



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE  
OBRAS MARÍTIMAS CONDICIONADAS POR LA ACCIÓN  
DEL OLEAJE, UNA APLICACIÓN A DEFENSAS  
COSTERAS.**

**NELSON ANDRÉS MOLINA VARGAS**

MAYO 2021

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS  
CONDICIONADAS POR LA ACCIÓN DEL OLEAJE, UNA APLICACIÓN A  
DEFENSAS COSTERAS**

**Nelson Andrés Molina Vargas**

<b>COMISIÓN REVISORA</b>	<b>NOTA</b>	<b>FIRMA</b>
MAURICIO MOLINA P. Profesor guía	_____	_____
Eduardo González P. Revisor	_____	_____
Sebastián Escobar M. Revisor	_____	_____

## **DECLARACIÓN**

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.*

*La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

---

**NELSON MOLINA VARGAS**  
**ALUMNO MEMORISTA**

---

**MAURICIO MOLINA PEREIRA**  
**PROFESOR GUÍA**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Una vez aprobado el documento se completa esta sección.*

# **CONTENIDOS**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCES</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVOS	18
2.2	ALCANCES	18
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
3.1	OLEAJE	19
3.1.1	GENERALIDADES	19
3.1.2	ESTADÍSTICA DE OLEAJE	19
3.1.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE	20
3.1.4	MODELOS HINDCASTING: GENERACIÓN OCEÁNICA	21
3.1.5	MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE	22
3.2	MAREAS	23
3.2.1	MAREA ASTRONÓMICA	24
3.2.2	MAREA METEOROLÓGICA	25
3.2.3	ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE MAREAS	27
3.3	PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS	29
3.4	ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE	32
3.5	DISEÑO DE ROMPEOLAS: DIQUE EN TALUD	33
3.5.1	BASES DE DISEÑO	34
3.5.2	DISEÑO DE ESTABILIDAD	35
3.5.3	DISEÑO HIDRÁULICO	38
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>40</b>
4.1	ANÁLISIS PREVIO	40
4.2	BASES DE DISEÑO	40
4.3	ANÁLISIS BATIMÉTRICO	41
4.3.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE	41
4.3.2	ÁREA DE APLICACIÓN	41
4.4	CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE	42
4.4.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE	42
4.4.2	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	43
4.4.3	CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	43

4.4.4 TRANSFERENCIA DE OLEAJE.....	44
4.5 ANÁLISIS DE MAREAS Y NIVELES DE DISEÑO .....	46
4.5.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	46
4.5.2 MAREA ASTRONÓMICA .....	47
4.5.3 MAREA METEOROLÓGICA .....	48
4.5.4 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS .....	50
4.5.5 NIVELES DE DISEÑO.....	52
4.6 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE .....	53
4.7 APLICACIÓN CASO PRÁCTICO.....	54
4.7.1 CRITERIOS MARÍTIMOS DE DISEÑO .....	54
4.7.2 DISEÑO DE ESTABILIDAD.....	55
4.7.3 DISEÑO HIDRÁULICO.....	55
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
5.1 BASES DE DISEÑO .....	56
5.2 ANÁLISIS BATIMÉTRICO .....	57
5.2.1 CONSTRUCCIÓN DE BATIMETRÍAS.....	57
5.2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO .....	59
5.2.3 EFECTOS DE LA DENSIDAD BATIMÉTRICA EN LA PROPAGACIÓN DE OLEAJE .....	64
5.3 CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE .....	73
5.3.1 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	73
5.3.2 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	75
5.3.3 TRANSFERENCIA DE OLEAJE.....	78
5.3.4 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN SITIO DE INTERÉS.....	87
5.3.5 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN SITIO DE INTERÉS .....	88
5.4 ANÁLISIS DE MAREA Y NIVELES.....	92
5.4.1 CALIDAD DE LA INFORMACIÓN.....	92
5.4.2 MAREA ASTRONÓMICA .....	92
5.4.3 MAREA METEOROLÓGICA .....	96
5.4.4 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS .....	102
5.4.5 NIVELES DE DISEÑO.....	103
5.5 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE .....	105
5.6 APLICACIÓN CASO PRÁCTICO.....	107

5.6.1	CRITERIOS MARÍTIMOS DE DISEÑO .....	107
5.6.2	DISEÑO DE ESTABILIDAD.....	109
5.6.3	DISEÑO HIDRÁULICO.....	114
<b>6</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>118</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>137</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>139</b>
<b>10</b>	<b>ANEXO A - BASES DE DISEÑO.....</b>	<b>142</b>
<b>11</b>	<b>ANEXO B - ANÁLISIS BATIMÉTRICO .....</b>	<b>144</b>
<b>12</b>	<b>ANEXO C - CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE.....</b>	<b>148</b>
12.1	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	148
12.2	CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	151
12.3	TRANSFERENCIA DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS .....	153
12.4	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN EL SITIO DE INTERÉS .....	155
12.5	CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN EL SITIO DE INTERÉS .....	161
12.6	EVALUACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE OBRAS, SEGÚN MOLINA (2016).....	164
<b>13</b>	<b>ANEXO D - ANÁLISIS DE MAREA Y NIVELES.....</b>	<b>167</b>
13.1	CALIDAD DE LA INFORMACIÓN.....	167
13.2	ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE MAREAS .....	168
13.3	ANÁLISIS ARMÓNICO DE MAREAS .....	170
13.4	ANÁLISIS DE LA MAREA METEORÓLOGICA.....	171
13.4.1	ANÁLISIS DE RESIDUO .....	171
13.4.2	EFFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	172
<b>14</b>	<b>ANEXO E - ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE .....</b>	<b>174</b>
<b>15</b>	<b>ANEXO F - APLICACIÓN CASO PRÁCTICO .....</b>	<b>183</b>
15.1	DISEÑO DE ESTABILIDAD.....	183
15.2	DISEÑO HIDRÁULICO.....	184
<b>16</b>	<b>ANEXO G - EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>185</b>
16.1	FILTRO, NÚCLEO Y PIE DE APOYO.....	185
16.2	MURO DE CONTENCIÓN.....	186

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Registro de mareas en la bahía de Valparaíso para el mes de enero, año 2016. ....	24
Figura 2: Principales planos mareales. ....	29
Figura 3: Esquema generalizado de un Dique en talud. ....	33
Figura 4: Coeficiente de permeabilidad, Formulación de Van der Meer. ....	37
Figura 5: Área de aplicación Bahía de Valparaíso. El rectángulo amarillo representa los límites establecidos para la comparación de mallas batimétricas.....	42
Figura 6: Ubicación nodo Valparaíso 33.00° S y 73.00° W. ....	43
Figura 7: Esquema de mallas de propagación. ....	45
Figura 8: Estación de monitoreo para el nivel del mar, Valparaíso.....	47
Figura 9: Esquema de definición Setup de oleaje. ....	49
Figura 10: Esquema de parámetros desarrollados en la obtención de la altura de oleaje en zona rompiente. ....	53
Figura 11: Ubicación área de aplicación caso práctico.....	54
Figura 12: Información batimétrica utilizada para la construcción de la Batimetría Completa. Las x representan los vectores de profundidad con una densidad aproximada de 100 puntos por km <sup>2</sup> .....	57
Figura 13: Información batimétrica utilizada para la construcción de la Batimetría Modificada. Las x representan los vectores de profundidad con una densidad aproximada de 3 puntos por km <sup>2</sup> .....	58
Figura 14: Mapa comparativo de veriles cada 20 [m]. En rojo la información de la Batimetría Modificada, en negro los veriles asociados a la Batimetría Completa. ....	59
Figura 15: Diferencias de profundidades en [m], Batimetría Completa y Batimetría Modificada. ....	60
Figura 16: Comparación de profundidades sección transversal a). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).....	61
Figura 17: Comparación de profundidades sección transversal b). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).....	62
Figura 18: Comparación de profundidades sección transversal c). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).....	63
Figura 19: Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar Hs= 2.5, Tp= 13 [s] y dirección SW.....	64
Figura 20: Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar Hs= 6.12, Tp= 18 [s] y dirección WSW. ....	65

Figura 21: Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar $H_s= 6.13$ , $T_p= 12$ [s] y dirección NNW.....	66
Figura 22: Series de altura de ola a lo largo de la costa para veril de los 10 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). En marcadores azules la Batimetría Completa, en rojo la Batimetría Modificada.....	67
Figura 23: Series de altura de ola a lo largo de la costa para veril de los 20 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). En marcadores azules la Batimetría Completa, en rojo la Batimetría Modificada.....	69
Figura 24: Comparación de distribución de frecuencias para las direcciones SW, WSW y NNW, veril 10 [m].....	71
Figura 25: Comparación de distribución de frecuencias para las direcciones SW, WSW y NNW, veril 20 [m].....	72
Figura 26: Rosa de oleaje Dirección vs Altura.....	74
Figura 27: Rosa de oleaje Dirección vs Periodo.....	74
Figura 28: Oleaje extremo en aguas profundas, tercer cuadrante, Weibull ( $k = 1.0$ ). .....	76
Figura 29: Oleaje extremo en aguas profundas, cuarto cuadrante, Weibull ( $k = 1.4$ ). .....	77
Figura 30: Transferencia de oleaje para la Batimetría Completa, Bahía de Valparaíso. La barra de color indica la altura de ola significativa en [m], para el estado de mar $H_{m0}= 6.13$ [m], $T= 12$ [s], Dirección NNW.....	79
Figura 31: Transferencia de oleaje para la Batimetría Modificada, Bahía de Valparaíso. La barra de color indica la altura de ola significativa en [m], para el estado de mar $H_{m0}= 6.13$ [m], $T= 12$ [s], Dirección NNW.....	79
Figura 32: Ubicación Nodos de Control en aguas someras, Bahía de Valparaíso, frente al paseo Juan de Saavedra. ....	80
Figura 33: Comparación de distribución de frecuencias para los Nodos de Control 1 y 2. 86	
Figura 34: Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en el sitio de interés, cuarto cuadrante, Batimetría Completa.....	89
Figura 35: Comparación de oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 1.....	90
Figura 36: Serie del nivel del mar corregida para Valparaíso entre el año 2000 a 2015... 92	
Figura 37: Niveles de marea, Valparaíso, enero 2012. ....	93
Figura 38: Marea astronómica entre los años 2000 a 2015.....	95
Figura 39: Serie de marea meteorológica obtenida (Residuo meteorológico). ....	96
Figura 40: Registro de variaciones del nivel del mar, septiembre 2015.....	97
Figura 41: Marea meteorológica extrema, Weibull ( $k = 1$ ). ....	98
Figura 42: Periodo de retorno conjunto de altura de olas y nivel del mar. ....	102
Figura 43: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional.....	105

Figura 44: Esquema resumen de los criterios preliminares de diseño, utilizados para el pre-diseño de la defensa costera. ....	108
Figura 45: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional. ....	124
Figura 46: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico. ....	125
Figura 47: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional. ....	128
Figura 48: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico. ....	129
Figura 49: Batimetría Completa. La barra de color indica el rango de profundidades en metros. ....	144
Figura 50: Batimetría Modificada. La barra de color indica el rango de profundidades en metros. ....	145
Figura 51: Diagramas de dispersión Hs [m] Batimetría Completa vs Hs Batimetría Modificada para veril de 10 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). ....	146
Figura 52: Diagramas de dispersión Hs [m] Batimetría Completa vs Hs Batimetría Modificada para veril de 20 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). ....	147
Figura 53: Distribución de frecuencias para la Altura significativa. ....	149
Figura 54: Distribución de frecuencias para el Periodo peak. ....	150
Figura 55: Distribución de frecuencias para la Dirección media. ....	150
Figura 56: Comparación de olaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 2. ....	163
Figura 57: Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en cada sitio. Valor círculo indica eventos extremos que no lo son en aguas profundas. ....	164
Figura 58: Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio (rojo) y propagación al sitio de las alturas estimadas en aguas profundas por parámetros medios (negro), tercer (gris)	

y cuarto cuadrante (azul) tanto por selección de máximos anuales (línea continua) como de valores sobre umbral (línea punteada).....	165
Figura 59: Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio con selección de máximo anual (rojo continua) y valores sobre el umbral (rojo punteada) y propagación al sitio de de las alturas estimadas en aguas profundas divididas por dirección de incidencia tercer cuadrante (gris segmentada) y cuarto cuadrante (negra punteada).....	166
Figura 60: Serie del nivel del mar registrada para Valparaíso entre el año 2000 a 2015.	167
Figura 61: Serie del nivel del mar registrada para Valparaíso año 2008. ....	167
Figura 62: Variación de la presión atmosférica año 2013.....	172
Figura 63: Variación de la presión atmosférica año 2014.....	172
Figura 64: Variación de la presión atmosférica año 2015.....	173
Figura 65: Variación de la presión atmosférica año 2016.....	173
Figura 66: Plano topo-batimétrico sector Juan de Saavedra. ....	174
Figura 67: Plano topo-batimétrico sector Juan de Saavedra. ....	174
Figura 68: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño probabilístico. ....	179
Figura 69: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional.....	179
Figura 70: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño probabilístico .....	180
Figura 71: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Completa. ....	180
Figura 72: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Completa. ....	181
Figura 73: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Modificada. ....	181
Figura 74: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Modificada. ....	182
Figura 75: Evaluación del coeficiente de shoaling.....	182
Figura 76: Tasa de sobrepaso admisible. ....	184
Figura 77: Recomendaciones para la estimación del peso de los elementos de filtro y núcleo.....	185
Figura 78: Recomendación para la estimación del pie de apoyo de la estructura. ....	186
Figura 79: Tipología de muro de contención considerado. ....	186

Figura 80: Presión total y neta de agua a través del muro de contención. ....	187
Figura 81: Empuje de tierra sobre el muro de contención. ....	187

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Corrección por presión atmosférica.....	26
Tabla 2: Constituyentes de marea comúnmente empleadas.....	28
Tabla 3: Coeficientes para la estimación aproximada de las alturas de ola en la zona rompiente.....	32
Tabla 4: Valor $K_D$ para $H = H_s$ . ....	36
Tabla 5: Nivel de daño "S", Formulación de Van der Meer.....	37
Tabla 6: Valores Factor de Rugosidad.....	39
Tabla 7: Características generales de la Grilla batimétrica de propagación. ....	46
Tabla 8: Resumen de valores para los escenarios considerados.....	56
Tabla 9: Características utilizadas en la construcción de las Batimetrías, Análisis Batimétrico.....	58
Tabla 10: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo.....	73
Tabla 11: Oleaje extremo en aguas profundas, Valparaíso, tercer cuadrante. ....	76
Tabla 12: Oleaje extremo en aguas profundas, Valparaíso, cuarto cuadrante. ....	77
Tabla 13: Parámetros propagados en el análisis batimétrico. ....	78
Tabla 14: Coordenadas Nodo bahía de Valparaíso. ....	80
Tabla 15: Resultados propagación parámetros cuarto cuadrante, Nodo de Control 1.....	81
Tabla 16: Resultados propagación parámetros cuarto cuadrante, Nodo de control 2. ....	82
Tabla 17: Matriz de las diferencias de coeficientes de altura para el Nodo de Control 1. .	84
Tabla 18: Matriz de las diferencias de coeficientes de altura para el Nodo de Control 2. .	85
Tabla 19: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo, Nodo control 1 Batimetría Completa.	87
Tabla 20: Comparación de valores oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 1. ....	90
Tabla 21: Comparación alturas de diseño aguas profundas vs sitio de interés, Nodo de Control 1. ....	91
Tabla 22: Planos de referencia mareal para Valparaíso entre los años 2000 a 2015 con su probabilidad de ocurrencia dentro de la estadística.....	93
Tabla 23: Planos de referencia mareal complementarios para Valparaíso entre los años 2000 a 2015 con su probabilidad de ocurrencia dentro de la estadística. ....	94
Tabla 24: Marea meteorológica extrema, Valparaíso. ....	98
Tabla 25: Valores anuales de presión atmosférica, Máximos, Medios y Mínimos, Valparaíso. ....	99
Tabla 26: Parámetros iniciales para la sobre elevación del nivel del mar por viento. ....	100
Tabla 27: Parámetros cálculo <i>Set-up</i> de oleaje.....	101

Tabla 28: Niveles de diseño convencional. ....	103
Tabla 29: Niveles de diseño probabilístico. ....	104
Tabla 30: Estimación de alturas de ola en zona rompiente. ....	106
Tabla 31: Peso y Dimensiones de los elementos para un nivel de diseño convencional. ....	109
Tabla 32: Peso y Dimensiones de los elementos, para un nivel de diseño probabilístico. ....	111
Tabla 33: Peso y Dimensiones de los elementos, para un nivel de diseño convencional. ....	112
Tabla 34: Caudal de sobrepaso estimado considerando un nivel de diseño convencional. ....	114
Tabla 35: Caudal de sobrepaso estimado considerando un nivel de diseño probabilístico. ....	116
Tabla 36: Comparación parámetros de diseño para un escenario de 25 años de periodo de retorno. ....	123
Tabla 37: Comparación parámetros de diseño para un escenario de 50 años de periodo de retorno. ....	127
Tabla 38: Vida útiles mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo. ....	142
Tabla 39: Riesgos máximos admisibles. ....	143
Tabla 40: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo. ....	148
Tabla 41: Incidencia conjunta Periodo vs Dirección. ....	149
Tabla 42: Lista de eventos seleccionados para el cuarto cuadrante en aguas profundas. ....	151
Tabla 43: Lista de eventos seleccionados para el tercer cuadrante en aguas profundas. ....	152
Tabla 44: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 1, Batimetría Completa. ....	153
Tabla 45: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 1, Batimetría Modificada. ....	153
Tabla 46: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 2, Batimetría Completa. ....	154
Tabla 47: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 2, Batimetría Modificada. ....	154
Tabla 48: Incidencia conjunta de Periodo vs Dirección, Batimetría Completa. ....	155
Tabla 49: Incidencia conjunta de Altura vs Dirección, Batimetría Completa. ....	155
Tabla 50: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo, Batimetría Modificada. ....	156
Tabla 51: Incidencia conjunta de Periodo vs Dirección, Batimetría Modificada. ....	156
Tabla 52: Incidencia conjunta de Altura vs Dirección, Batimetría Modificada. ....	157

Tabla 53: Incidencia conjunta de Altura-Periodo.....	157
Tabla 54: Incidencia conjunta de Periodo-Dirección.....	158
Tabla 55: Incidencia conjunta de Altura-Dirección.....	158
Tabla 56: Incidencia conjunta de Altura-Periodo.....	159
Tabla 57: Incidencia conjunta de Periodo-Dirección.....	159
Tabla 58: Incidencia conjunta de Altura-Dirección.....	160
Tabla 59: Lista de eventos seleccionados en el sitio de interés, Nodo de Control 1, Batimetría Completa.....	161
Tabla 60: Lista de eventos seleccionados en el sitio de interés, Nodo de Control 2, Batimetría Completa.....	162
Tabla 61: Comparación de valores de oleaje en el sitio de interés, Nodo de Control 2. .	163
Tabla 62: Comparación alturas de diseño en aguas profundas y sitio de interés, Nodo de Control 2.....	163
Tabla 63: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2010.....	168
Tabla 64: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2011.....	168
Tabla 65: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2012.....	168
Tabla 66: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2013.....	169
Tabla 67: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2014.....	169
Tabla 68: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2015.....	169
Tabla 69: Constituyentes armónicas representativas de la localidad de Valparaíso entre el año 2000 a 2015.....	170
Tabla 70: Nivel de Reducción de Sonda calculado para Valparaíso entre los años 2000 a 2015.....	170
Tabla 71: Lista de eventos seleccionados para el estudio extremo de la marea meteorológica.....	171
Tabla 72: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño convencional de periodo de retorno 25 años.....	175
Tabla 73: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño convencional de periodo de retorno 50 años.....	176
Tabla 74: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño probabilístico de periodo de retorno 25 años.....	177
Tabla 75: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño probabilístico de periodo de retorno 25 años.....	178
Tabla 76: Peso y Dimensiones de los elementos para un nivel de diseño probabilístico.	183

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar la sensibilidad de un diseño de obras marítimas a través de la caracterización de los estudios de condiciones naturales. La sensibilidad se obtiene cuantificando, mediante el pre-diseño de una defensa costera, la variación de parámetros y/o metodologías que integran las etapas comunes en los proyectos de obras marítimas.

Con base a información de proyectos que involucran el diseño de obras marítimas, se identificaron y seleccionaron los estudios comunes para este tipo de infraestructura, destacando como condiciones naturales relevantes: batimetría, oleaje, marea, y niveles del mar.

La obtención de resultados comienza con el desarrollo de un análisis batimétrico integral, fundamentado en la construcción de dos batimetrías con variada resolución que permiten, evaluar y cuantificar las diferencias que induce la falta de información batimétrica en la propagación de los modelos de oleaje propuestos para la zona de estudio, obteniéndose por ejemplo, diferencias máximas de hasta 28 [m] en el campo de las profundidades (entre una batimetría y otra), diferencias de profundidad que no se ven reflejadas al momento de utilizar las batimetrías como herramientas de propagación en modelos de oleaje para la estimación de parámetros de diseño, destacando como desigualdades máximas en este ítem (alturas de diseño) valores de 0.10 [m] de altura de ola entre una batimetría y otra.

El oleaje, por otra parte, se abordó mediante los estudios de clima medio y extremo tanto en aguas profundas como para el sitio de interés. Del clima medio, se obtuvo una caracterización completa de los parámetros que conforman este fenómeno, expuestos a través de representaciones gráficas como histogramas, tablas de incidencia, y rosas de oleaje. En cuanto al estudio de clima extremo, se estiman los valores de mayor energía que presenta la estadística, que posteriormente, son evaluados como parámetros de diseño. De este último punto es posible destacar la comparación metodológica realizada en la selección de eventos extremos en aguas profundas versus en el sitio de interés, donde, del total de 36 eventos seleccionados son 17 los considerados como extremos en aguas profundas y que no son identificados como tales en el sitio de interés, mientras, 15 eventos seleccionados como extremos en el sitio de interés no son tomados en cuenta en el análisis realizado en aguas profundas. Estos resultados permiten corroborar que la metodología de evaluación de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación, presenta diferencias en las alturas de ola calculadas, subestimando y sobreestimando este parámetro dependiendo de las características que se le asignan al oleaje propagado.

