,86	17,95	206,45
7	17-10-1986 15:00	4,54	18,13	216,83
8	26-07-1987 21:00	4,96	15,41	225,86
9	22-11-1988 0:00	4,71	18,00	219,43
10	23-06-1989 15:00	4,86	18,00	212,06
11	31-03-1990 3:00	4,86	17,80	202,06
12	26-07-1991 3:00	4,92	17,81	220,93
13	23-08-1992 12:00	5,50	18,20	219,81
14	08-05-1993 21:00	4,74	16,78	211,11
15	19-06-1994 9:00	4,76	17,62	218,28
16	15-08-1995 6:00	3,95	14,98	211,56
17	29-05-1996 0:00	4,74	17,05	227,53
18	23-06-1997 0:00	4,28	16,09	216,24
19	30-05-1998 0:00	4,32	16,80	230,37
20	01-06-1999 15:00	3,99	17,78	226,05
21	29-07-2000 0:00	4,02	17,38	221,58
22	03-09-2001 15:00	3,78	16,62	207,59
23	11-10-2002 9:00	3,91	16,19	215,75
24	14-06-2003 6:00	4,35	17,10	230,21
25	24-06-2004 6:00	4,21	16,20	220,63
26	11-09-2005 6:00	4,21	11,42	211,28
27	03-06-2006 6:00	4,33	16,80	222,83
28	06-09-2007 9:00	4,60	17,75	217,98
29	09-06-2008 6:00	4,09	15,69	223,74
30	18-09-2009 15:00	4,26	17,39	209,67

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 8-1, la altura de ola más grande corresponde a la del caso 13, en donde se alcanzó un peak de 5,50 metros, con un periodo de 18 segundos y una dirección SW.

Por lo tanto, el análisis de la Figura 8-7 es posible hacerlo pensando en la altura más grande de las olas calificadas como extremas en aguas profundas. Para el caso de un $\Lambda = 1$, número de olas es idéntico al número de años de la muestra, se tiene que el periodo de retorno para la ola analizada se encuentra entre los 35 y 55 años, considerando que para un periodo de retorno de 70 años la ola en cuestión será de 5,6 metros. En el extremo superior,

analizando el caso $\Lambda = 3,33$, el periodo de retorno para la ola extrema será de 15 años, lo cual corresponde a un horizonte muy cercano a la realidad de las costas de nuestro país hoy en día. Del mismo modo, si se analiza el caso $\Lambda = 0,83$, la ola se repetirá a los 45 y 55 años, considerando que para el periodo de retorno de 85 años la altura será de 5,6 metros, el cual es un centímetro de diferencia.

Por lo tanto, ¿cual debiese ser el periodo de retorno para las futuras construcciones marítimas en nuestro país?. Teniendo en cuenta el análisis anterior y el trabajo realizado por Campos (2016), "*Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*", es posible determinar que el periodo de retorno para las obras costeras no debiese ser mayor a un horizonte de 50 años, con una desviación estándar de al menos 15 a 25 años, teniendo en cuenta el caso en que Λ es igual a la unidad, en donde para un periodo de retorno de 75 años la altura de ola de retorno es de 5,6 metros, cambiando a solo 10 centímetros con respecto a la ola más extrema (Agosto 1992).

Junto a lo analizado en el párrafo anterior, es importante contemplar la importancia de la extensión en años de los datos de oleaje analizados, la Publicación 3201 del SHOA indica que como mínimo se deben utilizar 20 años de datos para generar las condiciones de clima extremo, sin embargo, bajo la experiencia del caso analizado en presente proyecto y el tema discutido anteriormente, el largo de la data de oleaje debiese ser igual o superior a 30 años (dependiendo la disponibilidad de datos) teniendo en cuenta el análisis presentado por Campos (2016) en donde determina que el periodo de retorno de las marejadas más destructivas en nuestro país es de al menos 50 años como promedio.

9. CONCLUSIONES

Para el satisfactorio desarrollo del objetivo general, que es proponer el diseño de obra de protección costera para caleta de pescadores artesanales de Arica, fue necesario realizar diversos objetivos específicos. A continuación, se presenta un análisis para algunos de ellos.

Clima de oleaje en aguas profundas

El clima de oleaje en aguas profundas, realizado con datos NOAA del modelo Global Wavewatch III, deja claro que la incidencia más frecuente (en los 30 años analizados) corresponde al tercer cuadrante, en donde el SW presenta un dominio del oleaje en un 54,65% del tiempo. El rango de alturas de olas más frecuentes se ubica en torno a los 2 y 2,5 metros con una ocurrencia del 35,97%, con periodos más ocurrentes en el rango de los 12 a 14 segundos con el 35,57% del tiempo. Las mayores alturas registradas en el periodo de análisis, desde año 1980 hasta el año 2009, superaron los 5 metros con una ocurrencia despreciable.

Clima de oleaje medio en sitio de interés

El clima de oleaje medio en el sitio de interés, específicamente de la fuente de datos medidos entre el día 22 de julio y el 28 de agosto del año 2013, indica que la dirección más ocurrente corresponde a la SW con un 67,24% del tiempo, mientras que la segunda dirección más frecuente es la WSW con una ocurrencia del 32,76%, ambas direcciones suman el 100% de los datos. En cuanto a las alturas de olas, el rango más frecuente se ubica en torno a los 1 y 1,5 metros con una ocurrencia del 59,39%, seguido por el rango de los 0,5 a 1,0 metros con una incidencia del 26,69%. Para los periodos, el rango más frecuente se ubica entre los 12 y 14 segundos con una aparición del 34,47% seguido por el rango de los 14 a 16 segundos con un 28,67%.