La marea, se determina considerando las componentes astronómicas y meteorológicas que la conforman, obteniéndose como resultado parámetros que integran los niveles convencionales de diseño. En este análisis la mayor discrepancia de valores ocurre en el residuo meteorológico dependiendo de la metodología utilizada para la caracterización de este fenómeno. Al plantear una metodología que involucre un análisis de valores extremos en función de un periodo de retorno, se obtiene una sobreelevación por efectos meteorológicos de 0.71 [m] y 0.79 [m] para los periodos de retorno de 25 y 50 años

respectivamente, mientras de la determinación de los efectos individuales que conforman la marea meteorológica (por presión atmosférica y viento) se obtienen correcciones de -0.16 [m] asociada a “buen tiempo” y de +0.07 [m] para una condición de “temporal”.

Se desarrollan dos metodologías para la estimación de los niveles de diseño. La primera consiste en la conformación de un nivel sobre la base de los parámetros obtenidos en los estudios de condiciones naturales, nivel de diseño denominado “Convencional” y de valores 3.44 [m] NRS para el periodo de retorno de 25 años y de 4.19 [m] NRS para el periodo de retorno 50 años. La segunda metodología permite la obtención de un nivel de diseño designado como “Probabilístico” y se fundamenta a través de funciones paramétricas denominadas cópulas. De este nivel se obtienen valores de 2.14 [m] NRS para el periodo de retorno de 25 años y de 2.22 [m] NRS para el periodo de retorno 50 años.

Para comprender el comportamiento del oleaje en la zona rompiente y obtener valores de altura de ola al pie de la estructura se utilizó la formulación de Goda (2000), empleada a partir de una combinación de valores de alturas de olas propagadas al sitio de interés y los niveles de diseño convencional y probabilístico para periodos de retorno de 25 y 50 años (parámetros resultantes de las variaciones metodológicas planteadas en párrafos anteriores). Los resultados obtenidos para esta sección dan cuenta de alturas de olas de diseño para una condición post rompiente y progresiva, calculadas para una cota de profundidad de -2.0 [m] NRS.

Finalmente, cada combinación obtenida al variar parámetros y/o metodologías es evaluada y cuantificada para una defensa costera a través de su diseño de estabilidad e hidráulico, y proyectado mediante el diseño de un dique en talud. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente se resume en una comparación de secciones tipo de defensa costera, donde “A” representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno de 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional y “B” representa una configuración para un escenario de periodo de retorno de 50 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional (ver Figura 47), otro ejemplo es comparar secciones donde “A” representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno de 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional y “B” representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico (ver Figura 48).

# **1 INTRODUCCIÓN**

Toda obra marítima se construye para cumplir determinadas funciones, permitiendo o facilitando actividades económicas, repercutiendo socialmente e interfiriendo con el medio ambiente. Esta obra debe ser fiable, funcional y operativa durante el tiempo en que vaya a permanecer en servicio (ROM 0.2-90, 1990). Estas características sin embargo, no siempre se cumplen, en gran medida por la ocurrencia de eventos extremos cuyos impactos significativos a las estructuras marítimas provocan daños de gran envergadura. En Chile, episodios recientes con grandes perjuicios se presentaron en Agosto del año 2015, afectando zonas costeras desde la región del Bio Bio hasta la región de Coquimbo, exhibiendo los mayores impactos en la región de Valparaíso. Alturas de ola de hasta 10 metros provocaron diversos daños incluyendo inundación de viviendas, personas fallecidas, suspensión de operaciones portuarias, daños a infraestructura pública y estructuras costeras (Campos, et al., 2015), todas consecuencias relevantes que pusieron en tela de juicio la calidad de la información utilizada en el diseño y construcción de obras costeras.

Por tal motivo, el presente documento propone una caracterización de los principales factores que influyen en el diseño de una obra de abrigo, a través de análisis de sensibilidad que cuantifiquen mediante distintos escenarios el grado de incidencia que tiene la calidad de la información empleada en el resultado final de un diseño de obras costeras. La utilidad de este tipo de evaluación permitiría comprender, por ejemplo, si la infraestructura finalmente diseñada justifica el nivel de calidad y detalle invertido en cada etapa del estudio.

El presente trabajo posee la siguiente estructura: en la sección 2 se establecen los objetivos y alcances del presente proyecto, en la sección 3, se muestra el marco teórico con la revisión de antecedentes que sustentan este trabajo. En la sección 4 se detallan los procedimientos que conforman las metodologías comunes identificadas, destacando los análisis de condiciones naturales (batimetría, oleaje, marea y niveles). El desarrollo de estos estudios permitió la obtención de los resultados expuestos en la sección 5, y cuya aplicación a un caso de pre-diseño de obra marítima, permitirá finalmente evaluar y cuantificar que tan sensible es el diseño de una obra marítima en particular, al variar los parámetros y/o metodologías involucradas en el proceso.

## **2 OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **2.1 OBJETIVOS**

El objetivo general del proyecto es evaluar la sensibilidad de un diseño de obras marítimas condicionada por la acción del oleaje, mediante un análisis de la información disponible y a las metodologías que se empleen en el proceso.

En cuanto a los objetivos específicos estos son:

- Identificar y seleccionar, a través de una recopilación de información, las etapas comunes que poseen los proyectos de obras marítimas.
- Analizar y evaluar los parámetros y metodologías de diseño que poseen en común las etapas escogidas como objeto de estudio.
- Cuantificar la importancia de cada parámetro y etapa de diseño mediante diferentes escenarios para el diseño de una misma obra.

### **2.2 ALCANCES**

En el desarrollo de este trabajo, el estudio abarcará sólo información de proyectos que se diseñaron bajo la condición predominante de oleaje, empleando las metodologías comunes que clásicamente se utilizan en la obtención de resultados.

El análisis comprende sólo aquellos estudios comunes identificados, aplicando los resultados a la bahía de Valparaíso, en particular al pre-diseño de una estructura costera en el sector Juan de Saavedra.

## **3 MARCO TEÓRICO**

### **3.1 OLEAJE**

#### **3.1.1 GENERALIDADES**

En las costas de Chile, el oleaje posee distintos mecanismos de generación, los que pueden ser de origen local y/o remoto. El primer caso se denomina “Sea” y es producido debido a la influencia de vientos locales con periodos de 4 a 8 segundos; En el segundo caso, el oleaje es denominado “Swell” y se ha generado en distintos puntos de la cuenca del Océano Pacífico. Este tipo de oleaje varía en rangos de periodos de 10 a 25 segundos (SHOA, 2005).

Debido a su carácter de complejo y cambiante, y a la mayor influencia que ejerce, el oleaje es el fenómeno más importante a considerar entre las condiciones ambientales que afectan las estructuras marítimas (Goda, 2000), es por ello, que un estudio de este fenómeno es un punto importante dentro de un diseño de obras marítimas, y su caracterización permite el conocimiento de la estadística del oleaje que interactuará con las obras. Dicha caracterización (de oleaje) necesitará más o menos precisión dependiendo de la función de la obra a diseñar, por ejemplo, si se diseña una defensa costera, será fundamental caracterizar el oleaje más energético; en cambio, si se diseña una playa puede ser más importante conocer la dirección media del oleaje incidente (Sampedro, 2009).

#### **3.1.2 ESTADÍSTICA DE OLEAJE**

En la actualidad, para poder realizar un estudio de esta índole y poder caracterizar este fenómeno, es necesario obtener o generar datos de oleaje mediante sus diversas fuentes de información. Un estudio realizado en el año 2009 por Antonio Sampedro, en el marco de su tesis doctoral de la Universidad de Cantabria, señala que “*Las fuentes de información de oleaje existentes se pueden clasificar en función del método o instrumento que ha producido o generado dichos datos de oleaje*”, clasificándose en datos visuales, datos instrumentales y datos generados con modelos numéricos.

Los datos visuales son aquellos realizados por observadores (capitanes o personal de embarcaciones) desde barcos en ruta, los instrumentales son los que se miden directamente en el mar (boyas) y los generados con modelos numéricos son los que simulan el estado del mar a partir de datos de entrada (intensidad y dirección del viento, *fetch*, perfil y relieve de la costa, etc.). En la actualidad, son los datos instrumentales y numéricos los más utilizados para generar información de oleaje.

Bajo este contexto, en Chile, la publicación N° 3201 (3ª edición año 2005) del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) establece que: “*Con la finalidad de tener una descripción completa del oleaje en aguas profundas, se deberá obtener una base de datos de oleaje espectral bidimensional, de a lo menos 20 años*”. Extensión que resulta dificultosa (instrumentalmente) para nuestras costas, debido al bajo número de aparatos disponibles y a que su instalación (fondeo) es relativamente reciente,

lo que deriva en registros de menor extensión. Ante esto, es posible reproducir el oleaje a partir de información meteorológica, mediante el uso de modelos numéricos de predicción de oleaje o modelos *hindcasting*, que permiten hoy en día contar con estadística de larga duración en aguas profundas.

### 3.1.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLAJE

Las características estadísticas de la superficie del mar presentan variaciones en escalas temporales y espaciales. Estas escalas se pueden clasificar, para efectos de ingeniería, en tres tipos; corto, mediano y largo plazo (Ingeniería Marítima, 2002). El presente estudio se enfoca en aquellos análisis cuyos resultados son utilizados de manera recurrente en el diseño de obras marítimas, como lo son, el análisis de mediano plazo o clima medio de oleaje y el análisis a largo plazo, también llamado clima extremo de oleaje.

El clima medio de oleaje tiene por objetivo describir la condición característica que presenta el oleaje en un lugar de interés (SHOA, 2005), normalmente llamadas condiciones reinantes o más frecuentes. Este estudio es utilizado en ingeniería marítima para evaluar las condiciones funcionales u operativas de las estructuras (ya existentes o proyectadas), además de su orientación y ubicación en sitios más apropiados para su instalación.

El estudio estadístico a medio plazo se efectúa sobre series de tiempo de parámetros de resumen y se representan a través de regímenes medios, rosas de oleaje y tablas de incidencia. Los regímenes medios permiten la obtención de una función de distribución estadística que determine el tiempo en el que, en un año medio, una altura de ola no exceda un cierto valor (Ingeniería Marítima, 2002). Las rosas de oleaje por otra parte, brindan un alto grado de síntesis de la información aportando una idea rápida del tipo de oleaje existente (intensidad y frecuencia de aparición respecto de su dirección), finalmente en las tablas de incidencia, es posible apreciar un detalle numérico mayor del fenómeno (a diferencia de las rosas), pudiendo asociar parámetros del oleaje de manera cruzada (generalmente se relacionan los parámetros de: Altura-Periodo, Altura-Dirección y Periodo-Dirección).

En cuanto al clima extremo de oleaje, el estudio se centra en prever las condiciones de mayor energía que éste pueda representar en algún horizonte esperado, normalmente de largo plazo. El objetivo principal de este análisis es poder establecer las acciones de diseño a soportar por una obra marítima, determinada generalmente en función del riesgo asignado y su vida útil (Ingeniería Marítima, 2002).

La publicación SHOA N° 3201, establece que para realizar un estudio de estas características, se debe contar con una estadística de oleaje mayor a 20 años, aislando generalmente las mayores tormentas presentes en el registro. Para esto, en la actualidad, son utilizados dos métodos de selección de datos, el método de valores sobre el umbral y el método de máximos anuales. El primero consiste en definir un valor límite y seleccionar todos aquellos eventos cuyo máximo supere ese límite, mientras que el segundo método consiste en tomar sólo aquellos datos máximos por año. En un estudio realizado por Liu y Frigaard (2001), se destaca que la ventaja del método de máximos anuales es la representatividad que posee la muestra sobre el universo seleccionado, lo que asegura

una paridad de la frecuencia entre los datos, sin embargo, desprecia los eventos de menor energía de un año que puedan poseer una mayor energía que el máximo de otro año, por lo que, este método no asegura los valores máximos que pueda tener la estadística. El método de valores sobre el umbral, por otra parte, asegura el uso de los mayores eventos que presenta la estadística, no así una igualdad en la frecuencia de la muestra.

### 3.1.4 MODELOS HINDCASTING: GENERACIÓN OCEÁNICA

Los modelos “*hindcasting*”, son modelos matemáticos de reconstrucción estadística de oleaje hacia el pasado, que permiten generar información de este fenómeno en lugares y periodos en donde ha sido imposible obtener mediciones. Hoy, estos modelos son una herramienta ampliamente utilizada para decisiones ingenieriles, y la gran variedad de modelos desarrollados ponen de manifiesto la complejidad de los procesos e interacciones que sufre el oleaje, dificultando a su vez el proceso de selección del modelo, y haciendo de este una pieza clave de cualquier modelación del fenómeno (Guisado, et al., 2010).

En la actualidad, los modelos numéricos pueden clasificarse esencialmente en modelos que resuelven la fase y modelos que promedian la fase. Los primeros, están basados en las ecuaciones no estacionarias de conservación de la masa y cantidad de movimiento integradas en la vertical, y su aplicación se limita a áreas relativamente pequeñas (orden de kilómetros). En cuanto al segundo tipo (modelos que promedian la fase), estos se basan en la conservación de la energía espectral (Liu & Losada, 2000), es decir, describen el espectro de energía de la ola, y por tanto, la superficie irregular del mar se describe mediante una función espectral de energía. Estos modelos pueden ser aplicados en áreas de mayor extensión en comparación con los que resuelven la fase.

Los modelos que promedian la fase o modelos espectrales, resuelven la ecuación de balance de energía, teniendo en cuenta durante la evolución del espectro de ola en aguas someras, el efecto de profundidad, refracción, fricción con corrientes y fondo, el crecimiento y decaimiento de la energía de ola, además de las interacciones no lineales entre ellas (Guisado, et al., 2010). La ecuación de balance de energía se puede expresar como:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = S_t$$

**Ecuación 1**

Donde,  $E(f, \theta; x, y, t)$  es la energía de la componente de oleaje con frecuencia  $f$  y dirección  $\theta$ , en la posición espacial  $x$  e  $y$ , en el tiempo  $t$ .

$C_{g,x}$ ,  $C_{g,y}$  son la celeridad de oleaje en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente.  $C_{\theta}$  es la velocidad de propagación en el espacio espectral de frecuencia y finalmente  $S_t$

corresponde al termino denominado “fuentes de energía” (suma de fenómenos que aportan o disipan energía del oleaje) y se puede calcular como:

$$S_t = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}$$

#### Ecuación 2

Donde,  $S_{in}$  está relacionada con la energía aportada por el viento,  $S_{nl}$  representa a las interacciones no lineales entre ondas,  $S_{ds}$  es el término que considera la disipación de energía por el rompimiento de las olas en aguas profundas (“*whitcapping*”) y el rompimiento del oleaje inducido por el fondo en aguas someras, finalmente  $S_{bot}$  representa la pérdida o disipación de energía debido a la fricción con el fondo en aguas someras y fricción con corrientes marítimas en aguas profundas.

Se hace necesario mencionar que la clasificación en modelos espectrales de primera, segunda y tercera generación depende de cómo se resuelva numéricamente esta ecuación (balance de energía), y en la evolución tanto teórica como experimental en la estimación de los términos que componen las fuentes de energía (Montoya & Osorio, 2007).

Actualmente, los grandes centros de predicción utilizan modelos de tercera generación, debido a que estos modelos han alcanzado tal nivel de desarrollo que el mayor error en la predicción del oleaje en mar abierto procede del error en la predicción del viento. Algunos ejemplos de modelos de tercera generación ampliamente utilizados son, WAM, WAVEWATCH III, TOMAWAC, para el caso de aguas profundas y SWAN, MIKE21 y STEWAVE para aguas someras.

Finalmente, en lo que respecta a este tema, Guisado, Malvárez & Navas (2010) concluyen que *“La variedad de modelos, teorías y aproximaciones, la tipología del estudio, las características de la costa, la disponibilidad de datos de entrada (olas, viento y batimetría); así como el conocimiento del usuario y la calibración del modelo, son algunos de los aspectos claves que garantizan el éxito en la utilización de este tipo de análisis”*.

### 3.1.5 MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE OLAJE

A medida que el oleaje se acerca a la costa, el efecto en el fondo se comienza a notar. Como consecuencia de esta interacción el oleaje se transforma, traduciendo estos efectos principalmente en variaciones de altura de ola y en la dirección de propagación. Fenómenos como asomeramiento, refracción, reflexión y difracción comienzan a interactuar con el fondo marino y las estructuras, definiendo con ello las características particulares del oleaje a nivel costero (UNICAM, 2000). La combinación de métodos de propagación (como los presentados por Nicolás del Roure el año 2004) con técnicas de modelación numérica de propagación permite reconstruir las condiciones del oleaje a nivel costero a partir de fuentes de información que usualmente se encuentran en aguas profundas (estadística de oleaje).

En el presente proyecto se plantea reconstruir las condiciones de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras utilizando el modelo numérico de tercera generación SWAN (*Simulating WAves Nearshore*), desarrollado por la Universidad Técnica de Delft en Holanda

SWAN, es un modelo que describe la evolución del espectro de energía del oleaje tomando en cuenta los datos del viento, corrientes y batimetría, además incluye la posibilidad de considerar una gran cantidad de los procesos a los que se ve sometido el oleaje durante su propagación calculando procesos de generación, disipación e interacciones no lineales (Hernández, 2015).

El modelo SWAN desarrolla la ecuación de balance de acción de la ola, expresión idéntica a la ecuación de balance de energía (Ecuación 1), pero en vez de ocupar la densidad de energía  $E(f, \theta)$ , se sustituye por la densidad de acción  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$ , quedando la expresión de la siguiente manera.

$$\frac{\partial N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\sigma} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_{\theta} N(\sigma, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = S_t$$

**Ecuación 7**

Donde, de izquierda a derecha, el primer término representa la razón de cambio local en el tiempo de la densidad de acción, el segundo y tercer término representan la propagación de acción en el espacio geográfico con velocidades  $C_x$  y  $C_y$  en direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente. La cuarta componente constituye la variación de la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y corrientes, con velocidades de propagación  $C_{\sigma}$  en el espacio de las frecuencias. El quinto término de la expresión equivale a la refracción inducida por variaciones de fondo y corrientes (Whitham, 1974).

Finalmente, el último término de la expresión equivale a la componente fuente, componente que fue descrita con más detalle en la sección 3.1.4.

## 3.2 MAREAS

Las mareas se definen como el ascenso y descenso rítmico y alternado de la superficie del océano (o nivel de agua) y de los cuerpos de agua conectados con el océano (estuarios, golfos y canales) que ocurre dos veces al día sobre la mayor parte de la tierra, y que resultan de la atracción gravitacional de la luna y, en menor grado, la del sol (SHOA, 1992). En cuanto al océano, este no solo recibe la influencia de las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen los cuerpos celestes (marea astronómica), también existe una onda de marea más débil originada por variaciones periódicas de la presión atmosférica y de vientos que van en dirección mar-tierra o viceversa. Esta marea es

conocida como meteorológica y su importancia dependerá de la época del año, de la latitud y de la proximidad de extensas áreas de aguas someras (SHOA, 1999).

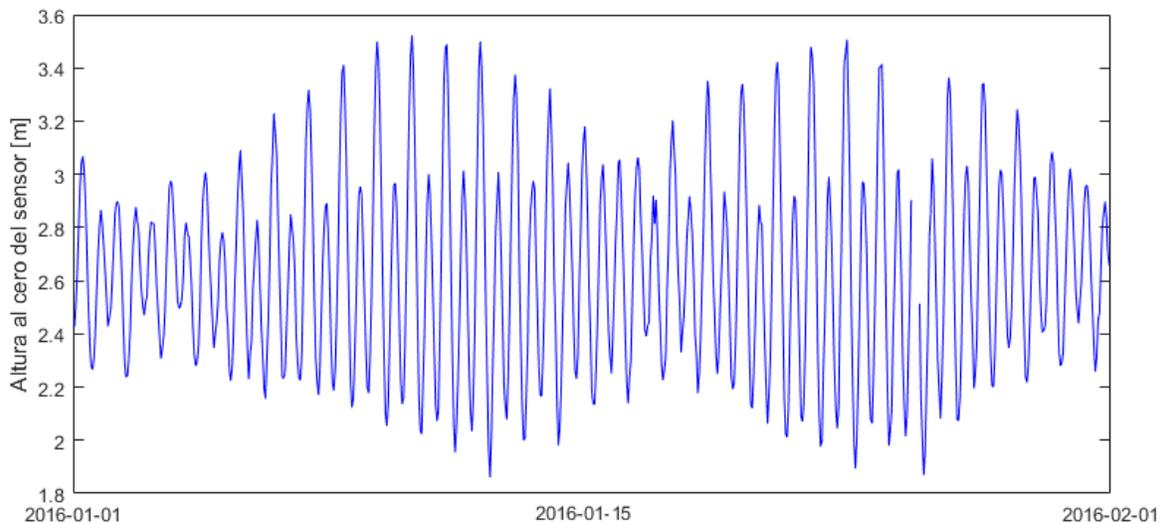
Según las Instrucciones Oceanográficas N°1, el estudio de la marea tendrá como objetivo la determinación de los valores característicos de dicho fenómeno a ser utilizados en el diseño de ingeniería marítima (SHOA, 2005), destacando para ello que la marea toma gran relevancia en actividades centradas en el litoral, siendo el nivel del mar en cualquier punto de la costa determinado fundamentalmente por estas ondas, por lo que actividades como, el conocimiento de la cota de inundación de un tramo de costa, el nivel del cálculo para un paseo u obra marítima, o la determinación de los calados de un puerto, exigen un conocimiento detallado de este tipo de fenómeno (UNICAM, 2000).

### 3.2.1 MAREA ASTRONÓMICA

La marea astronómica es el conjunto de movimientos regulares de ascenso y descenso del nivel mar con periodos próximos a las 12 o 24 horas, que se producen por efectos gravitacionales del sistema tierra-luna-sol (UNICAM, 2000). Esta marea puede clasificarse en: diurna, semidiurna y mixta, destacando el régimen semidiurna mixta como el característico de las mareas por efectos astronómicos en Chile (SHOA, 1992).

En la Figura 1, a modo de ejemplo, se muestra un registro de los niveles de marea para el mes de enero del año 2016 en la bahía de Valparaíso, datos procesados de la Red Global administrada por la “*Intergovernmental Oceanographic Commission*” (IOC). En la señal obtenida, se aprecian los efectos astronómicos de la componente lunar y solar sobre la superficie del mar, traducidos en aumentos y disminuciones del nivel de marea en la bahía de Valparaíso.