Para el clima de oleaje medio en el sitio de interés, con los parámetros de resumen NOAA transferidos al sitio de interés entre los años 1980 y 2009, se tiene que la dirección más ocurrente proviene desde el SW con una incidencia cercana al 76,83%, seguido por la dirección WSW con una frecuencia del 17,94%, ambas direcciones suman casi el 95% del total de los datos. En cuanto a las alturas de olas, el rango más ocurrente se ubica en torno a los 1,5 y 2,0 metros con una ocurrencia del 43,39% seguidos por el rango de los 1 a 1,5 metros equivalente al 27,14% de los datos. Los periodos más frecuentes se encuentran entre los 14 a 16 segundos con un 36,84%, en donde el rango de los 12 a 14 segundos ocurre en un 36,06%.

Por tanto, la medición insitu en comparación a la transferencia al sitio de interés de 30 años de oleaje proveniente del modelo Global Wavewatch III de la NOAA, indica que las incidencias de oleaje proveniente desde el SW y WSW son las más notables, acompañadas de alturas de olas entre los 0,5 y 2,0 metros para periodos de olas entre los 12 y 16 segundos. Dado esto, se puede decir que la transferencia de oleaje hacia el sitio de interés es válida para caracterizar el clima de oleaje medio y extremo en el lugar, considerando solo la campaña de medición de invierno.

Clima de oleaje extremo en sitio de interés

El clima de oleaje de diseño se realizó en el sitio de interés, utilizando el máximo evento para cada año de los datos, obteniendo un total de 30 eventos extremos, los cuales varían entre los 2,91 y 4,74 metros, para periodos entre los 13,46 y 18,22 segundos entre el SW y WSW. El máximo evento analizado ocurrió el día 23 de agosto del año 1992 para una altura de 4,74 metros, periodo de 18,2 segundos y una dirección proveniente desde el SW.

La caracterización del clima de oleaje extremo se realizó utilizando la distribución estadística de Weibull para distintos valores del factor de forma "k" con un intervalo de confianza del 95%. El mejor resultado se obtuvo para un valor de "k=2,0", en donde la correlación fue del orden del 98% y el error cuadrático de los residuales fue de 0,06 metros.

Dado que las bases de diseño, ver acápite 7.1, definieron un periodo de retorno de 70 años, se tiene que la altura de ola asociada es de 4,70 metros.

Elección de alternativa de Layout

Para verificar la operatividad que ofrecen las alternativas de Layout fue necesario propagar más del 98% de la data de oleaje, desde el sitio de interés hacia el interior de las dársenas, con el fin de que el clima de oleaje se realice con casi el total de los datos utilizados (1980 - 2009).

Según los resultados expuestos en el acápite 7.5.3, la alternativa sugerida como óptima debe alcanzar niveles de operatividad para alturas de olas menores a 0,3 metros al interior de la dársena. Sin embargo, ambas alternativas de Layout satisficieron en más del 99% de operatividad, en donde la alternativa de Layout N° 2 es levemente mejor.

El clima de oleaje para la alternativa de Layout N° 2, la óptima, indica que la probabilidad de excedencia de olas mayores de 0,35 metros es nula para todas las direcciones analizadas.

Este análisis se hizo en base a coeficientes de agitación, resultado de diversas modelaciones numéricas, sin embargo, se debe aclarar que no se consideraron condiciones climáticas con respecto al viento, neblina, visibilidad, criterios necesarios para determinar cierre de puertos.

Caracterización del clima de oleaje en cara expuesta de alternativa de Layout

Para caracterizar el clima de oleaje, en la zona expuesta del rompeolas principal, se utilizaron dos metodologías: la primera consistió en transferir los 30 años de estados de mar desde el sitio de interés hasta la estructura, y la segunda es básicamente la propagación de la ola de diseño hacia el mismo lugar, utilizando en ambas situaciones los coeficientes de agitación obtenidos desde los resultados de la modelación para obtención de coeficientes de agitación.

Por tanto, teniendo en cuenta los resultados del oleaje de diseño de la Tabla 7-46 es posible definir la probabilidad de excedencia a las alturas de olas asociadas a cada tramo de la estructura proyectada, teniendo en cuenta que la todas las condiciones de diseño consideran un oleaje incidente SW con periodo peak de 16 segundos.

Para el tramo 11, tramo 22, tramo 33 y tramo 44, la probabilidad de que las alturas de olas excedan los 5,0 metros es nula, Dado esto, las condiciones de diseño no son excedidas para un oleaje proveniente de la dirección principal SW con periodo peak de 16 segundos. Sin embargo, según el análisis efectuado con la metodología N°1, es probable que el oleaje de diseño sea excedido en un 5% (máximo) en el tramo 44 cuando la dirección incidente sea cercana al WSW, Por tanto, en general las condiciones de diseño estimadas no serán propasadas de acuerdo al análisis estadístico de largo plazo efectuado.

Diseño de estructura de protección

El diseño de la estructura de protección se compuso de dos pilares fundamentales: el primero consiste en el **diseño hidráulico y el segundo en el estructural**.