**Figura 1:** Registro de mareas en la bahía de Valparaíso para el mes de enero, año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2 MAREA METEOROLÓGICA

La marea meteorológica se define como la respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento y campos de presiones. Estas pueden generar sobreelevaciones considerables del nivel medio del mar (UNICAM, 2000). Lo usual es que durante un evento de tormenta o mal tiempo, los efectos del viento y la presión atmosférica no puedan ser identificados por separado (Pugh, 1987). Es por esto, que suele hablarse de forma conjunta de los parámetros que conforman el término marea meteorológica o en algunos lugares del mundo con el concepto “*storm surge*”.

#### 3.2.2.1 EFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Las variaciones de la presión atmosférica inducen cambios en los niveles de marea. Esta relación se conoce como “*barómetro invertido*” y expone que, una baja en la presión atmosférica producirá un incremento en el nivel del mar y viceversa (Kamphuis, 2000). Para variaciones locales, esta relación se puede expresar siguiendo lo expuesto en la Ecuación 8, donde es posible apreciar que la variación del nivel de mar ( $\Delta h$ ), está dada en términos de la variación de presión atmosférica ( $\Delta p$ ), respecto de la densidad del agua de mar ( $\rho$ ) y la aceleración de gravedad ( $g$ ). Donde  $\Delta h$  se mide en [cm] y  $\Delta p$  en [hPa]. De esta manera, es posible desprender en términos aproximados que un incremento en la presión atmosférica de un [hPa] produce un decrecimiento del nivel del mar del orden de 1 [cm].

$$\Delta h = -\frac{\Delta p}{\rho g}$$

Ecuación 8

El SHOA, anualmente publica en sus “Tablas de Marea” ciertas correcciones que deben realizarse sobre las alturas de marea pronosticadas en función de la presión atmosférica (SHOA, 2016), dando así una idea de la influencia que posee la presión atmosférica sobre la altura del nivel del mar. En la Tabla 1 se pueden observar los valores de corrección mencionados anteriormente.

**Tabla 1:** Corrección por presión atmosférica.

Presión Atmosférica		
Hectopascales [hPa]	Milímetros de mercurio [mmHg]	Corrección [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	+0.25
1003	752	+0.10
1008	756	+0.05
1013	760	0
1018	764	-0.05
1023	768	-0.10
1028	771	-0.15
1033	775	-0.20
1038	779	-0.25

Fuente: Publicación N° 3009 (SHOA, 2016).

### 3.2.2.2 EFECTOS DEL VIENTO

Los efectos que el viento induce sobre el nivel del mar reciben el nombre de “*wind set-up*”. En estos efectos, el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar produce una variación de la cantidad de movimiento, aunque el esfuerzo tangencial asociado al viento sobre la superficie del mar es pequeño, integrado (sumado) sobre una gran masa de agua puede llegar a ser catastrófico (Dean & Dalrymple, 2001).

La desnivelación por efectos de los vientos suele ser determinada como una función de la distancia sobre la cual sopla el viento (*fetch*), la profundidad promedio de la zona de generación y la velocidad del viento. Una de las formas para determinar esta variación de marea meteorológica, es mediante la siguiente expresión (Kamphuis, 2000).

$$\frac{dS}{dx} = \frac{\zeta (U \cos \theta)^2}{gD}$$

**Ecuación 9**

Donde  $S$  representa el peralte del nivel del mar por efecto del viento,  $x$  el largo del *fetch*,  $\zeta$  es una constante experimental ( $3,2 * 10^{-6}$ , Kamphuis 2000), la expresión  $U$  es la magnitud

de velocidad del viento promedio en un tiempo determinado,  $\emptyset$  es el ángulo entre la dirección del viento y el eje x,  $g$  es conocida como aceleración de gravedad y finalmente  $D$ , es la nueva profundidad del agua contemplando el nivel inicial más el peralte por viento.

### 3.2.3 ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE MAREAS

El análisis de las mareas tiene por objetivo la determinación de los parámetros característicos que describan el régimen mareal en un lugar determinado. Actualmente, este análisis se basa fundamentalmente en la aplicación de dos métodos para describir el fenómeno. El primero, se basa en que la marea puede ser expresada matemáticamente como la sumatoria de una serie de términos armónicos que cumplen ciertas condiciones astronómicas, método conocido como Análisis Armónico de la Marea. El segundo se plantea sobre la base de técnicas estadísticas, determinando los principales planos de referencia del nivel del mar y rangos representativos del fenómeno. Esta descripción recibe el nombre de Análisis No-Armónico de la Marea (SHOA, 2016). A continuación, se detallan los análisis y/o métodos mencionados anteriormente.

#### 3.2.3.1 ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA MAREA

El Análisis Armónico de la Marea se fundamenta en el conocimiento de que la marea observada está constituida por un número de componentes armónicas cuyos periodos han sido perfectamente establecidos, dado que coinciden con los periodos de algunos movimientos astronómicos entre la tierra, la luna y el sol (UNICAM, 2000). Por esta razón, este análisis supone que las fluctuaciones de una serie se pueden expresar en términos matemáticos por una suma de funciones armónicas, de esta forma, cada valor de una serie de tiempo se puede expresar como:

$$Z(t) = Z_0 + \sum_i^n a_i \cos(\omega_i t + \delta_i) \quad \omega_i = \frac{2\pi}{T_i}$$

Ecuación 10

Donde  $Z_0$  es el nivel medio del mar,  $a_i$  la amplitud de la constituyente armónica (propia de cada lugar),  $\omega_i$  es la velocidad angular,  $\delta_i$  es el desfase de cada uno de los armónicos y  $T_i$  el periodo de cada constituyente.

En líneas generales, esta ecuación es utilizada para la determinación de la amplitud y fases de las constituyentes armónicas de un determinado lugar. Para resolver esta ecuación, se requiere un registro del nivel del mar durante al menos 30 días (SHOA, 2005) y de un ajuste de los parámetros (amplitudes y desfases) para cada constituyente, lo que permitirá construir una señal similar a la registrada. Un ajuste utilizado comúnmente es el Método de Mínimos Cuadrados (Foreman, 1977), el cual minimiza el cuadrado de la diferencia entre el modelo y las observaciones, haciendo que el promedio de las diferencias sea cero. Con esto, se busca determinar la amplitud de las constituyentes armónicas para realizar predicciones de la marea de largo plazo. Una vez

estimados los armónicos para una zona en estudio, permitirá conocer el nivel del mar y el nivel de reducción de sonda (NRS), entre otras características relevantes de la marea. Parte de las constituyentes comúnmente utilizadas para analizar un registro del mar se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Constituyentes de marea comúnmente empleadas.

<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Periodo [horas]</b>
1	Lunar principal	M2	12.42
2	Solar principal	S2	12.00
3	Elíptico Lunar mayor	N2	12.66
4	Semidiurno Luni-solar	K2	11.97
5	Solar elíptico mayor	T2	12.01
6	Solar elíptico menor	L2	12.19
7	Elíptico lunar 2° orden	2N2	12.91
8	Diurno Luni-solar	K1	23.93
9	Diurno Lunar principal	O1	25.82
10	Diurno Solar Principal	P1	24.07
11	Elíptico Lunar mayor	Q1	26.97
12	Elíptico Lunar menor	M1	24.84
13	Quincenal Lunar	Mf	327.9
14	Mensual Lunar	Mn	661.3
15	Semi-anular Solar	Ssa	4383

Fuente: Adaptado de (UNICAM, 2000).

### 3.2.3.2 ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE LA MAREA

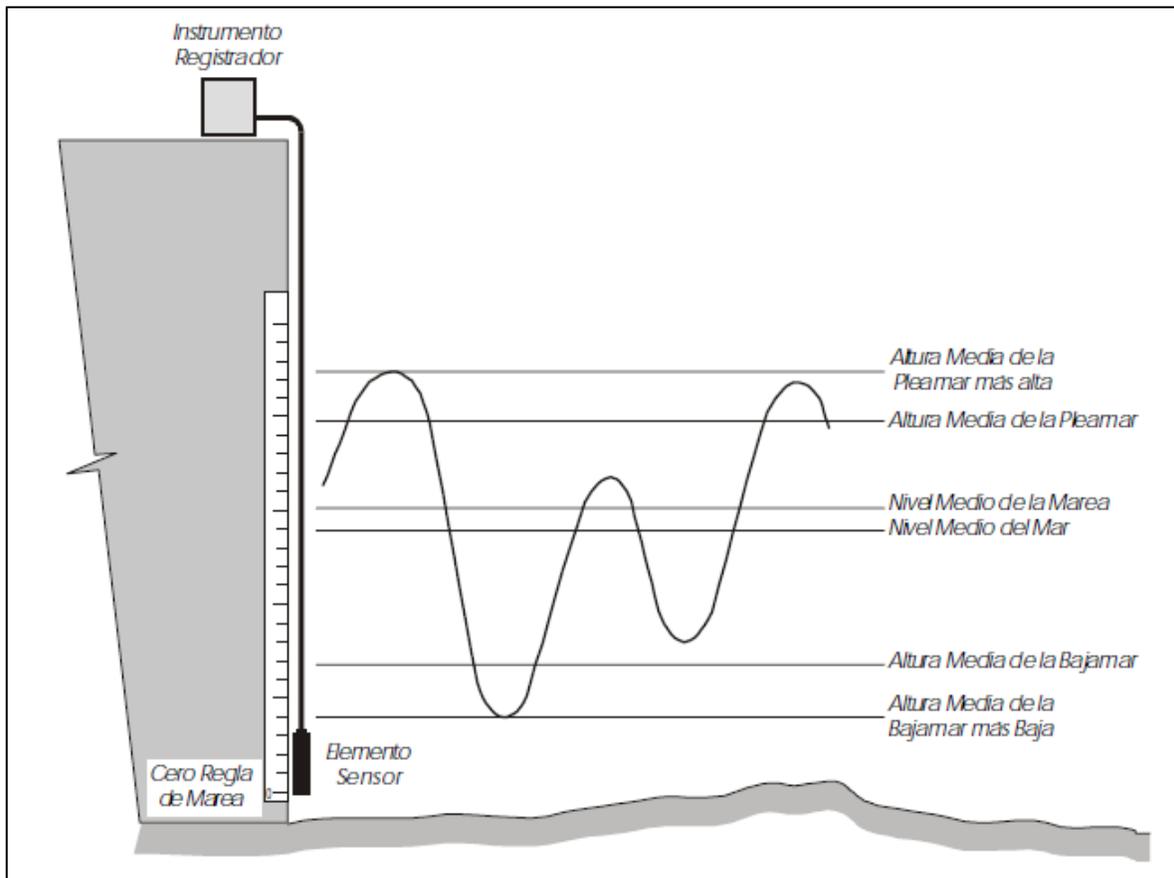
Los valores no-armónicos de la marea corresponden al conjunto de parámetros que permiten describir cabalmente el comportamiento de la marea en una localidad cualquiera, siendo inferidas directamente de las observaciones efectuadas en terreno (SHOA, 1999). Dentro de estos parámetros se encuentran los principales planos de referencia del nivel del mar, además de los rangos e intervalos representativos de este fenómeno.

Las observaciones del nivel del mar se efectúan mediante la instalación de mareógrafos automáticos o mediante dispositivos que requieren la atención constante de un observador que controle a intervalos discretos la altura de la marea, dispositivos conocidos como mareómetros, entre los que se destaca la conocida regla de marea (SHOA, 1999).

En Chile, el procedimiento de cálculo de los planos mareales se encuentra normado de acuerdo a lo establecido en la publicación SHOA N° 3202, la que propone el método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos de la marea.

Los principales planos de la marea se muestran en la Figura 2, donde se esquematizan los variados niveles que alcanza la marea durante el periodo de observación con respecto a un plano arbitrario, definido por el cero del instrumento registrado o el cero de la regla de marea (SHOA, 2005). Respecto de los planos mostrados en la Figura 2, el SHOA hace referencia en su publicación N° 3202 que, “Cada uno de estos valores tiene su importancia y su aplicación en los cálculos de mareas, prestando un valioso apoyo al navegante y permitiendo al ingeniero la determinación de planos de referencia y rangos de marea necesarios en la construcción de obras civiles, donde las condiciones de este fenómeno constituyen un factor de importancia”.

**Figura 2:** Principales planos mareales.



Fuente: Publicación N° 3202 (SHOA, 1999).

### 3.3 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS

Las estructuras marítimas están constantemente expuestas a condiciones extremas de aquellos fenómenos que las afectan, específicamente a las condiciones oceanográficas. La estimación precisa de estos niveles extremos del mar es crucial para evaluar el riesgo en zonas costeras, y en particular, para garantizar la seguridad de las personas que viven en torno a estos sectores (Masas, et al., 2014). Las estructuras antes mencionadas

suelen proyectarse mediante métodos tradicionales de diseño, los que utilizan un enfoque estadístico univariado en el que se establecen escenarios de diseño y factores de seguridad. Estos métodos se conocen como determinísticos o cuasi-probabilísticos, y no consideran la probabilidad de ocurrencia conjunta de más de una variable ni determinan rangos de confianza para las predicciones realizadas (Requena, et al., 2015). Ante esto, es necesario métodos más sofisticados que permitan integrar más de una variable al cálculo de probabilidades, para extender los modelos extremos univariados a una dimensión bivariada o multivariada.

Un método multivariado de amplia utilización, recae en el uso de funciones denominadas “cópulas”. Requena, Mediero, & Garrote (2015) argumentan que estas funciones presentan como mayor ventaja una mejora en la caracterización de la relación de dependencia entre las variables, así como una mejor caracterización estadística de cada una de las variables al permitir el uso de diferentes funciones de distribución marginales.

Según Sklar (1959), la función de distribución de probabilidades conjunta  $F_{X,Y}(x, y) = P[X \leq x, Y \leq y]$  se puede vincular a las distribuciones marginales  $X$  e  $Y$  a través de la cópula  $C$ :

$$F_{X,Y}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y))$$

**Ecuación 11**

Donde  $F_X(x)$  y  $F_Y(y)$  son las funciones de distribución de probabilidad acumulada de las variables  $X$  e  $Y$ , y  $C: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$  es la función cópula utilizada para representar la ley de dependencia entre las variables.

Existen muchos tipos de funciones de cópulas y es difícil encontrar en la literatura una clasificación clara de todas ellas, dado que existen muy diversos criterios para hacerlo: en función de la dependencia o no de parámetros, de su soporte (continuo o discreto), además del tipo de relación que reflejan (cópulas elípticas, cópulas de valor extremo, etc.). Dentro de las familias de cópulas más utilizadas se encuentran las cópulas arquimedianas, caracterizadas por la facilidad con la que pueden ser construidas y por la gran variedad de estructuras de dependencia que permiten reproducir (Ingeniería Fiorella Vega Jácome, 2016). Algunas de las funciones de cópulas que destacan dentro de la familia arquimediana son las de Clayton y Gumbel, presentando las siguientes estructuras:

### **Cópula de Clayton**

$$[\max\{F_X^{-\rho} + F_Y^{-\rho} - 1; 0\}]^{-1/\rho}$$

**Ecuación 12**

## **Cópula de Gumbel**

$$\exp \left[ - \left( (-\log(F_X))^\rho + (-\log(F_Y))^\rho \right)^{1/\rho} \right]$$

### **Ecuación 13**

El parámetro ( $\rho$ ) es conocido como parámetro de dependencia y cuantifica la relación entre las variables estudiadas. Este parámetro se desarrolla mediante coeficientes de correlación, existiendo tres métodos ampliamente utilizados para determinar la correlación monótona entre variables. Estos coeficientes son: Pearson, Spearman, Kendall; y su estimación va a depender de la naturaleza de las variables utilizadas (Morales & Rodríguez, 2016). El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de los coeficientes de correlación de Kendall, utilizando para ello, la siguiente ecuación:

$$T_{XY} = \frac{2S}{n(n-1)}$$

### **Ecuación 14**

Donde  $S = P - M$ , siendo  $P$  el número de valores positivos o “acuerdos”. Estos es el número de veces de incrementos de  $Y$  conforme incrementa  $X$ , mientras que  $M$ , es el número de valores negativos o “desacuerdos”. Esto es el número de veces que disminuye  $Y$  cuando incrementa  $X$  (Morales & Rodríguez, 2016).  $n$ , por otra parte, representa la cantidad de variables incluidas en el análisis.

En base a lo detallado anteriormente, es posible calcular el parámetro ( $\rho$ ) de cada cópula a partir de los coeficientes de Kendall desarrollando las siguientes expresiones. Para Clayton, el parámetro de dependencia ( $\rho$ ) se vincula al coeficiente de Kendall mediante la Ecuación 15, mientras que para Gumbel, dicha relación se observa en la Ecuación 16.

$$T_{XY} = \frac{\rho}{\rho + 2}$$

### **Ecuación 15**

$$T_{XY} = 1 - \frac{1}{\rho}$$

### **Ecuación 16**

### 3.4 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE

Las olas que se acercan a la costa aumentan en pendiente a medida que disminuye la profundidad del agua. Cuando la inclinación de la ola alcanza un valor límite, la ola rompe, disipando energía e induciendo corrientes cercanas a la costa y un aumento del nivel de agua (USACE, 2006). Esta región es conocida como zona rompiente (“surf zone”) y se caracteriza por la rotura del oleaje (proceso hidrodinámico dominante) y los procesos relacionados con ella. Su anchura puede variar entre las decenas y los centenares de metros (Negro & Varela, 2002).

A raíz de los fenómenos presentes en esta región, los modelos numéricos de propagación como SWAN poseen una baja capacidad de representar adecuadamente las condiciones de oleaje cerca de la rompiente, es por esta razón, que la variación de la altura de ola dentro de la zona rompiente se estima siguiendo el método de propagación elaborado por Y. Goda (1985), expuesto en la referencia “Random Seas and Design of Maritime Structures”. Este método considera la interacción del oleaje con el fondo marino, efectos de rotura y *shoaling*.

El coeficiente de *shoaling* ( $K_s$ ), se puede obtener de manera empírica utilizando un diagrama de *shoaling* que relaciona parámetros como profundidad, longitud de onda y altura de ola (Figura 75 del Anexo E).

La aproximación matemática propuesta por Goda (en adelante Goda 2000) para conocer la altura de oleaje en la zona de rompiente es la siguiente:

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H'_0 & : h/L_0 > 0.2, \\ \min \{(\beta_0 H'_0 + \beta_1 h), \beta_{max} H'_0, K_s H'_0\} & : h/L_0 < 0.2, \end{cases}$$

**Ecuación 17**

En cuanto a los coeficientes “Betas” ( $\beta$ ), estos han sido desarrollados como se aprecia en la siguiente tabla:

**Tabla 3:** Coeficientes para la estimación aproximada de las alturas de ola en la zona rompiente.

Coeficientes de H1/3
$\beta_0 = 0.028 (H'_0/L'_0)^{-0.38} \exp [20 \tan^{1.5} \theta]$
$\beta_1 = 0.52 \exp [4.2 \tan \theta]$
$\beta_{max} = \max \{0.92, 0.32 (H'_0/L'_0)^{-0.29} \exp [2.4 \tan \theta]\}$

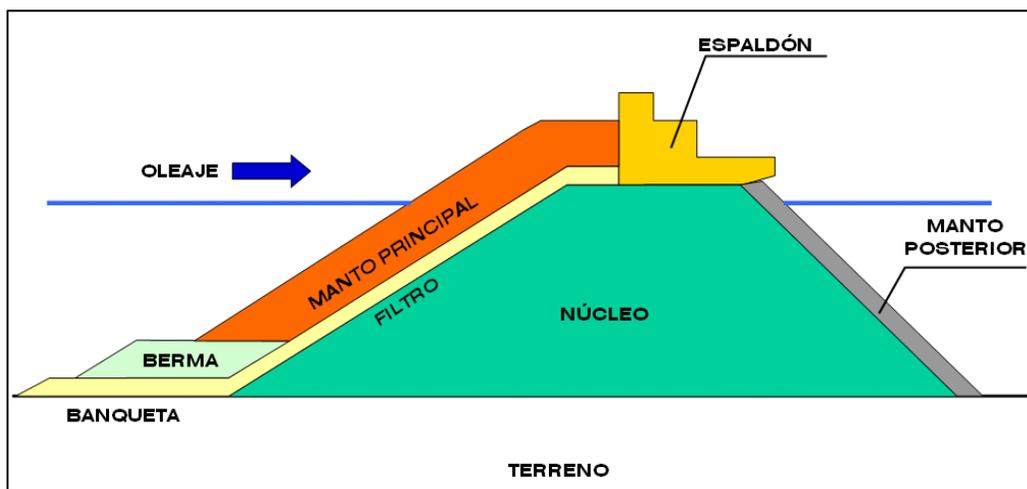
Fuente: Adaptado de (Goda, 2000).

### 3.5 DISEÑO DE ROMPEOLAS: DIQUE EN TALUD

La tipología de obras marítimas en Chile, comprenden obras de abrigo y protección costera, además de obras de atraque, amarre y fondeo, entre otras, dependiendo su diseño de las características del tipo de obra que se desea proyectar. El presente documento se enfoca en las obras de defensa costera, específicamente el diseño de un dique en talud.

Los diques en talud, comúnmente denominados rompeolas, son obras marítimas que cumplen múltiples funciones: abrigo, estanqueidad, apoyo y sustentación, siendo una de las básicas y primordiales en relación a su porcentaje de uso, el abrigo. Estos diques permiten la rotura del oleaje mediante la desestabilización del movimiento orbital ondulatorio, para lo cual se dispone un talud inclinado convenientemente protegido capaz de soportar las acciones incidentes del oleaje. Es así, como el diseño de un dique queda determinado finalmente en función de las acciones del oleaje y de un sobrepaso máximo, parámetros que en su desarrollo permitirán proyectar un comportamiento estructural e hidráulico para la zona que se desee proteger (Negro & Varela, 2002). A continuación, en la Figura 3, es posible observar un ejemplo de una conformación general de un dique en talud.

**Figura 3:** Esquema generalizado de un Dique en talud.



Fuente: (MOP & DOP, 2013).

En el esquema anterior se aprecian varios de los elementos que pueden conformar un dique en talud, entre los más importantes destacan:

- Núcleo, formado por material granular, que impide la transmisión de energía por su baja porosidad (MOP & DOP, 2013).
- Filtro, dispuesto entre el núcleo y el manto principal, en una o más capas de rocas crecientes hacia el exterior, que impiden la dispersión del núcleo ante la acción del oleaje (MOP & DOP, 2013).

- Manto principal, formado por bloques en varias capas de gran tamaño, naturales o artificiales, concertados o dispuestos aleatoriamente sobre el talud (Negro & Varela, 2002).
- A nivel sumergido la naturaleza del terreno o profundidad de la lámina de agua pueden recomendar la disposición de banquetas de apoyo de manto con el consiguiente ahorro de la unidad de mayor coste y volumen del dique, o bien bermas de pie antisocavación, que permiten evitar el deslizamiento profundo de la capa resistente (Negro & Varela, 2002).