Para la verificación de los parámetros hidráulicos se utilizó una **cota de marea extrema de 2,02 metros sobre el NRS** (considerando efectos por pleamar máxima y efecto friccional del viento) y **alturas de olas de diseño entre los 2,8 y 4,2 metros**, considerando un nivel de **sobrepaso admisible máximo de 10 l/s/m**, el cual es suficiente para no provocar daños considerables en naves menores. Obteniendo **una cota de coronamiento de 6,0 metros sobre el NRS** para el rompeolas principal, coronación que permitirá que el caudal de sobrepaso máximo se vea excedido un 3,54% en el Tramo 22'. Lo anterior significa que la excedencia sería de al menos 13 días al año, lo cual podría ocurrir durante tormentas de invierno.

Para el pilar estructural, se consideró verificar la estabilidad de los elementos tipo roca, cubos de hormigón y cubípodos, en donde el más favorable es este último dado a que el uso de elementos tipo roca requiere la implementación de unidades superiores a las 17 toneladas, lo cual es no viable bajo el punto de vista de la explotación y transporte (logístico). Para el segundo elemento verificado, cubos de hormigón, los resultados fueron favorables. Sin embargo, este tipo de coraza posee problemas de acoplamiento debido a que por esfuerzo del oleaje y el reacomodo del mismo, se ordenan cara con cara generando que el efecto del run-up se vea incrementado durante el paso del tiempo, lo cual desemboca en problemas de sobrepaso. Dado esto, es que los últimos elementos verificados, **cubípodos, se consideran como la mejor opción bajo el punto de vista estructural e hidráulico**. Estos elementos poseen altos coeficientes de estabilidad, lo que implica que el a diferencia de las rocas, se necesiten unidades de menor tamaño para una misma condición de forzantes. Otra ventaja significativa es que los cubípodos poseen la particularidad que su disposición es del tipo *random*²¹, lo cual es posible debido a sus componentes de trabazón que se disponen en cada una de sus caras, permitiéndoles no acoplarse cara con cara ocasionando que no exista problemas de run-up excesivo durante el paso del tiempo.

²¹ Aleatorio.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Campos, R. (2016). *Análisis de las marejadas históricas y recientes en las cosas de Chile*. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso.
- Cárdenas, C., Gómez, J., & Serrano, J. (2014). *Determinación de valores extremos de oleaje: A partir del análisis en aguas profundas y del análisis en aguas someras*. Valparaíso, Chile: VI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, SIOP 2014, Iquique, Chile.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University.
- Department of the army, U. A. (2003). *Engineering and Design - Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 2 - Types and functions of coastal structures*. Washington, DC: Department of the army.
- Department of the army, U. A. (2003). *Engineering and Design - Coastal Engineering Manual, Part V, Chapter 3 - Shore Protection Projects*. Washington, DC: Department of the army.
- Department of the army, U. A. (1984). *Shore Protection Manual*. Vicksburg, Mississippi: U.S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION.
- DHI. (2012). *MIKE 21 Boussinesq Wave Module*. Denmark: Mike By DHI.
- DHI, D. H. (2002). *Coastal Hydraulics and Oceanographic, Hydraulics module manual reference*. Denmark: Danish Hydraulic Institute.
- Emilia Guisado Pintado, G. M. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*. Sevilla: Universidad Pablo de Olavide.
- EurotopII. (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures, An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*.
- Gokhan Guler, H., Ergin, A., & Ozyurt, G. (2014). A comparative study on the stability formulas of rubble mound breakwaters. *COASTAL ENGINEERING*.
- GSI Ingeniería Ltda. (2013). *Construcción obras de relocalización Caleta Pesquera Arica, Informe Sub Etapa 1B, REV. C., Estudios básicos Quilane*. Viña del Mar.
- Hans F. Burcharth, S. A. (2003). *Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 - Fundamentals of Design*. Washington, DC: Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers.
- Hans F. Burcharth, S. A. (2003). *Engineering and Design - Coastal Engineer Manual, Part VI, Chapter 5 - Fundamentals of Design*. Washington, DC: Department of de Army, U.S Army Corps of Engineers.
- Holthuijsen. (2007). *Waves in Ocean and Coastal Waters*. Cambridge.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. United States of America, New York: Cambridge University.
- Institute, D. H. (2012). *MIKE 21 wave modelling, MIKE 21 BW Boussinesq Wave Module - Short description*. Denmark: MIKE BY DHI.
- Iñigo J. Losada, P. L. (2000). Modelos matemáticos y numéricos para el estudio de agitación portuaria. *Estudios e investigaciones marinas*, 47-67.
- Japan, T. O. (2002). *Technical Standars And Comentaries For Port And Harbour Facilities In Japan*. Tokio, Japan.
- Jebbe van der Werf, K. N. (2014). WAVE BREAKING EFFECTS ON MEAN SURF ZONE HYDRODYNAMICS. En L.-Y. O. Jarle Berntsen, *Ocean Dynamics* (págs. 1763-1774). Berlin Heidelberg : The 5th International Workshop on Modeling Ocean (IWMO).
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Jansen. (1994). *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press.

María del Carmen Palomino Monzón, J. L. (2000). *Descripción, medida y análisis del oleaje*. Madrid: Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos - Universidad politécnica de Madrid.

Massel, S. R. (1996). *Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction. Volume 11*. Australi: Australian Institute of Marine Science.