Bernal (2015) plantea que un dique en talud suele ser una tipología ampliamente utilizada por las siguientes razones:

- “Para construir una estructura exitosa sólo se necesita equipo, recursos y habilidades profesionales limitadas”.
- “Un buen diseño de la estructuras significaran sólo daños menores cuando son excedidas las condiciones de diseño, resultando una degradación gradual”.
- “Los errores de construcción, pueden ser corregidos rápidamente, en la mayoría de los casos, antes de que ocurra una destrucción completa de la estructura. La reparación es relativamente simple y pocas veces es necesario equipo especializado para realizarlo”.

### **3.5.1 BASES DE DISEÑO**

Chile actualmente no cuenta con normativas propias de diseño, aunque si, con el desarrollo de una guía (MOP & DOP, 2013) destinada a generar un estándar nacional que sirva de soporte para el diseño, construcción, operación y conservación de proyectos marítimos-portuarios públicos y privados. Un ejemplo de esto, son los conceptos extraídos de la guía de diseño que se describen a continuación, basados en las Recomendaciones para Obras Marítimas Españolas (ROM) y que constituyen una parte importante de los criterios de diseños utilizados en la ingeniería marítima chilena.

- Vida útil ( $L_f$ ), se refiere al periodo de tiempo que transcurre durante la fase de servicio de una obra o un tramo de la misma. En general, corresponde al periodo de tiempo en el que la obra o el tramo cumple la función principal para la que fue concebida (ROM 1.0-90, 2009). Los valores para la vida útil se aprecian en la Tabla 38 del Anexo A (sección 10), designados en función del tipo de la obra o instalación, y del nivel de seguridad requerido.
- Riesgo admisible ( $R$ ), se fijará para cada estructura o elemento estructural en función de sus características físicas y económicas, las repercusiones económicas directas e indirectas en caso de inutilización parcial o total, y la estimación de pérdidas humanas en caso de destrucción total (ROM 0.2-90, 1990). El riesgo se evalúa según lo mostrado en la Tabla 39 del Anexo A.

- Periodo de retorno ( $T_r$ ), generalmente expresado en años, es el número medio de años (u otro intervalo de tiempo) que debe transcurrir para que se repita o exceda un valor dado del descriptor de estado (ROM 1.0-90, 2009). El periodo de retorno suele ser un parámetro de importancia como criterio de diseño, debido a que relaciona el riesgo admisible y la vida útil como se aprecia en la siguiente expresión.

$$T_r = - \frac{L_f}{\ln(1 - R)}$$

**Ecuación 18**

Donde  $T_r$  es el periodo de retorno,  $L_f$  es la vida útil y  $R$  el riesgo admisible.

### **3.5.2 DISEÑO DE ESTABILIDAD**

En este proyecto, desde el punto de vista del diseño de estabilidad, se evalúan formulaciones destinadas al cálculo de los elementos que integran el manto principal o coraza exterior. El manto principal es una de las partes esenciales de una defensa costera, debido a que su protección definirá la capacidad resistente de la defensa. Los elementos de protección que componen la coraza exterior pueden ser naturales o artificiales y sus dimensiones dependerán de la altura de ola y de la fórmula que se utilice para su diseño (d'Angremond & Van Roode, 2004). A continuación, se presentan dos formulaciones expuestas en el documento "*Coastal Engineering Manual*" (CEM), utilizadas para la estimación del peso de las unidades de coraza.

#### **Fórmula de Hudson (1959)**

Hudson y Jackson (1959) presentan una fórmula de reconocida difusión y cierta limitación, con estructura semejante a los trabajos realizados por Iribarren (1938) (Negro & Varela, 2002).

Para oleaje irregular y dos capas de armadura, se tiene:

$$W = \frac{\rho_s H^3}{(K_D \cot \alpha) \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3}$$

**Ecuación 19**

Donde  $W$  es el peso de la roca [ton],  $H$  es la altura de ola significativa [m],  $\rho_s$  es la densidad volumétrica del material [ton/m<sup>3</sup>],  $\rho_w$  es la densidad volumétrica del agua [ton/m<sup>3</sup>],  $\alpha$  el ángulo del talud con respecto a la horizontal y  $K_D$  corresponde a una

constante de estabilidad. Esta constante (de estabilidad) se obtiene de acuerdo a lo expuesto en la siguiente tabla.

**Tabla 4:** Valor  $K_D$  para  $H = H_s$ .

Forma de la piedra	Colocación	Daño			
		0 - 5 %		5 - 10 %	10 - 15 %
		Rompe la ola	No rompe la ola	No rompe la ola	No rompe la ola
Suave y redondeada	Al azar	2.1	2.4	3.0	3.6
Rugosa y angular	Al azar	3.5	4.0	4.9	6.6
Rugosa y angular	Especial	4.8	5.5		

Fuente: Adaptado de (USACE, 2003).

### **Fórmula de Van der Meer (1988)**

Entre 1981 y 1988, Van der Meer desarrolla una nueva expresión para escolleras, cubos, tetrápodos y acrópodas, basada en ensayos con oleaje irregular y combinando la altura de ola, periodo, duración de los temporales, permeabilidad teórica del manto, forma de rotura y número de Iribarren. Esta formulación constituyó un despegue en el campo de los rompeolas por su notable repercusión (Negro & Varela, 2002).

Considerando oleaje irregular y dos capas de armadura, se tiene:

$$\frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) D_{n50}} = 6.2 * S^{0.2} * P^{0.18} * N_z^{0.1} * \varepsilon_m^{0.5}, \quad \text{para } \varepsilon_m < \varepsilon_{mc}$$

$$\frac{H_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) D_{n50}} = 1.0 * S^{0.2} * P^{-0.13} * N_z^{0.1} * (\cot \alpha)^{0.5} * \varepsilon_m^P, \quad \text{para } \varepsilon_m > \varepsilon_{mc}$$

### **Ecuación 20**

Con:

$$\varepsilon_m = S_m^{-0.5} \tan \alpha \quad \varepsilon_{mc} = (6.2P^{0.31} (\tan \alpha)^{0.5})^{1/(P+0.5)}$$

Donde  $H_s$  corresponde a la altura de ola significativa [m],  $D_{n50}$  es el diámetro medio de la roca [m],  $\rho_s$  es la densidad volumétrica del material [ $\text{ton}/\text{m}^3$ ],  $\rho_w$  la densidad volumétrica del agua [ $\text{ton}/\text{m}^3$ ],  $\alpha$  es el ángulo del talud con respecto a la horizontal, P es la permeabilidad,  $N_z$  representa el número de olas, S equivale al nivel de daño, y finalmente,  $\varepsilon_m$  y  $\varepsilon_{mc}$  corresponden al parámetro de Iribarren y parámetro límite de Iribarren respectivamente.

El nivel de daño (S) para dos capas de armadura se obtiene de acuerdo a la Tabla 5, dependiendo de la pendiente de la estructura y el nivel de daño aceptable de diseño.

**Tabla 5:** Nivel de daño "S", Formulación de Van der Meer.

Unidad	Pendiente	Daño inicial	Daño intermedio	Falla
Roca	1 : 1.5	2	3 - 5	8
Roca	1 : 2.0	2	4 - 6	8
Roca	1 : 3.0	2	6 - 9	12
Roca	1 : 4.0 - 1 : 6.0	2	8 - 12	17

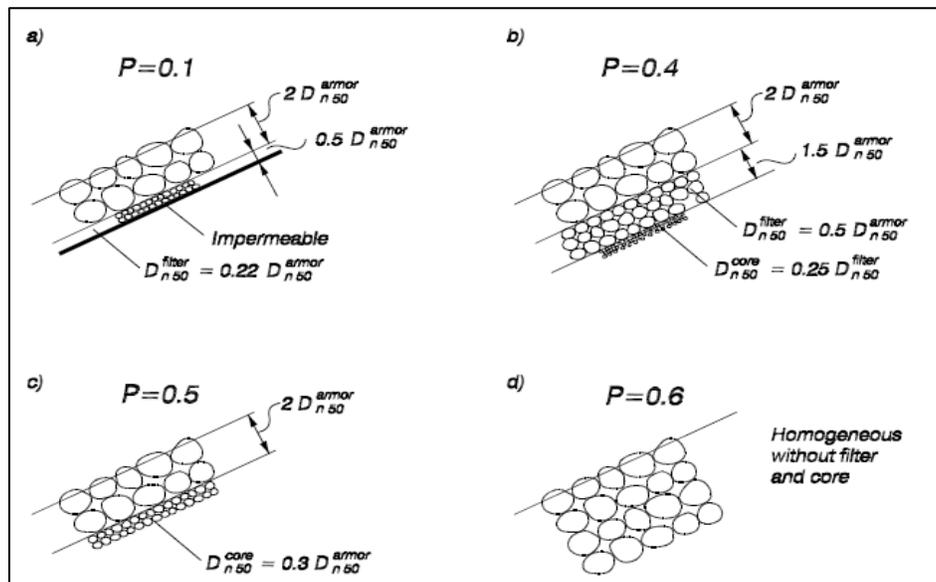
Fuente: Adaptado de (USACE, 2003).

Los daños expuestos en la Tabla 5, se describen a continuación:

- *Daño inicial, no existe desplazamiento de los elementos de la coraza, las deformaciones experimentadas por la estructura están asociadas al asentamiento de los elementos.*
- *Daño intermedio, movimiento de las unidades de la coraza, sin causar exposición de las capas de filtro inferiores al ataque de las olas.*
- *Falla, exposición directa de las capas de filtro inferiores al ataque de las olas.*

En cuanto a la permeabilidad de la estructura, los valores se presentan en la Figura 4 y dependen de la tipología de la estructura a utilizar.

**Figura 4:** Coeficiente de permeabilidad, Formulación de Van der Meer.



Fuente: (USACE, 2003).

### 3.5.3 DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico se orienta a definir las características geométricas de la obra de protección costera, referidas principalmente a la cota de coronamiento de la estructura en función del sobrepaso. Este diseño (hidráulico) se puede resumir en un cálculo de sobrepaso de caudal, bajo ciertos criterios establecidos.

#### Caudal de sobrepaso

Se denomina sobrepaso cuando en determinadas ocasiones, el oleaje es capaz de sobrepasar la obra marítima diseñada, bien sea una obra en talud o estructura vertical. Esta situación, que ocurre bajo la acción de oleajes muy severos, debe ser considerada como casi inevitable debiéndose prever en el diseño inicial de forma que los daños causados sean los menores posibles (Enginyeria Marítima, 2002).

Las tasas de sobrepaso se estiman sobre la base de los estudios realizados en laboratorios europeos que se resumen en la EurOtop (2018). El cálculo del sobrepaso se llevó a cabo por medio de la formulación descrita en la Ecuación 21 empleadas para pendientes de 1:2 a 1:3/4 (V: H).

$$\frac{q}{\sqrt{g} H_s^3} = 0.09 \exp \left[ - \left( 1.5 \frac{Rc}{H_s \gamma_f \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right]$$

Ecuación 21

Donde  $q$  es el caudal de sobrepaso [L/s/m],  $g$  es la constante de gravedad [m/s<sup>2</sup>],  $H_s$  es la altura de ola significativa [m],  $Rc$  representa el francobordo de la estructura [m],  $\gamma_f$  equivale al parámetro de rugosidad y  $\gamma_\beta$  corresponde al parámetro de incidencia.

Los parámetros ( $\gamma_\beta$ ) y ( $\gamma_f$ ) se definen en la Ecuación 22 y Tabla 6 respectivamente.

Para  $\gamma_\beta$  se tiene:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta| \text{ para } 0 \leq \beta \leq 80^\circ$$
$$\gamma_\beta = 0.736 \text{ para } \beta > 80^\circ$$

Ecuación 22

**Tabla 6:** Valores Factor de Rugosidad.

<b>Tipo de manto</b>	$\gamma_f$
Superficie impermeable lisa	1.0
Rocas (1 capa, núcleo impermeable)	0.60
Rocas (1 capa, núcleo permeable)	0.45
Rocas (2 capa, núcleo impermeable)	0.55
Rocas (2 capa, núcleo permeable)	0.40
Cubos de concreto (1 capa posición aleatoria)	0.50
Cubos de concreto (2 capa posición aleatoria)	0.47
Antífers	0.47
HARO's	0.47
Accropode	0.46
Xbloc	0.45
CORE-LOC	0.44
Tetrápodos	0.38
Dolos	0.43

Fuente: Adaptado de (EurOtop, 2018).

## **4 METODOLOGÍA**

En esta sección se presenta la metodología a utilizar en el ámbito de este estudio. Esta, describe las actividades realizadas para la obtención de resultados, los que a la postre, permitieron generar comparaciones y conclusiones.

### **4.1 ANÁLISIS PREVIO**

Utilizando información de proyectos de ingeniería de entidades como la Dirección de Obras Portuarias (DOP), dependiente del Ministerio de Obras Públicas, y documentos bibliográficos de la Universidad de Valparaíso, se identificaron y seleccionaron los estudios comunes en el diseño de proyectos de obras marítimas, independientemente del tipo de obra que se desee proyectar. Esto, permitió sentar las bases del presente proyecto, debido a que el análisis comprende aquellos estudios comunes identificados (de condiciones naturales), evaluando parámetros y metodologías importantes en el desarrollo de cada etapa.

Entre las condiciones naturales relevantes para efectos del presente análisis destacan: batimetría, oleaje, marea, y niveles del mar. El estudio de las condiciones antes mencionadas es posible de apreciar en las secciones venideras, donde se describe la lógica en el desarrollo de las etapas identificadas.

### **4.2 BASES DE DISEÑO**

El presente diseño se plantea en base a las recomendaciones expuestas en la ROM 0.2-90, considerando para ello los siguientes criterios:

- **Vida útil (Lf)**

Para determinar la vida útil de la obra proyectada, se utilizaron las recomendaciones expuestas en la Tabla 38 del Anexo A (ROM 0.2-90, 1990), señalando el tipo de obra o instalación y el nivel de seguridad requerido en función de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.

- **Riesgo (R)**

El riesgo se determinó utilizando la Tabla 39 del Anexo A (ROM 0.2-90, 1990) para el caso de obras flexibles, semirrígidas o de rotura en general reparable, considerando el riesgo de pérdidas humanas reducidas.

- **Periodo de retorno (Tr)**

El periodo de retorno se calculó en base a la vida útil proyectada y al riesgo admisible estimado, utilizando para ello la formulación expuesta en la Ecuación 18.

### **4.3 ANÁLISIS BATIMÉTRICO**

Un análisis batimétrico es un punto de partida fundamental al momento de proyectar cualquier obra marítima, ya que permite entender la conformación morfológica de la zona en estudio. La batimetría es fundamental para la propagación de modelos de oleaje, debido a que puede modificar la altura y dirección del oleaje mediante fenómenos implícitos asociados en el proceso, como la refracción y el asomeramiento.

El objetivo del presente análisis es evaluar las diferencias que provoca la densidad de información (puntos de profundidad por un área específica) en dos batimetrías construidas, propagándolas bajo ciertos parámetros establecidos. Para ello, se confeccionaron dos mallas independientes. La primera batimetría construida fue la base del estudio y su modificación en densidad de puntos permitió elaborar una segunda malla batimétrica. Para efectos prácticos recibieron el nombre de “Batimetría Completa” y “Batimetría Modificada” respectivamente.

#### **4.3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE**

La construcción de las mallas batimétricas se realizó digitalizando la información de las cartas náuticas SHOA (CN). En la actualidad, el SHOA, es el organismo encargado de la mantención de las cartas náuticas, cubriendo la mayoría del territorio nacional (costero) con una gran variedad de documentos a su haber, siendo algunas cartas de baja resolución (escala 1:500.000), mientras que otras poseen una resolución mucho mayor (escala 1:10.000) permitiendo de este modo una mejor comprensión de diversas zonas costeras.

Los antecedentes batimétricos utilizados en este estudio se resumen a continuación:

- Carta hidrográfica del SHOA N° 5111, Bahía y Puerto Valparaíso, escala 1:10.000.
- Carta hidrográfica del SHOA N° 4322, Bahía Concón, escala 1:10.000.
- Carta hidrográfica del SHOA N° 4000, Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso, escala 1:500.000.
- Carta hidrográfica del SHOA N° 5000, Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco, escala 1:500.000.

#### **4.3.2 ÁREA DE APLICACIÓN**

En la siguiente figura, se aprecian los límites geográficos del área que constituyó el análisis batimétrico principal en la Bahía de Valparaíso.

**Figura 5:** Área de aplicación Bahía de Valparaíso. El rectángulo amarillo representa los límites establecidos para la comparación de mallas batimétricas.



Fuente: Elaboración propia a partir de **Google Earth**.

## 4.4 CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE

Para la realización de un diseño de obras marítimas es necesario comprender las fuerzas que interactúan con las obras, siendo la principal fuerza solicitante el oleaje. El entendimiento de este fenómeno se logra mediante un enfoque estadístico, el cual se orienta a definir el comportamiento de algunas características del oleaje (altura, periodo y dirección) tanto en su condición más frecuente llamado generalmente clima medio, como en su condición más energética llamado clima extremo.

El estudio de oleaje en el presente proyecto se desarrolló en tres etapas. En la primera, se analizó el oleaje en aguas profundas mediante la aplicación de clima extremo y clima medio. La segunda etapa fue la transferencia de oleaje desde aguas profundas al sitio de interés utilizando el modelo numérico SWAN. Finalmente, la tercera etapa en la caracterización de oleaje consistió en el análisis de este fenómeno en dos nodos de control ubicados frente al sitio de interés.

### 4.4.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para la determinación del clima de oleaje en el sector de estudio, se utilizó la base de datos del proyecto Fondef “*Un Atlas de Oleaje para Chile*”, para un punto ubicado en las coordenadas 33.00° S y 73.00° W (Figura 6). Esta información proviene de la generación del modelo *Wavewatch III* y contiene datos de estados de mar cada 3 horas, caracterizados por su altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ), dirección media ( $D_m$ ) y periodo peak ( $T_p$ ).

**Figura 6:** Ubicación nodo Valparaíso 33.00° S y 73.00° W.



Fuente: Elaboración propia a partir de **Google Earth**.

#### **4.4.2 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS**

Con el fin de comprender la frecuencia de ocurrencia de las variables analizadas, se generaron tablas de incidencia de: Altura-Dirección, Periodo-Dirección y Altura-Periodo, además, para visualizar de manera completa la distribución de estas ocurrencias se elaboraron histogramas de alturas, periodos y dirección. La información obtenida de este análisis permitió generar los casos necesarios para la propagación del oleaje hacia la zona de interés.

#### **4.4.3 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS**

El clima extremo de oleaje tiene por objetivo prever las condiciones de mayor energía que este pueda representar en algún horizonte esperado, normalmente de largo plazo. Para ello, el análisis se enfoca en la caracterización de eventos extremos o temporales para la zona que se desee estudiar. Lo que se busca con esto principalmente, es determinar el comportamiento futuro de las condiciones extremas del oleaje, reflejadas finalmente en una altura de ola asociada a un periodo de retorno de diseño.

El estudio de este fenómeno para sus condiciones extremas requiere de métodos estadísticos específicamente diseñados para este fin. Estas metodologías se encuentran descritas en la literatura internacional como por ejemplo en Liu y Frigaard (2001), donde se abarca desde criterios de selección de datos extremos hasta el cálculo de una altura de diseño correspondiente a un periodo de retorno.

La identificación de eventos extremos se realizó mediante el método de “*valores sobre el umbral*”, a partir de los estados de mar de mayor altura en cada uno de los años de “*Hindcasting*”, verificando la independencia con un rango mínimo de tres días entre cada tormenta, posteriormente, se realizó un análisis estadístico de valores extremos que arrojó

una estimación de la altura significativa de ola con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, siguiendo lo expuesto por el SHOA en su publicación N° 3201.

En Chile, el desarrollo de este análisis esta normado por el SHOA, en cuya metodología plantea la determinación de valores asociados a periodos de retorno a partir de la selección de eventos extremos en aguas profundas, que posteriormente, se propagarán al sitio de interés mediante la asignación de un periodo peak y dirección media.

Un estudio realizado por Molina (2016), concluye que la metodología expuesta por el SHOA en su publicación N° 3201 (3ª edición año 2005) no es recomendable, en desmedro de una metodología que transfiera espectralmente toda la información disponible desde aguas profundas al sitio de interés, realizando allí (sitio de interés) la evaluación de eventos extremos.

Como se mencionó en párrafos anteriores, el presente proyecto utilizó la metodología expuesta por el SHOA en el análisis de valores extremos para la obtención de parámetros puntuales de alturas de ola de diseño en aguas profundas, se entiende además, que el SHOA es el organismo normativo en este tipo de análisis, por lo cual la mayorías de los estudios de oleaje se realizan de acuerdo a sus estándares para recibir la aprobación de dicha entidad, sin embargo, esta sección plantea el desarrollo y conclusiones del estudio realizado por Molina (2016), junto con una aplicación de esta metodología al sitio de interés, con la finalidad de destacar las diferencias metodológicas en ambos procesos, aportando así al conocimiento en la práctica ingenieril chilena.

#### **4.4.4 TRANSFERENCIA DE OLEAJE**

La construcción de un modelo de propagación de oleaje permitió transferir diversos parámetros desde aguas profundas hasta aguas someras para diferentes secciones que integran el presente proyecto.

El proceso de transferencia de oleaje se realizó aplicando una metodología de anidados sucesivos, aumentado progresivamente la resolución de mallado (Tabla 7). Los bordes de entrada de la malla sobrepasaban los 1.000 [m] de profundidad con el objetivo de que la propagación se produjera desde aguas profundas. La representación espacial de las mallas se muestra en la Figura 7, donde en color rojo se aprecia la malla gruesa, en verde la malla intermedia y en amarillo la malla fina.

Por último, las condiciones de contorno empleadas para el modelo fueron de tipo espectral, obtenidas mediante la utilización de un espectro sintético tipo JONSWAP, con un factor de apuntalamiento gamma de 3.3, un “*spread*” direccional de 10° y un coeficiente de rotura igual a 0.78 para todos los casos empleados. Simulado (para el análisis batimétrico) con la información de los parámetros de resumen obtenidos de las condiciones de oleaje en aguas profundas (Hs, Tp y Dm), para casos reinantes y dominantes, mientras que para transferir toda la estadística al sitio de interés, se implementó la metodología de propagación cuasi purista (propagación de alturas unitarias), obteniendo de esta forma los diferentes coeficientes de agitación.

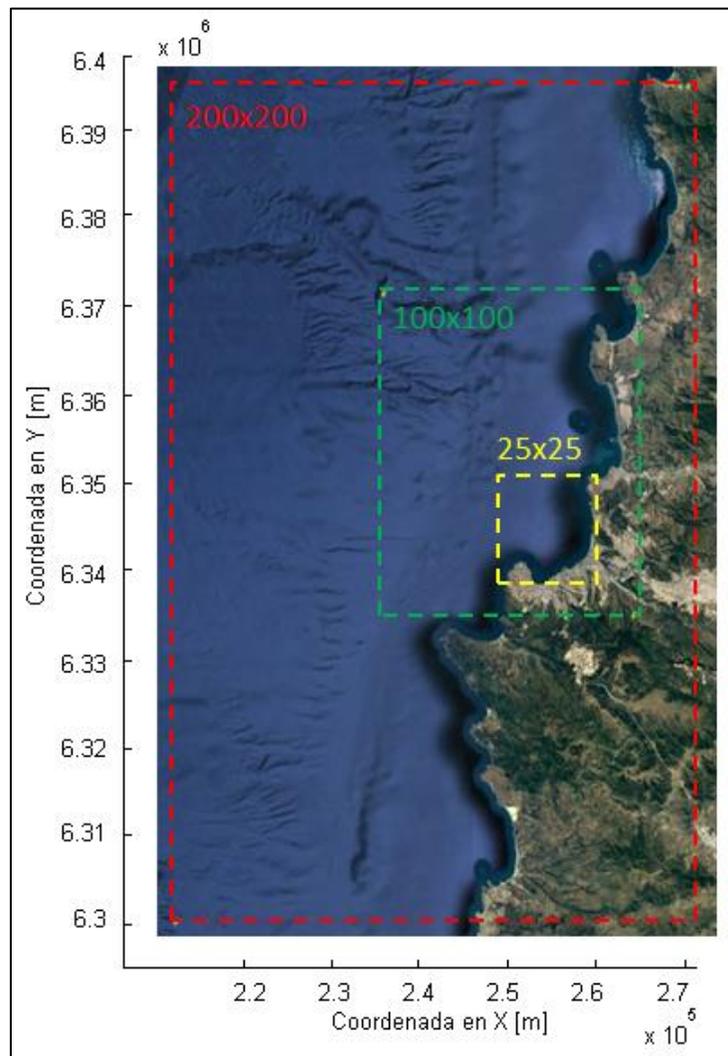
Una vez obtenidos los coeficientes mencionados anteriormente, se utilizó la Ecuación 23 en la estadística de aguas profundas para obtener el oleaje en el sitio de interés.

$$H_{SITIO} = H_0 * K_T$$

**Ecuación 23**

Donde  $H_{SITIO}$  corresponde a la altura de ola en las proximidades de la obra (sitio de interés),  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas y  $K_T$  el coeficiente de transformación obtenido mediante el software SWAN.

**Figura 7:** Esquema de mallas de propagación.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 7:** Características generales de la Grilla batimétrica de propagación.

Malla	Origen malla [UTM]		Espaciamiento	
	X	Y	X	Y
Gruesa	212500	6300000	200	200
Intermedia	236550	6336850	100	100
Fina	252000	6340400	25	25

Fuente: Elaboración propia.

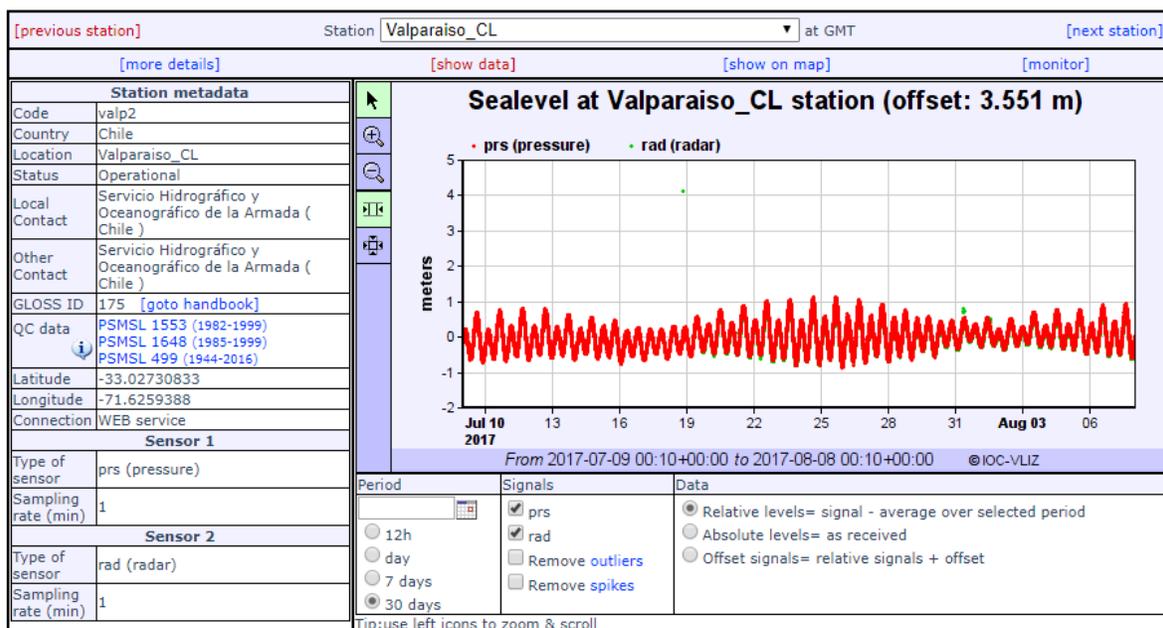
## 4.5 ANÁLISIS DE MAREAS Y NIVELES DE DISEÑO

En este apartado se exponen las metodologías necesarias para estimar los efectos de la marea, considerando sus componentes astronómicas y meteorológicas, junto con un enfoque multivariado orientado a la determinación de niveles extremos del mar. El desarrollo de estas metodologías permitió la determinación de diversos parámetros que integran los estudios de condiciones naturales, reflejados finalmente en los niveles de diseño a utilizar.

### 4.5.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para la obtención de registros del nivel del mar se accedió a la página “*Sea Level Station Monitoring Facility*” ([www.ioc-sealevelmonitoring.org](http://www.ioc-sealevelmonitoring.org)). Este sitio web proporciona información en tiempo real del nivel del mar de redes mundiales y regionales, donde es posible visualizar y descargar “set” de datos desde estaciones individuales para algunas localidades del país. En Chile, estas estaciones se encuentran monitoreadas por el SHOA, abarcando actualmente alrededor de 55 localidades. El análisis del nivel del mar se realizó para la localidad de Valparaíso, estación “*Valparaiso\_CL*” (Figura 8), obteniéndose una base de datos de 6 años de duración, desde enero de 2010 hasta diciembre del año 2015. Estos datos fueron complementados con la información proporcionada por el Ingeniero Civil Oceánico Francisco Molteni, totalizando así una cantidad de 16 años de registros del nivel del mar para la localidad de Valparaíso.

**Figura 8:** Estación de monitoreo para el nivel del mar, Valparaíso.



Fuente: [www.ioc-sealevelmonitoring.org](http://www.ioc-sealevelmonitoring.org).

## 4.5.2 MAREA ASTRONÓMICA

La determinación de la marea astronómica se planteó mediante el desarrollo de un análisis armónico y no armónico de mareas.

### 4.5.2.1 ANÁLISIS NO ARMÓNICO

En cuanto a un diseño de obras marítimas, el SHOA en su publicación N° 3202 "Instrucciones Oceanográficas N°2", establece que la marea se puede estimar a partir de las predicciones de marea, estableciendo un método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos sobre la base de diferentes técnicas estadísticas.

Para verificar el comportamiento de la marea a lo largo del tiempo, se consideró el registro de 16 años de observaciones del nivel del mar, obteniéndose diversos planos mareales definidos con respecto al NRS. El análisis no armónico fue realizado considerando la metodología contenida en la publicación SHOA N° 3202.

### 4.5.2.2 ANÁLISIS ARMÓNICO

Para la obtención de la marea astronómica, los registros del nivel del mar para Valparaíso fueron sometidos a un análisis armónico. Este análisis se fundamenta sobre la base de diversos algoritmos matemáticos, los que fueron trabajados utilizando la herramienta T-Tide de Matlab (Pawlowicz, et al., 2002), determinando los armónicos constituyentes de la onda de marea, además de series representativas del nivel del mar y marea astronómica.

Una vez estimadas las constituyentes armónicas, es posible obtener el Nivel de Reducción de Sonda y establecer el régimen de mareas para la localidad de Valparaíso. El NRS se llevó a cabo siguiendo la Publicación SHOA N° 3105 (SHOA, 2017), cuyos parámetros se resumen en la Ecuación 24. El régimen de mareas, por otra parte, se estableció mediante el coeficiente de Courtier expuesto en la Publicación SHOA N° 3013 (SHOA, 1992), mostrado en la Ecuación 25.

$$NRS = Z0 - (H_{M2} + H_{S2} + H_{N2} + H_{K1} + H_{O1})$$

**Ecuación 24**

$$F = \frac{H_{K1} + H_{O1}}{H_{M2} + H_{S2}}$$

**Ecuación 25**

Donde  $Z0$  es el nivel de mar,  $H_{M2}$  corresponde a la semiamplitud constituyente lunar semidiurno,  $H_{S2}$  es la semiamplitud constituyente solar principal semidiurno,  $H_{N2}$  es la semiamplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurno,  $H_{K1}$  es la semiamplitud constituyente lunisolar declinacional diurno y  $H_{O1}$  es la semiamplitud constituyente lunar declinacional diurno.

Por otra parte, para la ecuación del coeficiente de Courtier se tiene que, si  $F < 0,25$  corresponde a un régimen semidiurno, si  $0,25 < F < 1,50$  se está en un régimen mixto semidiurno, si  $1,50 < F < 3,00$  el régimen se encuentra en mixto diurno y finalmente, si  $F > 3,00$  el régimen es diurno.

### **4.5.3 MAREA METEOROLÓGICA**

A continuación, se presentan los procedimientos utilizados para la determinación individual de los efectos que componen la marea meteorológica. Cabe destacar, que este fenómeno se obtuvo en una primera instancia como la diferencia entre la serie del nivel del mar y la marea astronómica reconstruida (ambas series conseguidas del análisis armónico de la marea) lo que se denomina usualmente como residuo. Para caracterizar el comportamiento extremo de la marea meteorológica, se realizó un análisis de valores extremos a la serie del residuo, utilizando la metodología expuesta en la sección 4.4.3 “Clima extremo de oleaje en aguas profundas” (Liu & Frigaard, 2001).

#### **4.5.3.1 EFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA (*BAROMETRIC SET-UP*)**

Para cuantificar el incremento del nivel del mar por efectos de la variación de presión atmosférica, se analizó la estadística de esta variable para la ciudad de Valparaíso entre el año 2013 al año 2016, obtenida de la Dirección General de Aeronáutica Civil, Dirección

Meteorológica de Chile ([www.meteochile.cl/inicio.php](http://www.meteochile.cl/inicio.php)) para la estación de Rodelillo, correspondiente a valores promedios de presiones horarias a nivel del mar.

Las sobreelevaciones del nivel del mar producto de este efecto, se calcularon utilizando la metodología del “barómetro invertido”, donde una baja presión atmosférica producirá un incremento del nivel del mar y viceversa (Ecuación 8, Kamphuis, 2000).

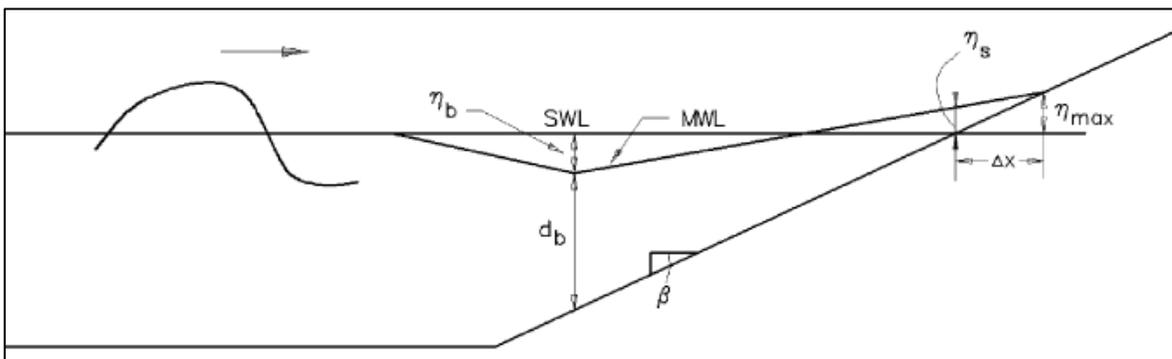
#### 4.5.3.2 EFECTOS DEL VIENTO

En el contexto del diseño de una defensa costera por ejemplo, un estudio de vientos está orientado a determinar las condiciones extremas de este fenómeno, específicamente su incidencia como generador del oleaje local y el efecto que produce en el aumento del nivel del mar (*wind set-up*). Este cálculo no siempre se realiza, debido a que en su mayoría la intensidad de los vientos suelen suponerse bajos y por ende, no son considerados como un parámetro de diseño, sin embargo, con la finalidad de identificar la contribución de los efectos del viento al nivel del mar, se calculó este parámetro siguiendo la metodología expuesta en la referencia “*Introduction to Coastal Engineering and Management*” (Kamphuis, 2000), donde la desnivelación está determinada como una función del largo del *fetch*, la profundidad promedio de la zona de generación y la velocidad del viento.

#### 4.5.3.3 EFECTOS DE SET-UP DEL OLEAJE

El *set-up* de oleaje rompiente fue obtenido con la metodología mostrada en libro “*Coastal Engineering Manual*” (USACE, 2003), utilizando para ello el capítulo “*Surf Zone Hydrodynamics*”. Esta metodología relaciona la altura de ola en aguas profundas, altura de ola en rotura, pendiente del fondo marino ( $\beta$ ), profundidad en rotura ( $d_b$ ), Set-down ( $\eta_b$ ), Set-up ( $\eta_s$ ), línea de costa media ( $\Delta x$ ) y Set-up máximo ( $\eta_{max}$ ), entre otras. El esquema con los parámetros utilizados en esta metodología se muestra en la siguiente figura.

Figura 9: Esquema de definición Setup de oleaje.



Fuente: (USACE, 2003).

## 4.5.4 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS

### 4.5.4.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

Para una estimación más precisa de los niveles extremos del mar, se incorporaron en este análisis las series de tiempo de la variable extremas del oleaje (altura), junto con los datos obtenidos del nivel del mar. Para el caso de los datos de oleaje, se utilizaron los registros expuestos en la sección 4.4 “Caracterización de Oleaje”, que fueron transferidos espectralmente a dos nodos ubicados frente al sitio de interés, considerando para este análisis, los parámetros de altura significativa espectral (o simplemente Hs), junto a los datos del nivel del mar empleados en el estudio de la sección 4.5 “Análisis de Marea y Niveles”. Se realizó una interpolación lineal de los parámetros de altura de ola para obtener una serie temporal de estados de mar por hora que coincidieran con los registros del nivel del mar.

El resultado, una serie temporal conjunta de niveles horarios del mar desde el 01/01/2000 hasta 31/12/2015 (16 años) y donde se seleccionaron (de toda la estadística) los estados de mar de mayor altura, junto con el nivel del mar asociado. Para esto, se utilizó la metodología conocida como “*Peak Over Threshold*” (POT, por sus siglas en ingles), extrayendo finalmente una muestra independiente e idénticamente distribuida de 80 datos de altura de ola y nivel del mar.

### 4.5.4.2 ANÁLISIS EXTREMO UTILIZANDO FUNCIONES DE CÓPULA

Se desarrolló una metodología que permite estimar la recurrencia de eventos extremos respecto a su altura significativa y nivel del mar. El desarrollo de lo planteado anteriormente se visualiza mediante la construcción de un gráfico, donde, los periodos de retornos se muestran como curvas de nivel en función de la variable estudiada.

#### Estimación de las Funciones de Distribución

Para las series de altura de ola y nivel del mar se ajustaron diversas distribuciones de probabilidad, dentro de las que se consideraron Weibull, Gumbel y Log Normal, seleccionando aquella que presentó el mejor ajuste. El criterio de selección del ajuste fue el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), el que se complementó con el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov<sup>1</sup>, corroborando así, la bondad del ajuste entre las distribuciones de probabilidad.

#### Dependencia de Estructura

El parámetro de dependencia ( $\rho$ ), se desarrolló mediante el coeficiente de correlación de Kendall (T), según lo expuesto en la Ecuación 14, obteniendo una dependencia positiva, por lo que se infiere que las variables pueden no ser independientes (relación directa). En base a esto, se calculó el parámetro de dependencia de cada cópula (Clayton y Gumbel) con las ecuaciones número 15 y 16.

---

<sup>1</sup> Prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.

### Selección de la Cópula: Estimación y Test de Ajuste

Una vez obtenida las funciones de distribución y la relación de dependencia entre las variables, se calculó para cada par de datos, la probabilidad conjunta de la serie de eventos extremos utilizando las cópulas paramétricas de Clayton y Gumbel (Ecuación 12 y 13 respectivamente). La cópula más adecuada para el análisis se evaluó mediante el cálculo del ajuste estadístico Cramer-Von Mises (Requena, et al., 2015), considerando para la selección, aquella cópula que arrojó el menor valor de ajuste. El estadístico utilizado para la selección de la cópula se presenta a continuación:

$$S_n = \sum_{i=1}^n \left\{ C_n \left( \frac{R_i}{n+1}, \frac{S_i}{n+1} \right) - C_{\rho n} \left( \frac{R_i}{n+1}, \frac{S_i}{n+1} \right) \right\}^2$$

**Ecuación 26**

$$C_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 \left( \frac{R_i}{n+1} \leq u, \frac{S_i}{n+1} \leq v \right) \quad u, v \in [0,1]$$

**Ecuación 27**

Donde  $C_n$  es la cópula empírica,  $C_{\rho n}$  es la cópula paramétrica evaluada con las probabilidades empíricas marginales de cada variable,  $R_i$  y  $S_i$  son los rankings de los valores de las variables X e Y, asociados a los eventos extremos i. Por último n es el número de eventos extremos.

Una vez seleccionadas las funciones de distribución y la cópula paramétrica, se calculó la probabilidad acumulada para un conjunto de valores dispuesto en forma de matriz, donde, destacan el nivel del mar en el “eje x” y las alturas de ola en el “eje y”. Posteriormente, se calculó el periodo de retorno conjunto asociado a cada par de datos X e Y, utilizando la siguiente expresión (Mazas & Hamm, 2017):

$$T(x, y) = \frac{1}{\lambda_p [1 + C_\theta(Fx(x), Fy(y)) - Fx(x) - Fy(y)]}$$

**Ecuación 28**

Finalmente se graficó, de la matriz de valores, los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años como curvas de nivel, junto con los eventos extremos utilizados de altura de ola versus nivel del mar.

#### 4.5.5 NIVELES DE DISEÑO

Históricamente, los diseños de infraestructura costera han considerado variaciones de nivel del mar adicionales a la marea astronómica, aunque los criterios que se utilizan para su cálculo son variados dada la falta de consenso, escasez de mediciones y la falta de estudios específicos (Beyá & Winkler, 2012). Y es que en Chile no existen criterios o metodologías que establezcan los niveles de diseño para efectos de diversos tipos de infraestructuras, utilizándose normalmente niveles críticos del mar (mínimo y máximo), que no necesariamente abarcan todos los agentes que influyen de manera probabilística en el nivel del mar.

En relación a esto último, Beya & Winkler (2012) exponen que “*Dada la amplia variedad y complejidad de los fenómenos hidro-meteorológicos que inciden en el nivel de mar, es necesario realizar un diagnóstico que integre todos los agentes involucrados*”, considerando así, como una primera aproximación a la definición de un nivel máximo de diseño, la siguiente expresión:

$$C = NRS + Z_{MA} + Z_{MMP} + Z_{MMV} + W_{SETUP} + O_{IG} + \text{Otros efectos}$$

**Ecuación 29**

Donde  $C$  es el nivel de diseño,  $NRS$  es el nivel de reducción de sondas,  $Z_{MA}$  la marea astronómica,  $Z_{MMP}$  es la marea meteorológica por variación de presión atmosférica,  $Z_{MMV}$  es la marea meteorológica por efecto del viento,  $W_{SETUP}$  corresponde al *set-up* debido al oleaje rompiente y  $O_{IG}$  a las ondas infragravitatorias.

Se infiere de lo presentado anteriormente (Ecuación 29), que la conformación de los niveles de diseño es producto de una suma de factores, cuyos parámetros finales son resultados de los diversos estudios de condiciones naturales desarrollados de manera determinísticas (nivel de diseño convencional). La evaluación de estos resultados permitió considerar para el presente proyecto dos escenarios máximos de diseño, correspondientes para periodos de retorno de 25 y 50 años.

De manera complementaria para el desarrollo de los niveles de diseño, se planteó la inclusión de un enfoque multivariado (sección 4.5.4), obteniendo así, niveles extremos del mar considerando la probabilidad de ocurrencia conjunta de más de una variable. Los resultados obtenidos en este proceso se utilizaron para la conformación de niveles de diseño adicionales (nivel de diseño probabilístico), incorporando sólo las variables de oleaje (estados de mar extremos) y nivel del mar.