MIKE. (2012). *MIKE 21 Boussinesq Wave Module, Scientific Documentation*. Denmark: DHI.

MIKE. (2012). *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. Hersholm, Denmark: DHI.

Molina, M. (2016). *Eventos extremos de oleaje para el diseño de obras, ¿Evaluar en aguas profundas o en el sitio?* Valparaíso, Chile: VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria, SIOP 2016, San Antonio, Chile.

Monsalve, E. (2010). *Desarrollo e implementación de modelo de transferencia espectral de oleaje en bahía de Valparaíso, Chile*. Valparaíso: Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Neessen, K. C. (29 de November de 2012). *Analysing depth-dependence of cross-shore mean-flow dynamics in the surf zone - Master Thesis*. Deltares, Rotterdam: University of Twente, Water Engineering & Management.

Nicolau, F. (2006). *Comparación metodológica de tranferencias de oleaje*. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Ocho Libros Editores. (2004). *Chile País Oceánico*. Ocho Libros Editores Ltda.

Ole R. Sorensen, H. A. (2004). Boussinesq-type modelling using an unstructured finite element technique. *Coastal Engineering*, Coastal Engineering 50 (2004) 181-198.

Patricio Winckler Grez, M. C. (2015). *EL TEMPORAL DEL 8 DE AGOSTO DE 2015 EN LA BAHÍA DE VALPARAÍSO*. Valparaíso: SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.

Permanent International Association of Navigation Congresses. (1995). *Criteria for movements of moored ships in harbours - a practical guide*. PIANC A.D. 1885 AIPCN - NAVIGARE NECESSE.

R. Medina, J., & Gómez-Martin, M. E. (2016). *Cubipod, Manual 2016*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Robert H. Stewart, D. o. (1997 - 2000). *Introduction To Phisical Oceanography*. Texas, United States of America: Texas A & M University.

Robin Davidson, A. (2010). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. New York, United States: Cambridge University Press.

ROM. (2000). *R.O.M. 3.1-99: Proyecto de la configuración marítima de los puertos; Canales de acceso y Áreas de flotación*. Madrid: Puertos del Estado.

ROM. (1990). *ROM 0.2-90: Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*. Madrid: Puertos del Estado, Gobierno de España.

ROM1.0-09. (2010). *Recommendatios for the Project Design and Construction of Breakwaters (Part I: Calculation and Project Factors. Climate Agents)*. España: Puertos del Estado, Gobierno de España, Ministerio de Fomento.

SHOA. (1992). *Pub. 3013, Glosario de Marea y Corrientes*. Chile: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

SHOA. (2005). *Pub. 3201, Instrucciones Oceanográficas N° 1 - Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

SHOA. (1999). *Pub. 3202, Instrucciones Oceanográficas N° 2*. Chile: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

SHOA. (2009). *Publicación 3009: Tablas de mareas de la costa de Chile*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

- Universidad de Cantabria, G. d. (2000). *Documento de Referencia, Volumen I Dinámicas*. Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- Van der Meer, J. (1987). Stability of Breakwater Armour Layers - Design Formulae. *Journal of Coastal Engineering* - N° 11 , 219 - 239.
- WMO, S. o. (1998). *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Zhou Liu, P. F. (2001). *Generation and analysis of random waves* . Alborg, Denmark: Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning Instituttet for Vand Jorg og Miljøknik, Aalborg Universitet.

ANEXO 1: Código Extracción Datos GRB2 NOAA

waves_from_grib-1_Hm0.m

```
nc=ncgeodataset('multi_1.glo_30m.hs.200901.grb2');

% list variables
nc.variables

% variable of interest
var='Significant_height_of_combined_wind_waves_and_swell_surface';

% Antofa buoy location
lon=288.7
lat=-23.6

% time series at specified location
dat=nj_tseries(nc,var,lon,lat,'method','nearest')

% plot it up
plot(dat.time,dat.vals);datetick
title(sprintf('Time series of %s at (%7.3f,%7.3f)',var,lat,lon),'interpreter','none')
grid
```

waves_from_grib-1_Tp.m

```
nc=ncgeodataset('multi_1.glo_30m.tp.200901.grb2');

% list variables
nc.variables

% variable of interest
var='Primary_wave_mean_period_surface';

% boston buoy location
lon=288.7
lat=-23.6

% time series at specified location
dat=nj_tseries(nc,var,lon,lat,'method','nearest')

% plot it up
plot(dat.time,dat.vals);datetick
title(sprintf('Time series of %s at (%7.3f,%7.3f)',var,lat,lon),'interpreter','none')
grid
```

waves_from_grib-1_Dp.m

```
nc=ncgeodataset('multi_1.glo_30m.Dp.200901.grb2');  
  
% list variables  
nc.variables  
  
% variable of interest  
var='Primary_wave_direction_degree_true_surface';  
  
% boston buoy location  
lon=289.0  
lat=-23.5  
  
% time series at specified location  
dat=nj_tseries(nc,var,lon,lat,'method','nearest')  
  
% plot it up  
plot(dat.time,dat.vals);datetick  
title(sprintf('Time series of %s at (%7.3f,%7.3f)',var,lat,lon),'interpreter','none')  
grid
```