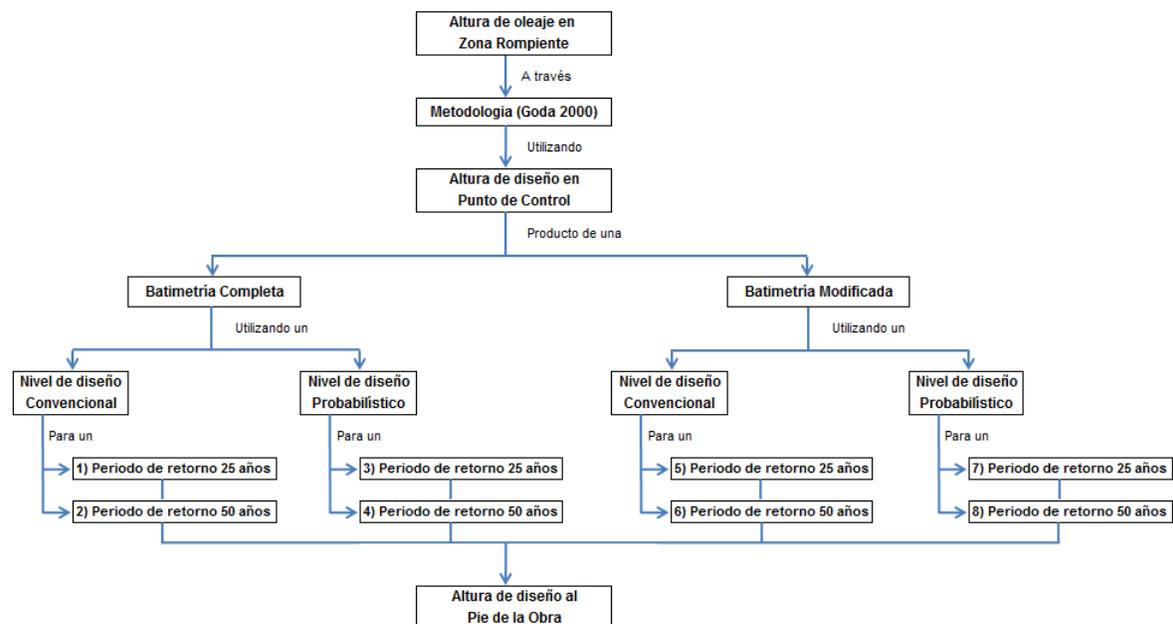
## 4.6 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE

La estimación de la altura de ola en la zona de rompiente se llevó a cabo utilizando el método de Goda (Goda, 2000) expuesto en el ítem 3.4, permitiendo como resultado estimar la altura de ola al pie de la estructura. En esta aproximación propuesta por Goda, la altura de diseño resultante en la zona rompiente es el mínimo valor seleccionado entre tres alturas calculadas a definidas profundidades. Estas tres alturas reciben el nombre de altura en rompiente, altura progresiva y altura post rompiente.

Cabe mencionar además, que este método incluye el efecto de *shoaling*, por lo cual la altura de oleaje en la zona rompiente sólo debe estar afectada por refracción y difracción. Como el modelo de propagación SWAN incluye los efectos refracción, difracción y *shoaling*, a la altura de oleaje obtenida en el sitio de interés (punto de control), se le dividió el valor del *shoaling* empírico obtenido mediante la Figura 75 del Anexo E (GHD, 2010). Este procedimiento suele recibir el nombre de transferencia inversa (hacia aguas profundas).

Finalmente, la Figura 10 presenta un esquema donde se resume el proceso empleado en la estimación de la altura de diseño al pie de la obra. En este proceso, se destaca el uso de diferentes alturas (en el punto de control) como parámetros de entrada, utilizando por ejemplo, las alturas obtenidas como resultado de la Batimetría Completa y Batimetría Modificada para niveles de diseño convencional y probabilístico, considerando los periodos de retorno de 25 y 50 años (tanto para altura como para nivel de diseño).

**Figura 10:** Esquema de parámetros desarrollados en la obtención de la altura de oleaje en zona rompiente.



Fuente: Elaboración propia.

## 4.7 APLICACIÓN CASO PRÁCTICO

Los resultados de los estudios de condiciones naturales se obtuvieron variando o sensibilizando los parámetros y/o metodologías clásicamente empleadas para su desarrollo. La cuantificación de estos resultados se llevará a cabo mediante un pre-diseño de defensa costera, el que finalmente permitirá comprender que tan sensible (numéricamente) es el diseño de una sección tipo de un dique en talud, ante la variación específica de ciertos parámetros y metodologías.

Se diseña una defensa costera en talud debido la frecuencia de su utilización en las zonas costeras, permitiendo la generación de áreas de abrigo a nivel litoral. El pre-diseño se planteó en el sector del paseo Juan de Saavedra, debido a la necesidad de plasmar los resultados obtenidos en un borde costero expuesto a las oscilaciones del mar, en particular, el oleaje, con un entorno físico actual que posibilita el desarrollo de este tipo de infraestructuras. El borde costero del sector Juan de Saavedra, se encuentra ubicado en el extremo norte de la ciudad de Valparaíso colindando con la comuna de Viña del Mar en paralelo a la Avenida España (ver Figura 11). Este paseo costero se inicia al término de la Caleta Portales y finaliza a la altura del ex club “El Caleuche” concluyendo en un paseo con una longitud de aproximadamente 412 [m].

**Figura 11:** Ubicación área de aplicación caso práctico.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, este capítulo propone la subdivisión del pre-diseño de la defensa costera en tres secciones: criterios marítimos de diseño, diseño de estabilidad y diseño hidráulico.

### 4.7.1 CRITERIOS MARÍTIMOS DE DISEÑO

Esta sección resume los parámetros obtenidos de los estudios de condiciones naturales, junto a los parámetros conformados por las bases de diseño, con la finalidad de establecer los criterios preliminares a utilizar en el diseño de la defensa costera.

#### **4.7.2 DISEÑO DE ESTABILIDAD**

El diseño de este apartado, tiene por objetivo evaluar diferencias en la estabilidad de los elementos de una defensa costera, calculando el peso y dimensionamiento de las rocas que componen la coraza de protección. El peso del manto exterior se estimó utilizando dos formulaciones de alta aceptación científica (Negro & Varela, 2002) como los son Hudson (1959) y Van der Meer (1998), sensibilizando estos resultados al variar principalmente, la altura de ola con la que se diseña.

#### **4.7.3 DISEÑO HIDRÁULICO**

La estimación del caudal de sobrepaso se llevó a cabo utilizando la formula determinística expuesta en la referencia EurOtop (2018) (ítem 3.5.3), sensibilizando la formulación con diversos parámetros de altura de ola y nivel de diseño. La finalidad, es cuantificar el cambio que producen en el cálculo del sobrepaso estos parámetros, y por ende, en la altura de coronamiento de la obra.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 BASES DE DISEÑO

- **Vida útil (Lf)**

De acuerdo a la Tabla 38 (ROM 0.2-90, 1990), se plantean dos escenarios a evaluar. El primer escenario corresponde a una infraestructura de carácter industrial específico, con una vida útil estimada en  $L_f = 5$  años considerando una obra de carácter provisorio. El segundo escenario propone una infraestructura de carácter general Nivel 1, donde se contempla en caso de rotura, un pequeño riesgo de pérdidas humanas o daños medioambientales. Con las características antes mencionadas se estimó un nivel de seguridad requerido en Nivel 1, con lo que la vida útil para este escenario se obtiene en  $L_f = 25$  años.

- **Riesgo (R)**

De acuerdo a la Tabla 39 (ROM 0.2-90, 1990) se consideró que el riesgo de pérdidas humanas en caso de rotura es reducido, y en caso de inutilización de la obra, la repercusión económica se encuentra en un intervalo medio bajo para el segundo escenario y alto para el primer escenario.

Para propósitos del presente proyecto se consideró un riesgo  $R = 20\%$  en el primer escenario y de  $R = 40\%$  para el segundo escenario.

- **Periodo de retorno (Tr)**

El periodo de retorno se calculó en base a la vida útil proyectada y al riesgo admisible estimado, utilizando para ello la formulación expuesta en la Ecuación 18. En base a esto, y a los criterios señalados en los párrafos anteriores, del primer escenario para una vida útil de  $L_f = 5$  años y un riesgo de  $R = 0.2$  para la obra, se obtiene un periodo de retorno aproximado a  $T_r = 25$  años. El segundo escenario consta de una vida útil de  $L_f = 25$  años para un riesgo asociado a  $R = 0.4$ , con lo que se obtiene un periodo de retorno estimado en  $T_r = 50$  años.

A continuación, en la Tabla 8, se muestra un resumen con los valores utilizados como bases de diseño para los dos escenarios establecidos.

**Tabla 8:** Resumen de valores para los escenarios considerados.

Bases de diseño	Escenario 1	Escenario 2
	Obra de carácter provisorio	Obra de carácter general
Vida útil [años]	5	25
Riesgo [%]	20	40
Periodo de retorno [años]	25	50

Fuente: Elaboración propia.

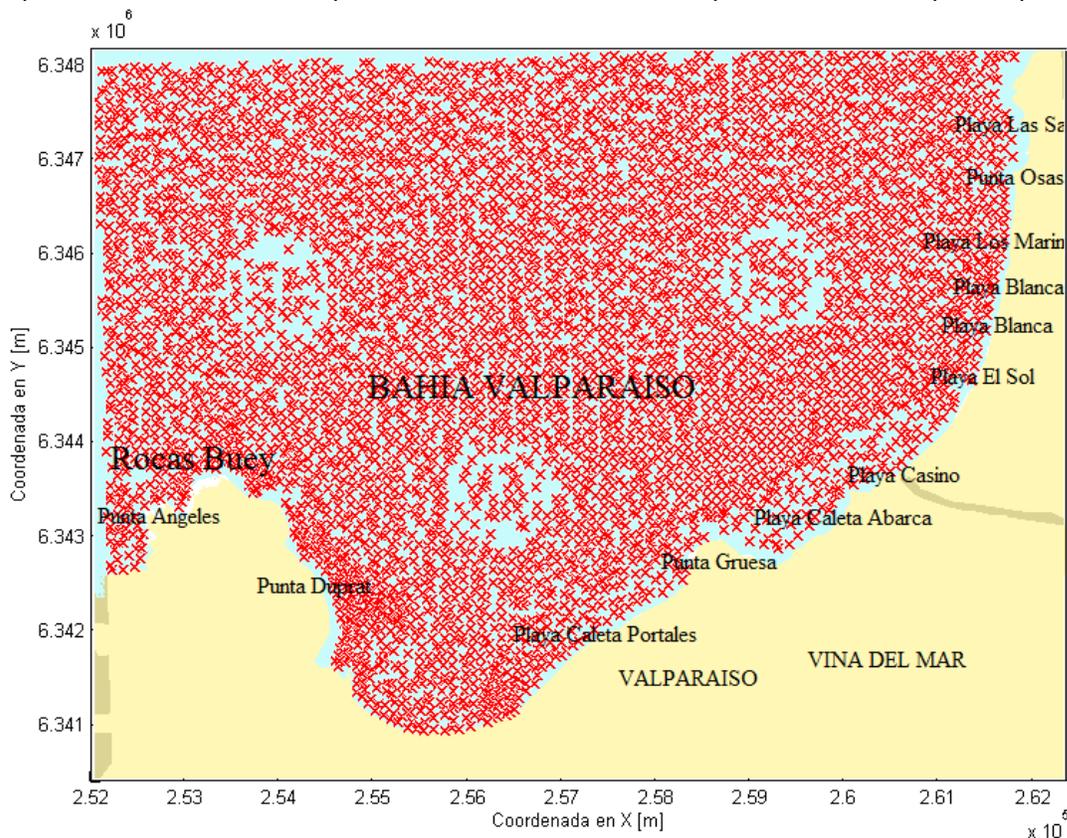
## 5.2 ANÁLISIS BATIMÉTRICO

### 5.2.1 CONSTRUCCIÓN DE BATIMETRÍAS

Con el fin de identificar y evaluar las diferencias que provoca la densidad de puntos en una batimetría, se confeccionaron dos mallas independientes (Batimetría Completa y Batimetría Modificada) digitalizando la información de las cartas náuticas SHOA (CN).

La Batimetría Completa representó en el sector estudio una densidad de aproximadamente 100 puntos de profundidad (sondajes) por  $\text{Km}^2$ , como se aprecia en la siguiente figura.

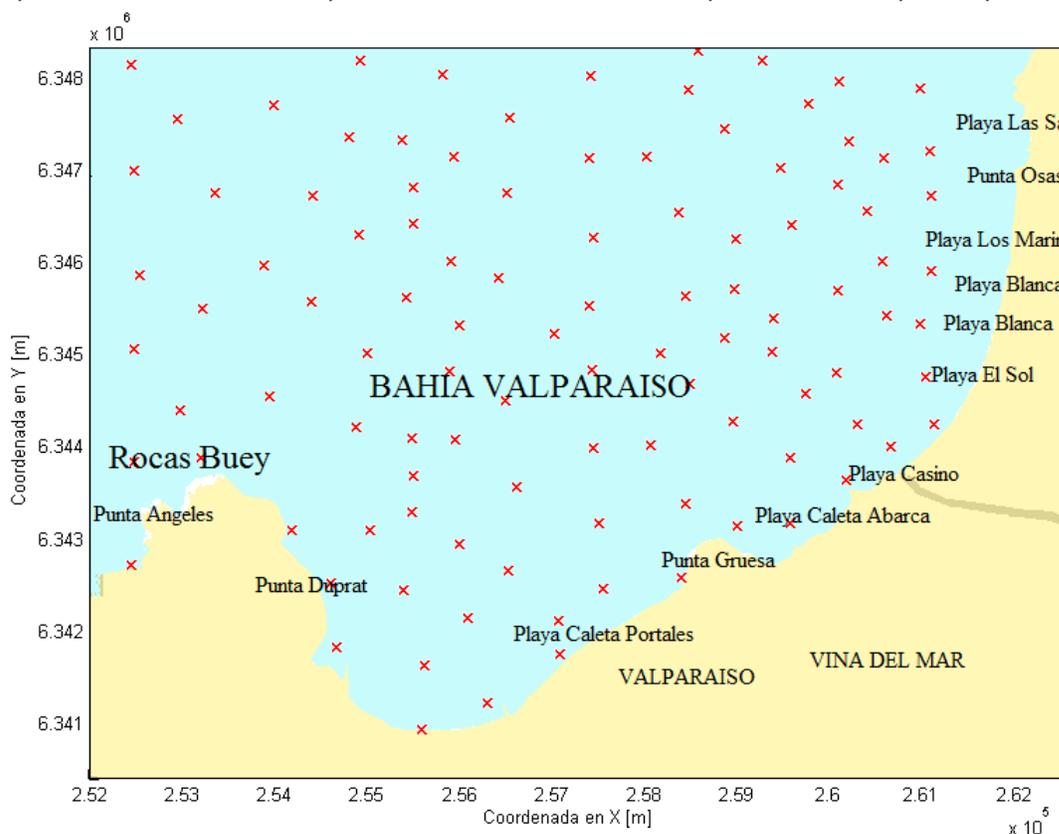
**Figura 12:** Información batimétrica utilizada para la construcción de la Batimetría Completa. Las x representan los vectores de profundidad con una densidad aproximada de 100 puntos por  $\text{km}^2$ .



Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de apreciar diferencias, la construcción de la Batimetría Modificada se llevó a cabo analizando la representatividad que posee la densidad de puntos en datos batimétricos con menor resolución, vale decir, se analizaron cartas náuticas con resolución de 1:500.000, obteniéndose como resultados una densidad de 3 puntos por  $\text{km}^2$  (Figura 13).

**Figura 13:** Información batimétrica utilizada para la construcción de la Batimetría Modificada. Las x representan los vectores de profundidad con una densidad aproximada de 3 puntos por km<sup>2</sup>.



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9, es posible observar las características principales utilizadas en la construcción de ambas mallas batimétricas, y, cuyos resultados se pueden visualizar mediante los esquemas presentados en la Figura 49 y 50 del Anexo B, tanto para la Batimetría Completa como para la Batimetría Modificada.

**Tabla 9:** Características utilizadas en la construcción de las Batimetrías, Análisis Batimétrico.

Parámetros	Batimetría Completa	Batimetría Modificada
Tipo	Rectangular	Rectangular
Superficie	70 km <sup>2</sup>	70 km <sup>2</sup>
Resolución	25 m	25 m
Método interpolación	Kriging	Kriging
Profundidad máxima	120 m	120 m
Densidad de puntos	100 por km <sup>2</sup>	3 por km <sup>2</sup>

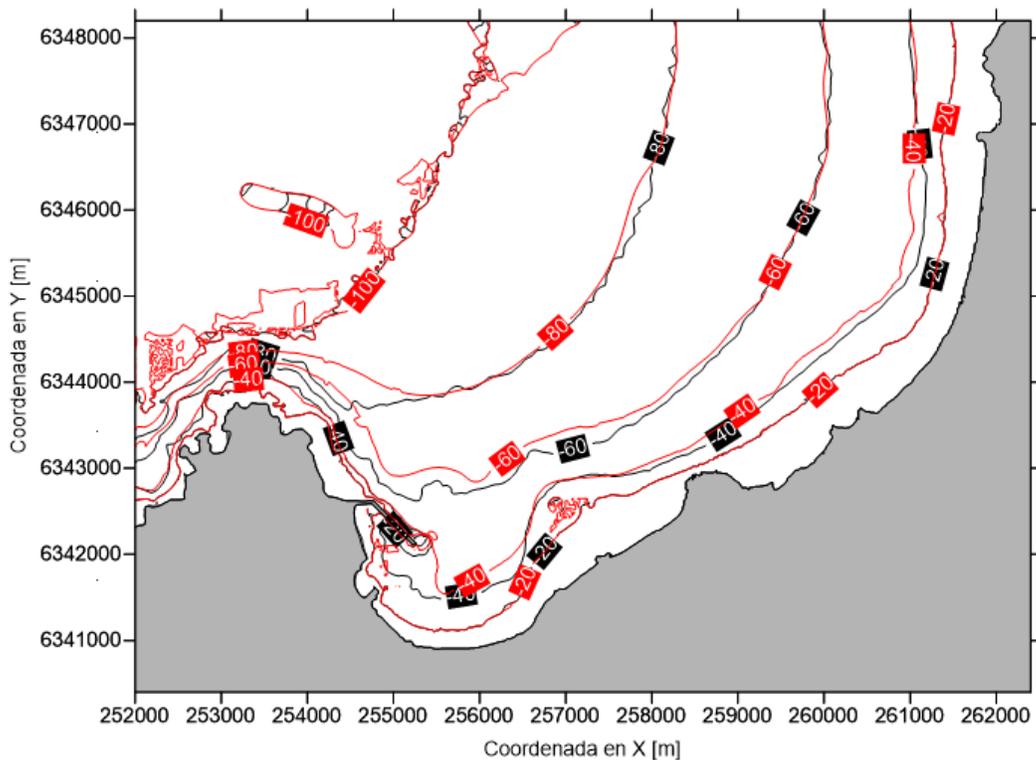
Fuente: Elaboración propia.

## 5.2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

A continuación, se presenta un análisis comparativo realizado a las dos batimetrías construidas, con la finalidad de identificar y cuantificar las diferencias obtenidas en la aplicación de información batimétrica con variada resolución. Este análisis, se llevó a cabo: comparando los veriles de las dos batimetrías generadas (Figura 14), cuantificando las diferencias obtenidas en representaciones gráficas de profundidades (Figura 15) y generando perfiles transversales para las zonas con mayores divergencias (Figura 16, 17 y 18).

La Figura 14 como se expuso anteriormente, presenta un mapa de veriles donde se observa la comparación de la información batimétrica hasta los 100 [m] de profundidad con veriles cada 20 [m]. De la imagen, es posible apreciar que el veril de los 20 [m] posee prácticamente el mismo comportamiento para ambas batimetrías, distinguiéndose diferencias notorias a partir de los veriles 40, 60 y 80 [m]. En cuanto al veril de los 100 [m], se observa que la Batimetría Modificada (en rojo) acentúa las diferencias, distorsionando la forma del veril en comparación a la Batimetría Completa.

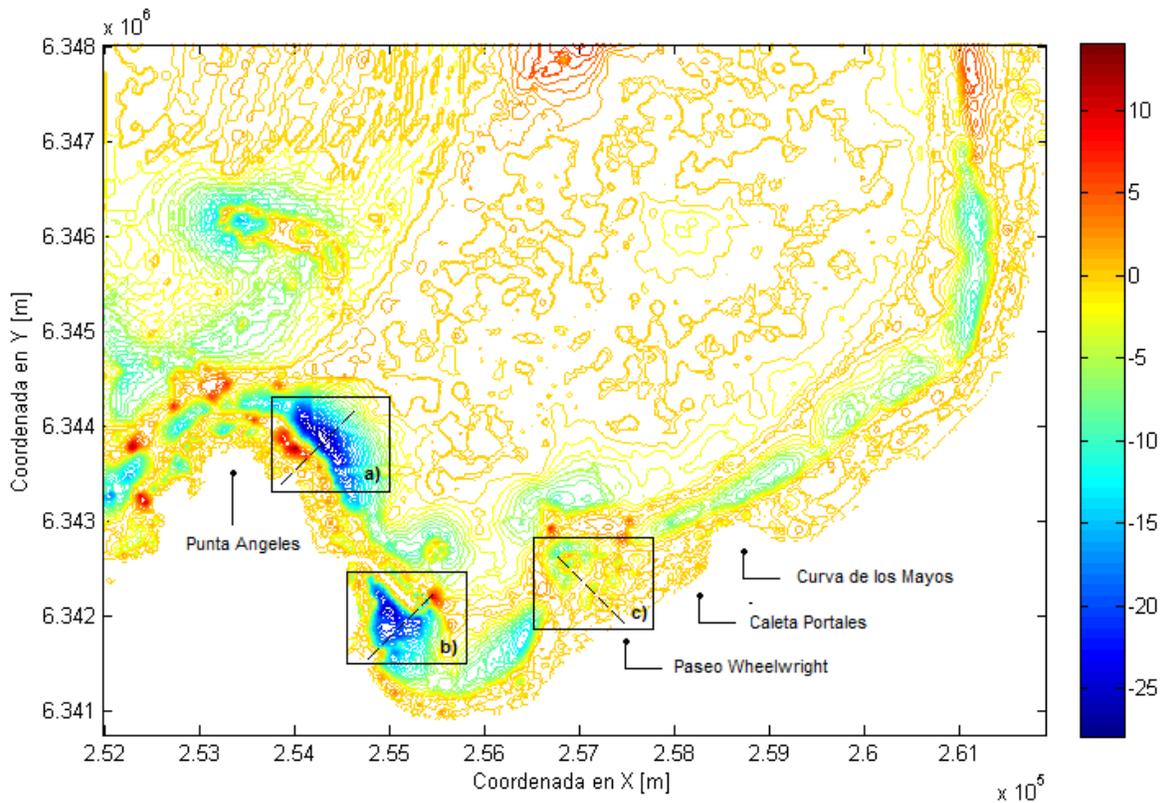
**Figura 14:** Mapa comparativo de veriles cada 20 [m]. En rojo la información de la Batimetría Modificada, en negro los veriles asociados a la Batimetría Completa.



Fuente: Elaboración propia.