ANEXO 2: Código Transferencia Parámetros Resumen

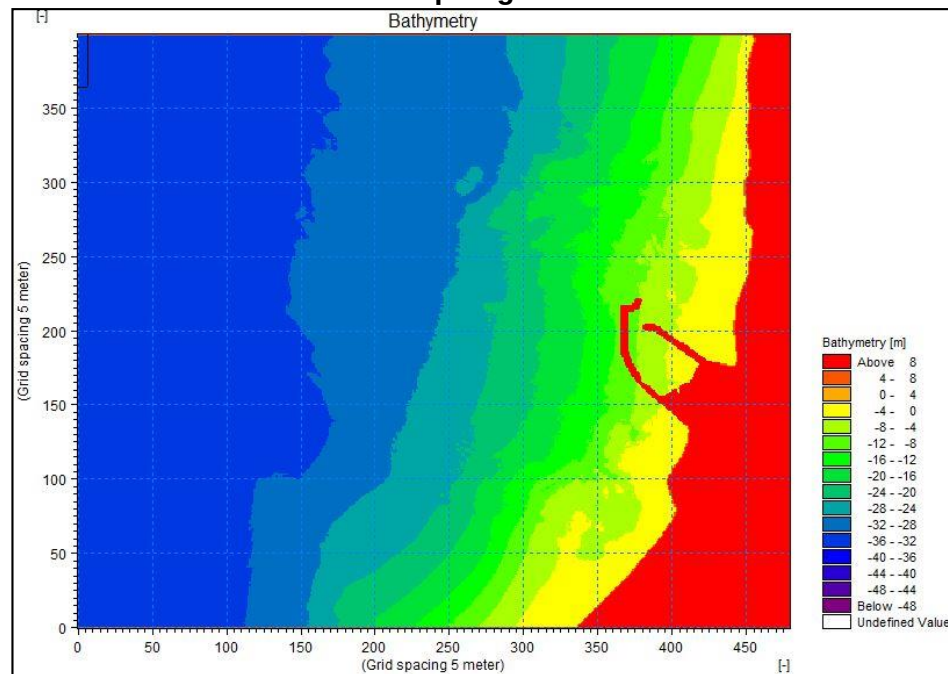
```
clc,clear
load datos.txt
load Ka.txt
load Kd.txt
HsAP=datos(:,1);
HsAS=zeros(length(HsAP),1); %matriz de ceros para optimizar
TP=datos(:,2);
DpAP=datos(:,3);
DpAS=zeros(length(DpAP),1); %matriz de ceros para optimizar
tr=[5:2:23 24]; %rango de periodos 5-23s c/2 s y 23-24 rango final.
dr=[180 187.5:15:307.5 315]; %mismo direcciones

for l=1:length(tr)-1; %n° de veces = al n° de rangos (periodo)
    for k=1:length(dr)-1; %n° de veces = al n° de rangos (dir)
        for j=1:length(datos);
            if TP(j)>=tr(l) && TP(j)<tr(l+1) && DpAP(j)>=dr(k) && DpAP(j)<dr(k+1);% evaluar entre
los rangos l y l+1, k y k+1
                HsAS(j,1)=HsAP(j)*Ka(l,k); %multiplica la altura por el valor de los índices l y k de la
matriz Ka
                DpAS(j,1)=DpAP(j)+Kd(l,k);%modifica la dirección por el valor de los índices l y k de
la matriz Kd
            end
        end
    end
end

% arch=fopen('transf.txt','w');
% fprintf(arch,'%5.2f %5.3f','hf','dirf');
% fclose(arch);
```

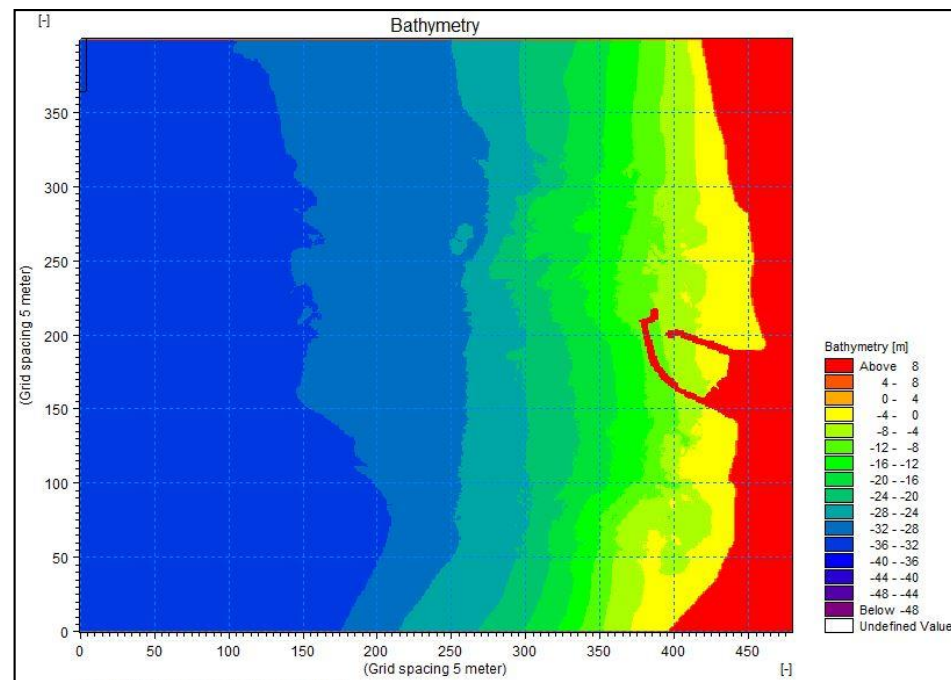
ANEXO 3: Mallas de Cálculo Layout Propuestos

Tipología 1



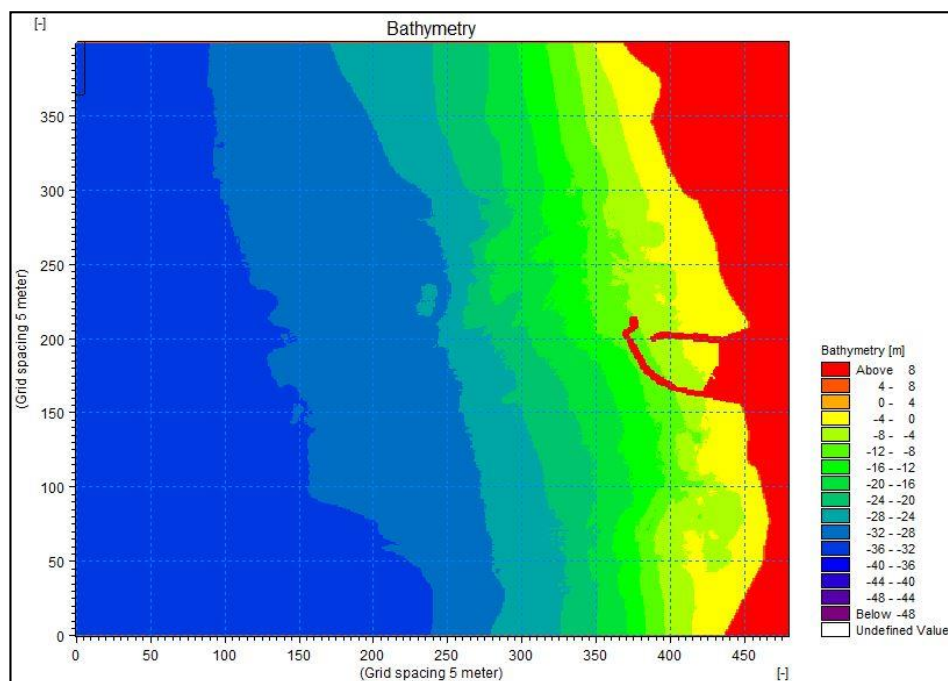
Malla Batimétrica orientada a 225°.

Fuente: Elaboración propia.



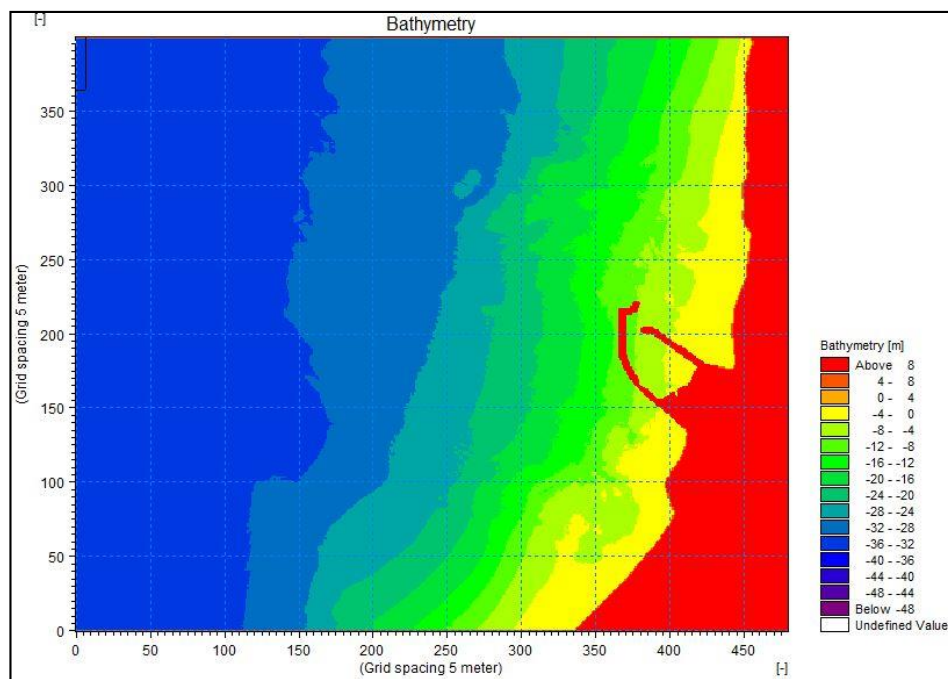
Malla Batimétrica orientada a 240°.

Fuente: Elaboración propia.



Malla Batimétrica orientada a 255°.