Se generó en la Figura 15, una gráfica que muestra las diferencias en profundidades que poseen ambas batimetrías construidas. Los contornos en azul indican que la Batimetría Modificada presentó una subestimación máxima de profundidades respecto a la Batimetría Completa, esto quiere decir, que una batimetría generada a partir de una menor cantidad de sondajes por área (Batimetría Modificada) provoca profundidades mucho menores en variadas zonas de la costa en estudio, alcanzando (para este análisis) una diferencia máxima cercana a -28 [m] en comparación a la Batimetría Completa. La sobreestimación máxima, por otra parte, se visualiza mediante colores rojos, observándose diferencias en los sectores costeros de hasta 14 [m], lo que demuestra que en dichos sectores la profundidad resultante de la Batimetría Modificada es mayor que la obtenida mediante la Batimetría Completa.

**Figura 15:** Diferencias de profundidades en [m], Batimetría Completa y Batimetría Modificada.



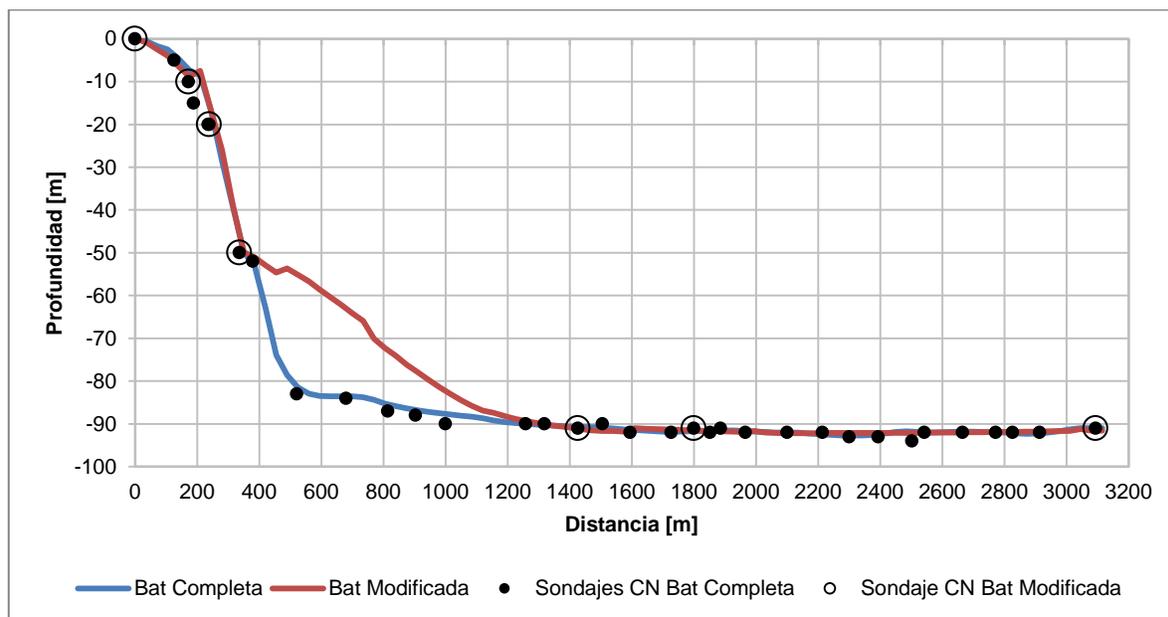
Fuente: Elaboración propia.

Complementando el análisis anterior, se elaboran tres perfiles transversales para las secciones demarcadas en la figura antes mencionada. Las primeras dos secciones (a y b) son referencia de aquellas zonas en donde se aprecian las mayores diferencias de profundidades entre la Batimetría Modificada y la Batimetría Completa, siendo la tercera sección c), un opuesto a lo establecido anteriormente, debido a que visualmente es un sector que no presenta diferencias significativas entre ambas batimetrías.

En la Figura 16, 17 y 18 se presentan los perfiles transversales de las secciones a), b) y c). Se observa una comparación de profundidades entre las batimetrías construidas (Completa y Modificada), juntos con los sondeos obtenidos de las Cartas Náuticas SHOA (CN) que permitieron la confección de las batimetrías variando la resolución que las conforman.

La Figura 16 expone que a partir de los 400 [m] de la línea de costa aproximadamente, la Batimetría Completa presenta diferencias importantes de profundidades alcanzando registros de hasta 27 [m] de variación respecto de la Batimetría Modificada. Estas diferencias se extienden hasta los 1200 [m] de distancia, pasado esto, presentan un comportamiento bastante similar entre ambas batimetrías. La diferencia existente en el tramo de los 400 a 1200 [m] se debe a la poca resolución que presentan los sondeos de las CN cuando existen aumentos repentinos de profundidad, asociados principalmente, a las condiciones que posee el terreno en estudio. Esto, sumado a la resolución impuesta para la confección de la Batimetría Modificada (menor resolución) radica en la cuantificación de las diferencias máximas mencionadas anteriormente.

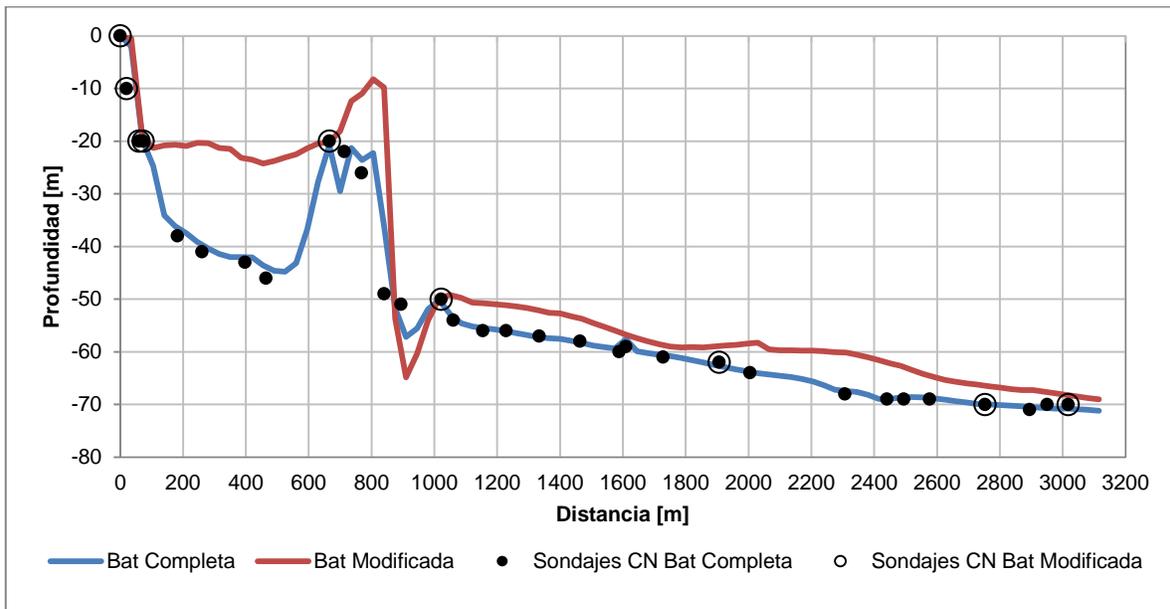
**Figura 16:** Comparación de profundidades sección transversal a). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 muestra una sección que posee una condición de abrigo al oleaje (molo de abrigo). En esta sección, se observan diferencias a contar de los 140 [m] de distancia a la línea de costa donde la Batimetría Completa alcanza mayores profundidades que la Batimetría Modificada. La comparación de perfiles muestra el patrón de similitud que poseen los datos de las CN y la Batimetría Completa, mientras que los sondeos que permitieron la construcción de la Batimetría Modificada, debido a la menor densidad de puntos, presenta una tendencia con menor profundidad en la mayoría de los tramos analizados.

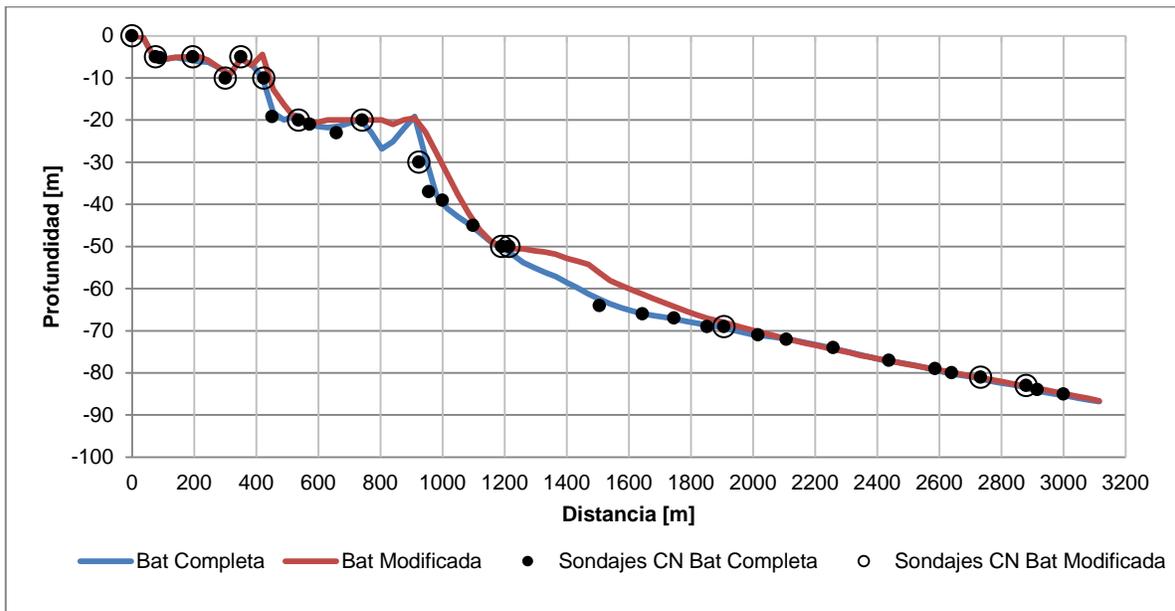
**Figura 17:** Comparación de profundidades sección transversal b). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la sección c) se presenta en la Figura 18. En ella, se aprecia una similitud en la tendencia de ambos perfiles, sin embargo, el perfil de la Batimetría Completa posee sectores que alcanzan mayores profundidades, diferenciándose a partir de los 400 [m] desde la línea de costa, con una discrepancia en profundidad que alcanza un máximo de 10 [m] a favor del perfil batimétrico completo. Los puntos de sondajes de las cartas náuticas (CN), debido a la representatividad existente, se asemeja de mejor forma a la Batimetría Completa, alcanzando una similitud con ambos perfiles batimétricos desde los 2000 [m] a la línea de costa.

**Figura 18:** Comparación de profundidades sección transversal c). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).



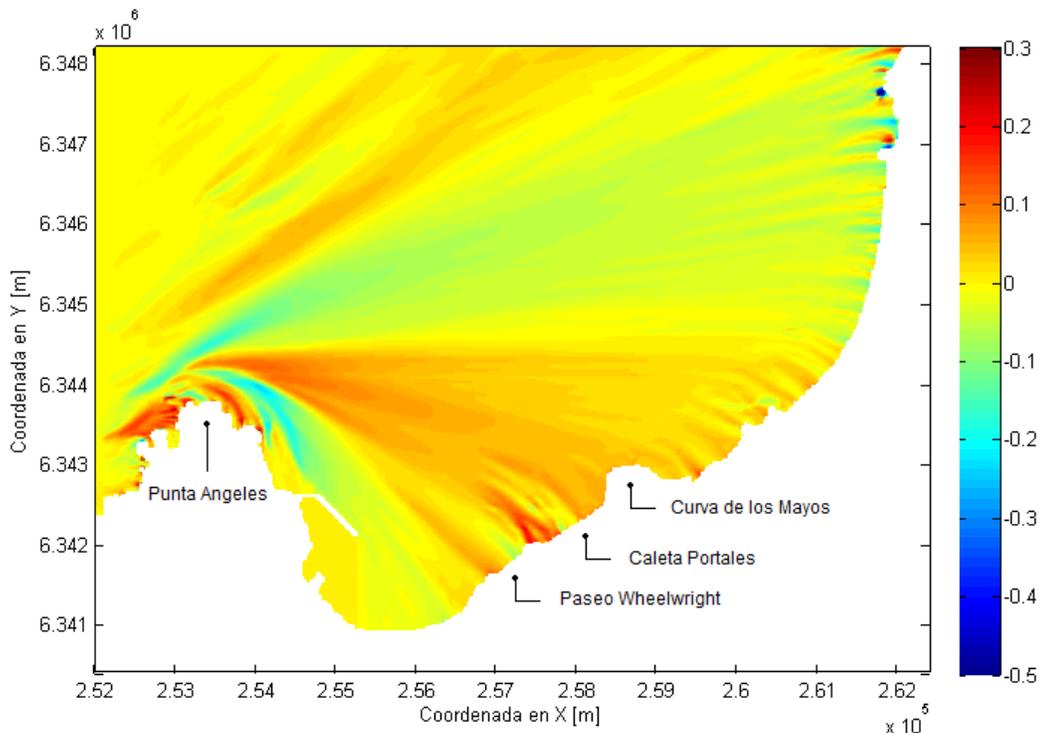
Fuente: Elaboración propia.

### 5.2.3 EFECTOS DE LA DENSIDAD BATIMÉTRICA EN LA PROPAGACIÓN DE OLEAJE

De la Figura 19 a la Figura 21, es posible observar los resultados en forma gráfica de las diferencias entre ambas batimetrías utilizadas, expresadas mediante campos de alturas para los distintos casos en estudio. La barra de color indica la diferencia que existe para la altura de ola (en [m]) entre ambas batimetrías construidas. Un signo negativo en la barra, indica que la batimetría realizada con una menor densidad de puntos por  $\text{km}^2$  (Batimetría Modificada) genera alturas de ola menores que la batimetría con mayor densidad de puntos por área (subestimación de la Batimetría Modificada), mientras que el signo positivo revela que las alturas generadas por la Batimetría Modificada son mayores que las alturas obtenidas de la Batimetría Completa (sobrestimación por parte de la Batimetría Modificada). Se modelaron tres casos correspondientes a la condición más frecuente y las últimas dos condiciones extremas detectadas en la estadística. Para más detalle de los casos modelados se recomienda ver la sección 5.3.3.

El caso presentado en la ilustración 19, corresponde al estado de mar más frecuente en la zona de estudio. De la imagen, se aprecia que la Batimetría Modificada produce focos de mayor altura de oleaje (sobrestimación) en las cercanías de Punta Ángeles y frente a Caleta Portales de aproximadamente 0.3 [m], mientras que en zonas aledañas al molo de abrigo produce una subestimación en altura de ola cercana a los -0.2 [m] en comparación a la Batimetría Completa.

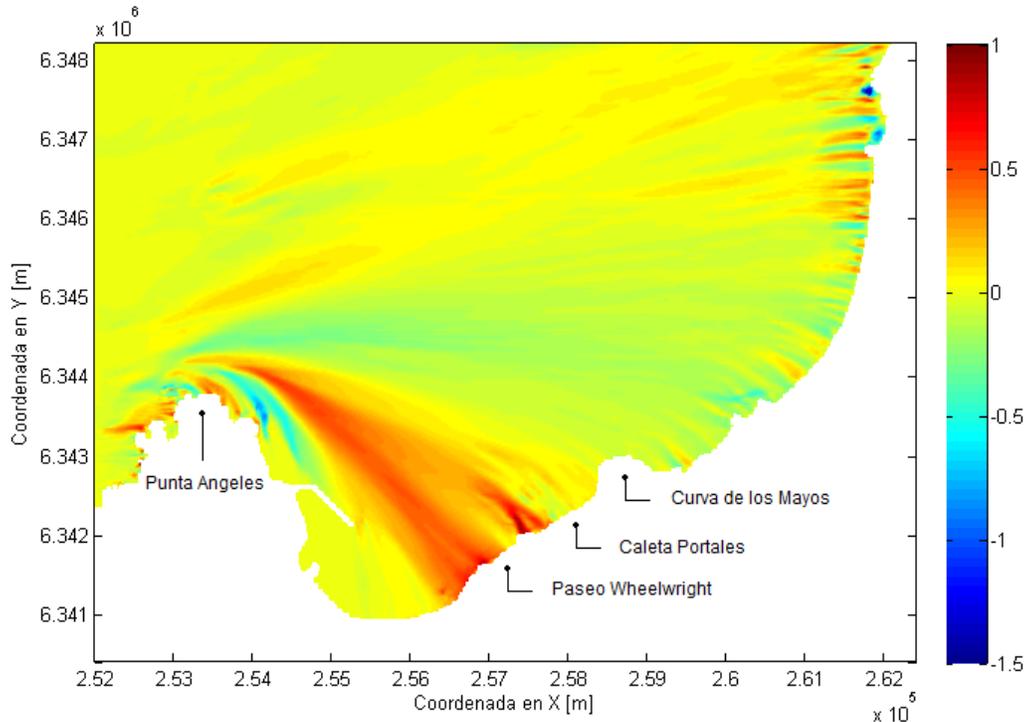
**Figura 19:** Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar  $H_s = 2.5$ ,  $T_p = 13$  [s] y dirección SW.



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las diferencias de alturas de ola para uno de los estados de mar extremos seleccionados. En la Figura 20 se observa, que la utilización de una batimetría con menor densidad de punto por área genera un incremento cercano a 1 [m] de altura significativa en zonas frente al paseo Wheelwright y Caleta Portales, y una disminución en ciertas zonas de la costa como Punta Ángeles y variados focos cercanos a playa las salinas (color azul).

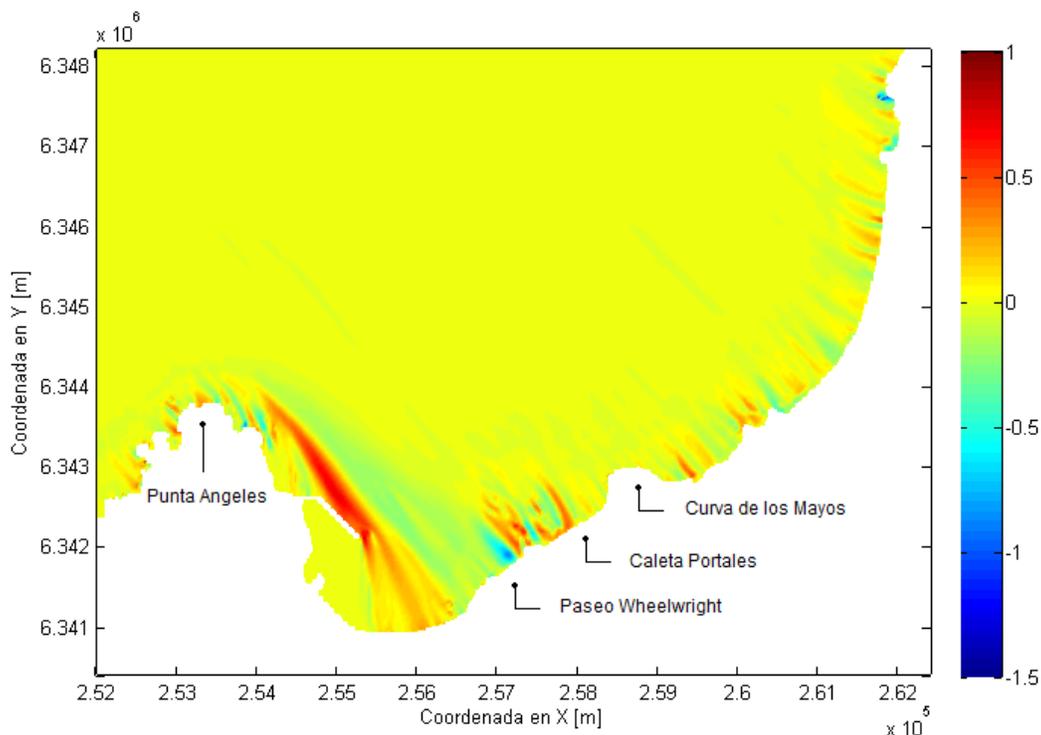
**Figura 20:** Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar  $H_s= 6.12$ ,  $T_p= 18$  [s] y dirección WSW.



Fuente: Elaboración propia.

Para el evento extremo proveniente de la dirección NNW (Figura 21), se presentan sectores que van desde Punta Ángeles hasta pasado el molo de abrigo con sobreestimaciones de hasta 1 [m] en la altura de ola por parte de la Batimetría Modificada, además de sectores frente a Caleta Portales y al costado de curva los Mayos (0.5 [m] aproximadamente); por otra parte, la subestimación de la altura de ola está presente frente al paseo Wheelwright con una diferencia cercana a los -0.5 [m].

**Figura 21:** Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar  $H_s= 6.13$ ,  $T_p= 12$  [s] y dirección NNW.

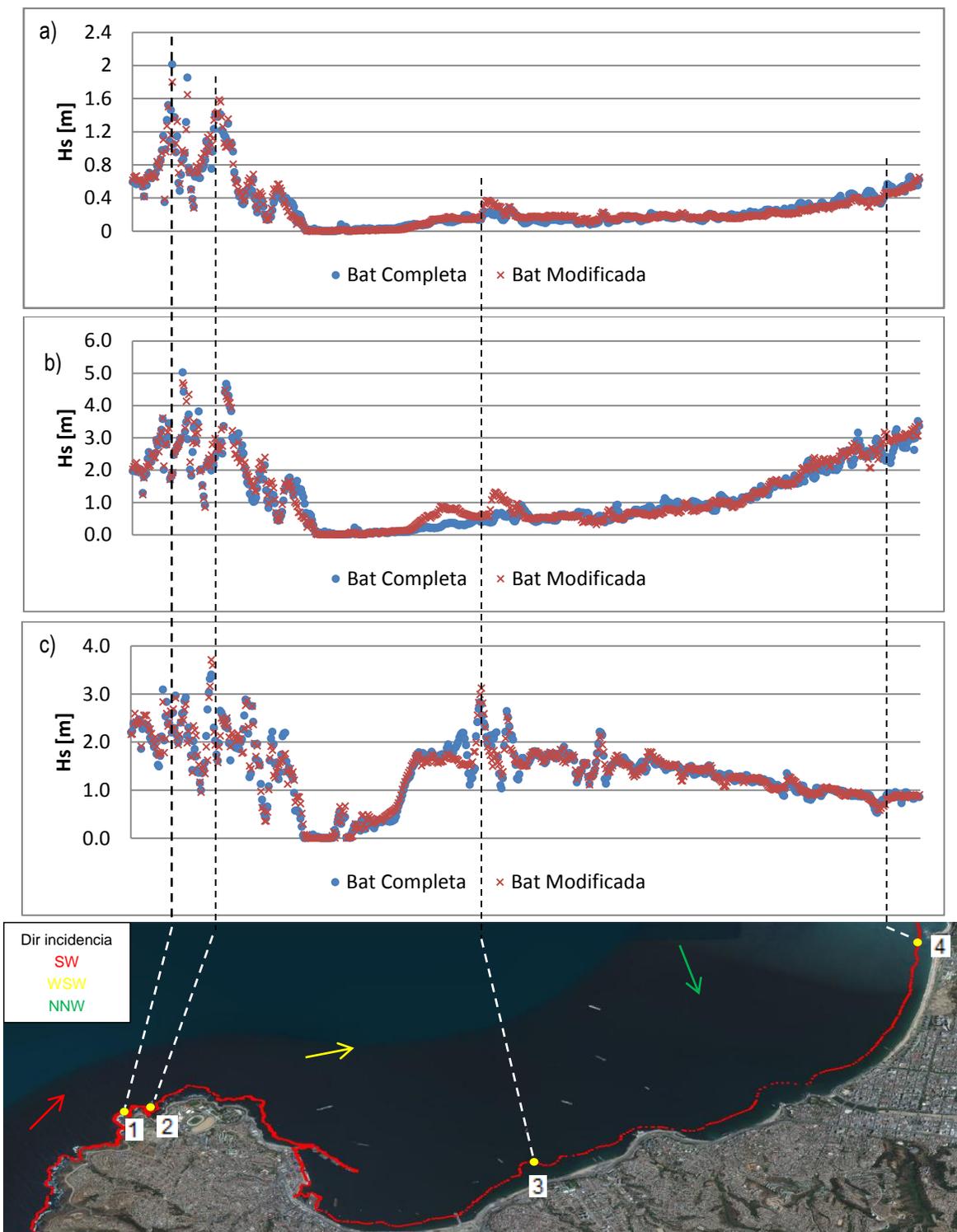


Fuente: Elaboración propia.