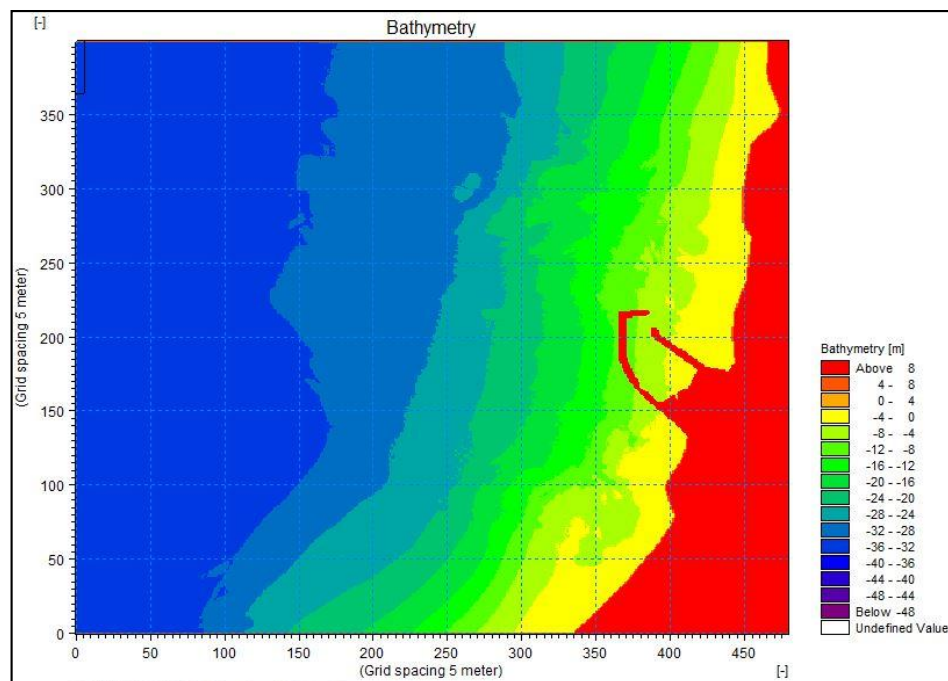
Fuente: Elaboración propia.



Malla Batimétrica orientada a 270°.

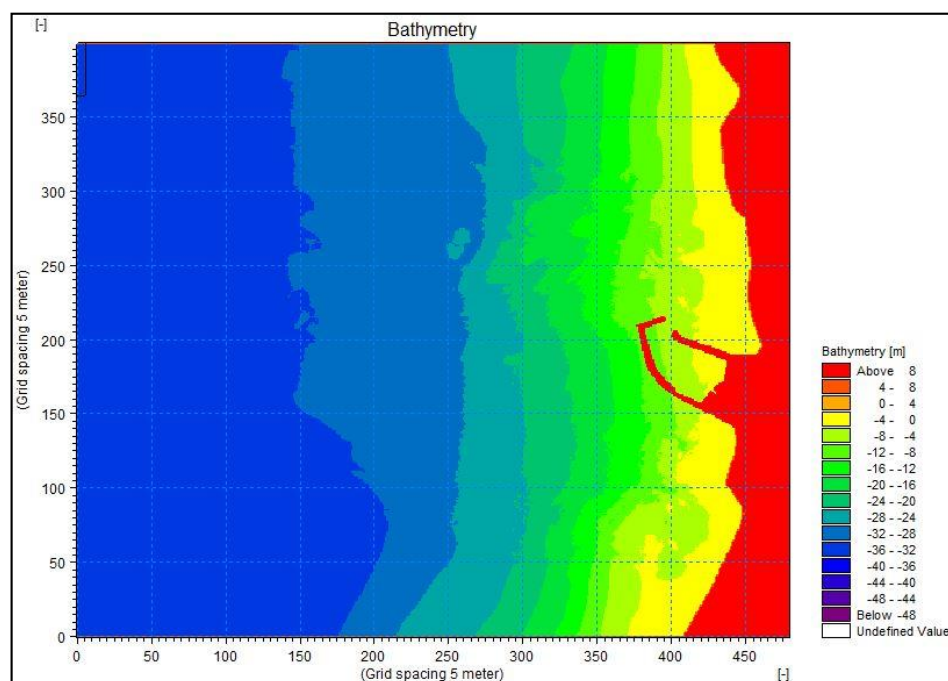
Fuente: Elaboración propia.

Tipología 2



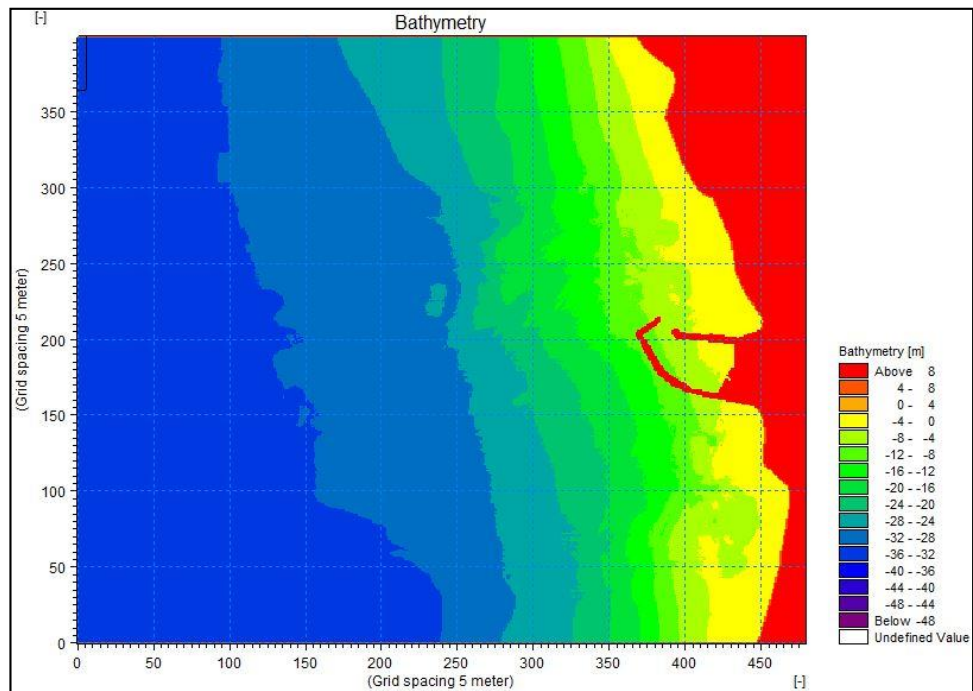
Malla Batimétrica orientada a 225°.

Fuente: Elaboración propia.



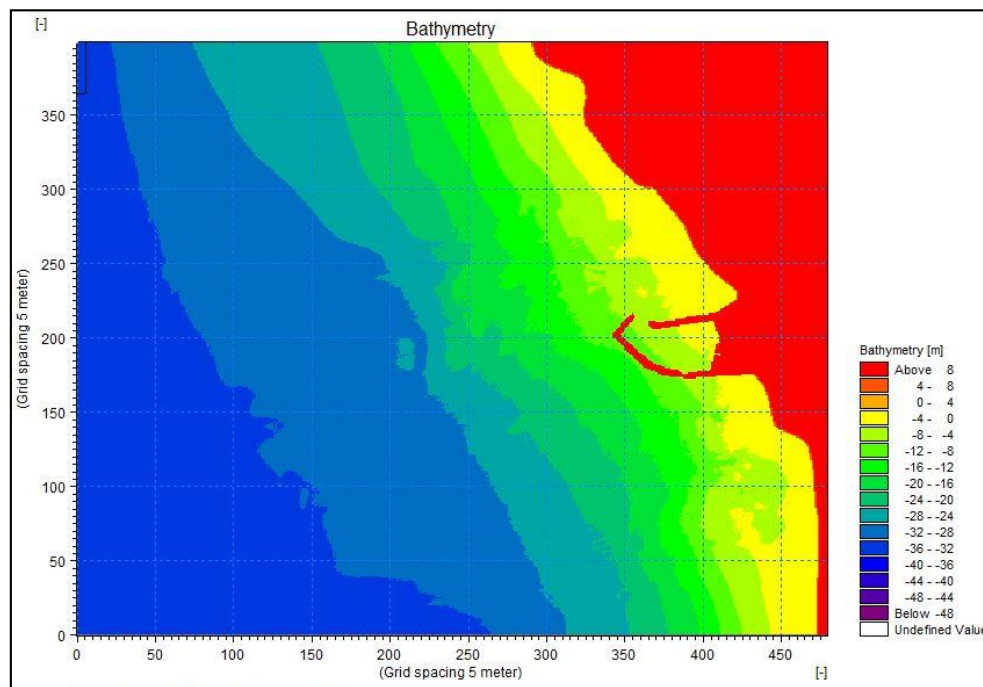
Malla Batimétrica orientada a 240°.

Fuente: Elaboración propia.



Malla Batimétrica orientada a 255°.

Fuente: Elaboración propia.



Malla Batimétrica orientada a 270°.

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4: Planos y especificaciones técnicas

SOLO EN FORMATO DIGITAL

ANEXO 5: Carta Solicitud Información a DOP

Señor
José Luis Roco Contreras
Dirección de Obras Portuarias
XV Región de Arica y Parinacota
Arturo Prat 305, piso 2
Arica

Mat.: Solicitar información para el desarrollo de mi proyecto de título

De mi consideración:

En el marco de desarrollo de mi proyecto de título denominado "**Propuesta de diseño para la estructura de protección caleta de pescadores en Arica**", solicito autorizar la utilización de los datos obtenidos de la Consultoría "**Construcción de Obras de Relocalización Caleta Pesquera Arica**", desarrollado por la empresa **GSI Ingenieros Consultores**.

El objetivo del proyecto de título es utilizar los resultados obtenidos en esta Consultora, y proponer una metodología de diseño para las obras de protección costeras. Para ello se utilizarán algunos resultados y/o diseño obtenidos por **GSI** para proponer mejoras o simplemente realizar un diseño más específico de las obras de protección que se propusieron en dicha Consultoría. Para lo anterior, es necesario utilizar información de terreno que servirá para la construcción de modelos numéricos, que son la base del Proyecto de Título, los cuales se listan a continuación:

- Datos y resultados obtenidos del informe Etapa 1B Rev. C, Construcción de obras de relocalización Caleta Pesquera Arica, Estudios Básicos Sector Quiane (GSI- Octubre 2013).
- Mediciones de oleaje: Los datos de oleaje medidos en terreno realizados en la ventana de tiempo comprendida entre el 22 de julio y el 28 de agosto del año 2013.
- Mediciones de marea: Las mediciones de mareas iniciadas el día 22 de julio del año 2013, terminando el 28 de agosto del año 2013.
- El levantamiento batimétrico requerido, posee alrededor de 100 hectáreas de medición en la zona aledaña al proyecto.

Agradezco de antemano su disposición y cooperación en lo solicitado, donde recalco que los datos solicitados serán utilizados solamente con fines académicos.

Saludos Cordiales,


PABLO VERA G.
ALUMNO MEMORISTA
UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

Viña del Mar, 25 de Febrero de 2016.