Además del análisis expresado anteriormente, para comprender las diferencias que existen en los resultados de las alturas de ola producto de la utilización de dos batimetrías con variada resolución, se elaboró un análisis gráfico de series que reflejan el comportamiento de las alturas de ola a lo largo de la costa, ejemplificadas para las profundidades de los veriles 10 y 20 [m], para los tres casos en estudio (SW, WSW y NNW). Parte de este análisis incluye diagramas de dispersión resultantes de la comparación de alturas para ambas batimetrías. Estos datos forman parte de la información expuesta en la sección 11, Anexo B.

En la Figura 22 y 23, se pueden apreciar tres series que comparan las alturas de ola obtenidas producto de una Batimetría Completa y una Batimetría Modificada para una profundidad de 10 y 20 [m] respectivamente. La primera serie a), corresponde al estado de mar más frecuente con dirección SW, la segunda serie b) y tercera serie c), representan estados de mar energéticos con direcciones WSW y NNW. Los sectores costeros relevantes en este análisis se indican con marcador amarillo en la ilustración del área de estudio. Es necesario acotar, que los tres casos en estudio se modelaron bajo diferentes parámetros de entrada (Altura, Periodo y Dirección), para más detalles de los parámetros utilizados se recomienda ver sección 5.3.3.1.

**Figura 22:** Series de altura de ola a lo largo de la costa para veril de los 10 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). En marcadores azules la Batimetría Completa, en rojo la Batimetría Modificada.



Fuente: Elaboración propia.

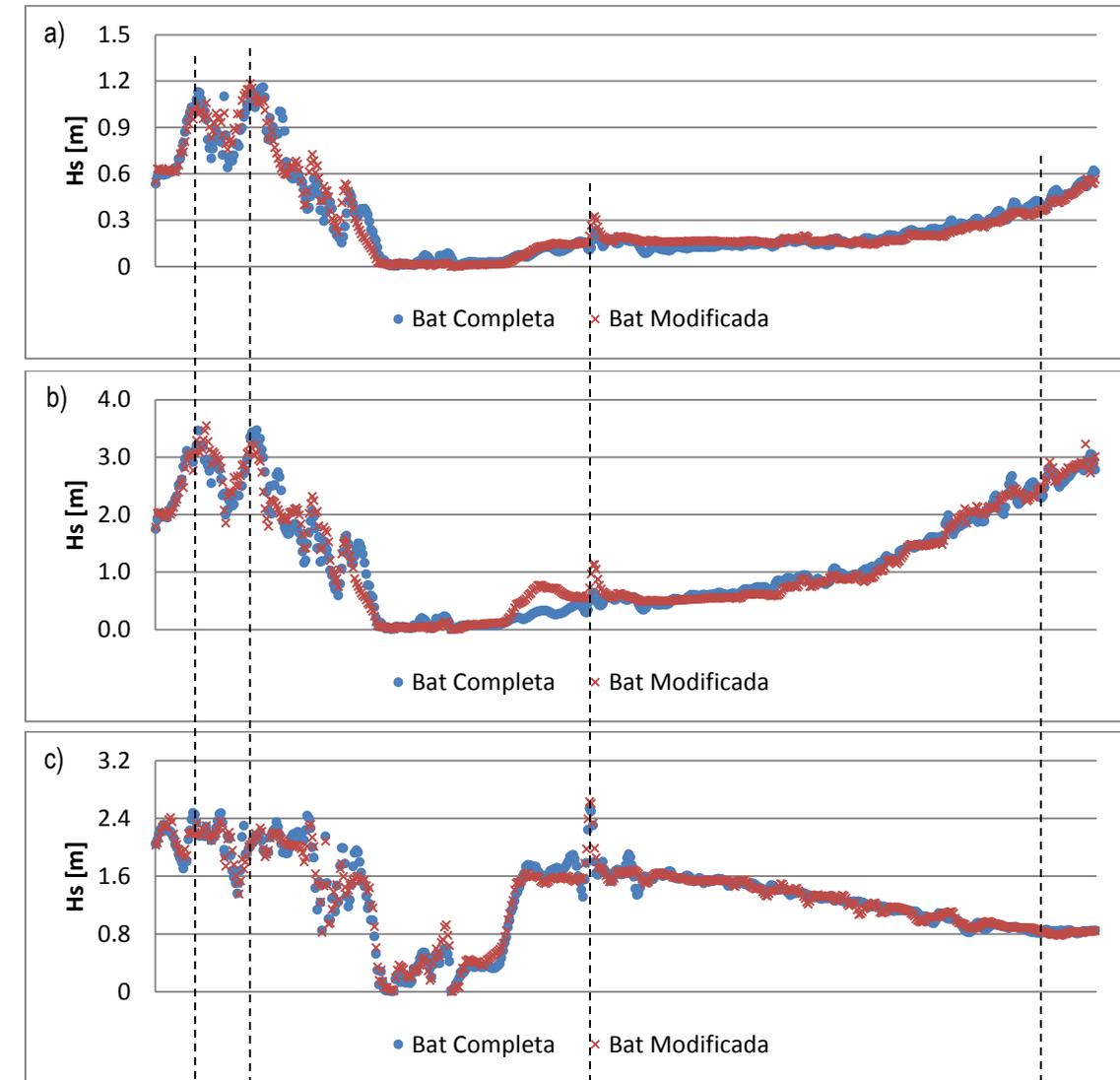
Del análisis mostrado en la Figura 22, es posible identificar cuatro sectores relevantes en el área de estudio, señalados con marcadores amarillos y denominados sectores 1, 2, 3 y 4. Se observa, que en la zona de Punta Ángeles se concentran los valores máximos de cada serie, esto, debido a la exposición que posee el sector (1 y 2) a las tres direcciones incidentes. Los registros mínimos se obtienen en zonas interiores al molo de abrigo, por lo que no se tomó en consideración como sector relevante debido al grado de protección que esta estructura brinda al oleaje.

En la Figura 22 además, se observa que la tendencia que poseen las alturas de ola para los tres casos en estudio difieren en el sector 3 (frente al paseo Wheelwright) y sector 4 (frente playa los Marineros). Un desglose de los gráficos realizados, presenta para la dirección SW (grafico a) un valor máximo de altura de ola de 2.0 [m] correspondiente a la Batimetría Completa, cerca de 0.2 [m] más que el máximo valor arrojado por la estadística de la Batimetría Modificada, por otra parte, en el sector 3, la tendencia de las alturas de ola de la Batimetría Modificada es mayor a la de la Batimetría Completa, con rangos máximos que van desde los 0.10 a 0.14 [m], todo lo contrario ocurre en el sector 4, donde las alturas máximas son producto de la Batimetría Completa con diferencias de hasta 0.18 [m] si se comparan con las alturas ola producto de una Batimetría Modificada.

Siguiendo el mismo análisis para el gráfico b) de la dirección WSW, se observa un valor máximo que alcanza los 5.0 [m] de altura para la Batimetría Completa, mientras que el mayor valor que alcanza la Batimetría Modificada es de 4.7 [m] (diferencia de 0.3 [m]). Se aprecia además, desigualdades notorias en los valores presentados en el sector 3, obteniéndose diferencias máximas entre ambas batimetrías de hasta 0.8 [m]. En el gráfico b), el sector 4 resulta ser un segundo foco donde se concentra las mayores alturas, después de los sectores 1 y 2, con valores que superan los 3.50 [m] de altura.

Finalmente, los resultados expuestos en el gráfico c), muestran que los valores máximos de altura de ola se encuentran en la zona de Punta Ángeles, pero, a diferencia de lo descrito en las series anteriores, la máxima altura de ola se obtiene del sector 2, alcanzando un registro de 3.71 [m] para la Batimetría Modificada, 0.31 [m] más que lo alcanzado por el registro de la Batimetría Completa para el mismo punto en estudio. El sector 3 por otra parte, es la zona donde se concentran la segunda cantidad de mayores alturas, destacando “*peak*” de 3.12 [m] de altura por parte de la Batimetría Modificada. Por último, el sector 4 presenta un decaimiento en la tendencia de alturas de ola, lo que se asume producto del grado de exposición en el que se encuentra la zona con respecto a la dirección incidente.

**Figura 23:** Series de altura de ola a lo largo de la costa para veril de los 20 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). En marcadores azules la Batimetría Completa, en rojo la Batimetría Modificada.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 23, se exponen las series de alturas de ola para una profundidad de 20 [m], donde es posible observar, al igual que lo presentado en la ilustración 22, cuatro sectores relevantes en el análisis conformados por; Punta Ángeles (sectores 1 y 2), Paseo Wheelwrigth (sector 3) y playa los Marineros (sector 4). El grafico a), presenta para la dirección SW, una concentración de alturas máximas en los sectores 1 y 2, alcanzando un *peak* de 1.18 [m] para la Batimetría Modificada, mientras que para la misma coordenada de análisis, la Batimetría Completa presenta una altura de ola de 1.10 [m] (diferencia de 0.08 [m]). Los datos de alturas mencionados anteriormente son obtenidos específicamente para el sector 2, ya que el análisis realizado al sector 1 confirma magnitudes menores en altura, destacando un máximo de 1.15 [m] producto de la Batimetría Completa y de 1.06 [m] para la Batimetría Modificada. El sector en estudio número 3, expone para el grafico a) tendencias similares entre ambas batimetrías, obteniéndose *peaks* por sobre los 0.3 [m] de altura por parte de la Batimetría Modificada. El sector 4 en contraste, presenta mayores alturas producto de las Batimetría Completa que de la Batimetría Modificada, con valores máximos de 0.62 [m] y 0.56 [m] respetivamente.

Un análisis realizado al grafico b), indica que la altura máxima se alcanza en el sector 1 con un valor de 3.54 [m] para la Batimetría Modificada, mientras que en el sector 2, la mayor altura se obtiene de la Batimetría Completa con un registro de 3.42 [m]. Por otra parte, el sector 3 presenta desigualdades entre las tendencias de ambas batimetrías alcanzando diferencias máximas de hasta 0.50 [m], con un *peak* estimado de 1.12 [m] para la Batimetría Modificada. En el gráfico de la dirección WSW desde el sector 3 al sector 4 se observa una tendencia progresiva de las alturas de ola en las dos batimetrías analizadas culminando frente a la playa los Marineros con alturas máximas de hasta 3.22 [m] para la Batimetría Modificada.

El último gráfico de la Figura 23 presenta para un mismo punto de análisis que, los máximos valores de la serie se acentúan en el sector 3 con alturas de 2.63 [m] para la Batimetría Modificada y de 2.53 [m] para la Batimetría Completa, además, se observa una discrepancia en la tendencia, donde las alturas que genera la Batimetría Completa destacan por sobre las obtenidas por la Batimetría Modificada, no así en cuanto a los valores máximos se refiere, debido a que los *peak* de altura se logran con una Batimetría Modificada como se argumentó en los valores expuestos anteriormente.

El sector 1 y 2 para el gráfico c) muestran un segundo foco de aturas de olas, destacando valores de 2.47 [m] para la Batimetría Completa y de 2.20 [m] para la Batimetría Modificada, obteniéndose una diferencia de 0.27 [m] entre ambos valores. El gráfico además, muestra desde el sector 3 hasta el sector 4 un comportamiento similar en la tendencia de alturas para ambas batimetrías analizadas que disminuyen su magnitud a medida que se aproximan al sector 4.

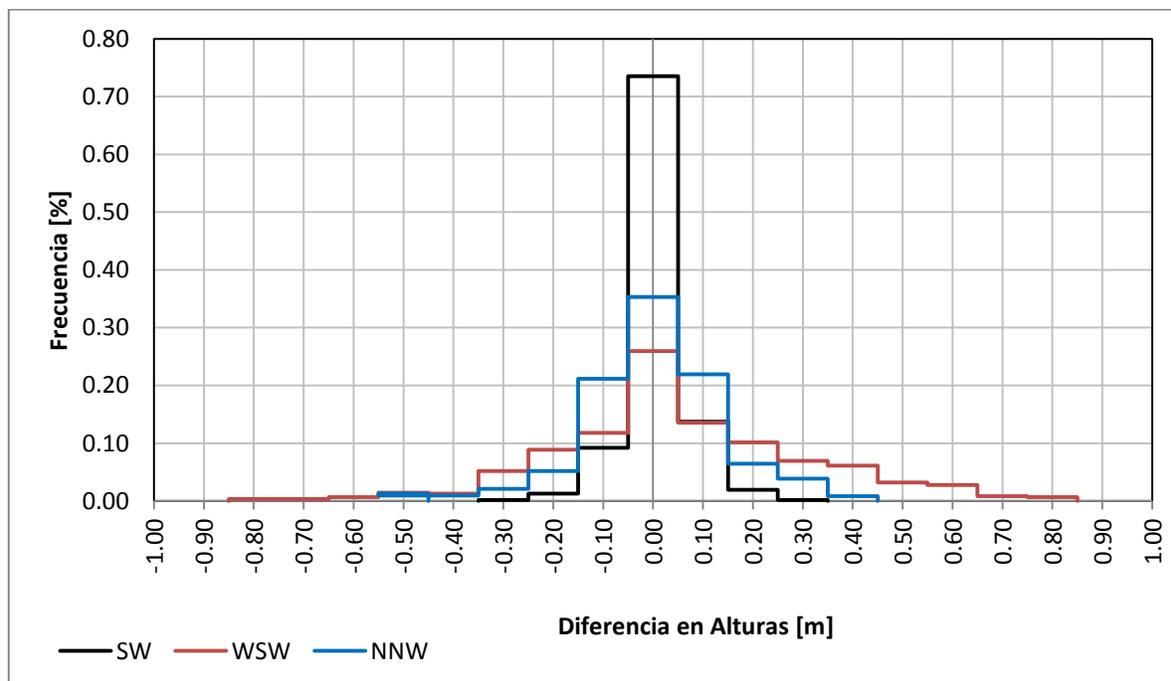
Las diferencias en alturas de ola a lo largo de la costa expuestas visualmente mediante la Figura 22 y 23 para los tres casos de estudio (direcciones de incidencia SW, WSW y NNW), es posible resumirlas numéricamente mediante gráficos de frecuencia.

Es así como en la Figura 24 y Figura 25 se muestran gráficos que comparan las tres direcciones en estudio para el veril de los 10 y 20 [m]. El eje horizontal representa intervalos numéricos obtenidos de la diferencia en [m], entre las alturas de ola de la

Batimetría Modificada respecto de las alturas de la Batimetría Completa. En cuanto al eje vertical, este eje representa la frecuencia porcentual que tienen estos intervalos (diferencia en alturas) dentro de la estadística del veril de 10 y 20 [m] para las tres direcciones analizadas. Un valor negativo en eje horizontal indica que las alturas de ola producto de la utilización de la Batimetría Modificada fueron menores que las alturas resultantes de la Batimetría Completa, es decir, una subestimación de la Batimetría Modificada. Análogamente un valor positivo da cuenta que los valores extraídos de la Batimetría Modificada son superiores que los obtenidos de la Batimetría Completa (Sobreestimación de alturas por parte de la Batimetría Modificada).

En la gráfica adjunta se observa que la diferencia con mayor frecuencia de ocurrencia es el rango desde los -0.05 a 0.05 [m] en altura de ola, con una frecuencia del 73% del total general en la estadística de la dirección SW, de un 25% para la estadística de la dirección WSW y un total del 35% en la dirección NNW. La subestimación y sobreestimación máxima entre las tres series se obtuvo en la dirección WSW, con una diferencia registrada en -0.75 [m] de subestimación y en 0.85 [m] de sobreestimación.

**Figura 24:** Comparación de distribución de frecuencias para las direcciones SW, WSW y NNW, veril 10 [m].



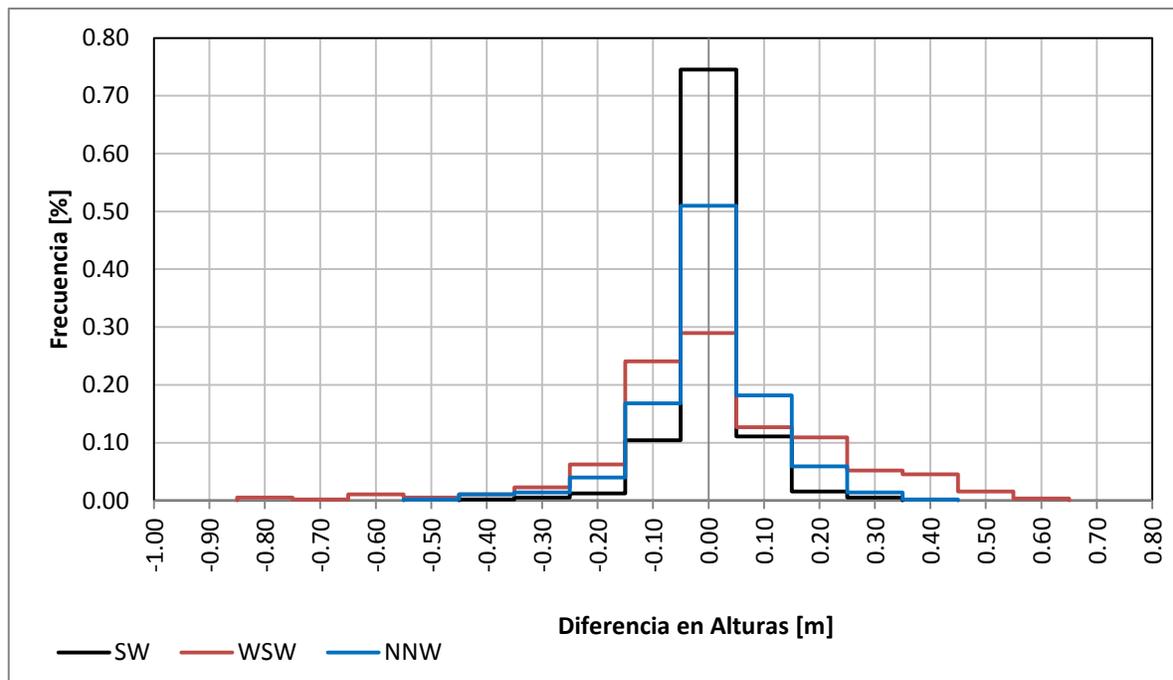
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior, es posible destacar además, la máxima sub y sobre estimación para la dirección SW y NNW. La dirección destacada en color negro (SW) presenta como máximas diferencias valores de -0.35 [m] y 0.35 [m], mientras que en la dirección NNW las diferencias aumentan destacando valores aproximados de -0.55 [m] en la subestimación máxima y de 0.45 [m] en la máxima sobreestimación.

Siguiendo el mismo análisis para la Figura 25, se destaca, que las diferencias de altura de ola se concentran en un rango de -0.05 a 0.05 [m] para la tres direcciones en análisis, predominando con una frecuencia de ocurrencia mayor la dirección SW con un 74% de su total general para ese intervalo. Las diferencias de altura en la dirección WSW, por otra parte, presentan valores de ocurrencia distribuidos de manera más uniforme, donde, del total general de sus datos, la máxima frecuencia es de 28% para el rango de diferencias entre -0.05 y 0.05 [m], seguido por un frecuencia de ocurrencia del 24% en rango de diferencias entre los -0.15 a -0.05 [m]. En cuanto a la dirección NNW, el máximo valor de frecuencia también se establece en intervalo de -0.05 a 0.05 [m] con un 51% del total general de sus datos.

La subestimación y sobreestimación máxima de las series, se obtuvo en la dirección WSW con una diferencia registrada en -0.85 [m] en la subestimación y en 0.65 [m] para la sobreestimación. En cuanto la máxima sub y sobre estimación para la dirección SW y NNW, se tiene que la dirección destacada en color negro presenta como máximas diferencias valores de -0.35 [m] y 0.35 [m], mientras que en la dirección NNW las diferencias aumentan destacando valores aproximados de -0.45 [m] en la subestimación máxima y de 0.65 [m] en la máxima sobreestimación.

**Figura 25:** Comparación de distribución de frecuencias para las direcciones SW, WSW y NNW, veril 20 [m].



Fuente: Elaboración propia.

Ante los análisis expuestos queda demostrado que existen diferencias en los resultados producto de la utilización de dos batimetrías con variada resolución, manifestándose las mayores diferencias en localidades específicas del borde costero, donde, su variación en magnitud dependerá justificadamente de la zona donde se enfoque el estudio.

## 5.3 CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE

### 5.3.1 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Con la finalidad de obtener casos representativos para la zona en estudio, junto con los parámetros de entradas al modelo numérico, se presentan los resultados del análisis de clima medio en aguas profundas, descrito a través de tablas de incidencia y rosas de oleaje para variables de altura, periodo y dirección.

De la concentración conjunta de alturas de ola y periodos *peak* expuesta en la Tabla 10, se observa, que las alturas de 2.0 a 2.5 [m] es el mayor rango de ocurrencia para una combinación de periodos entre los 13 a 14 [s] con un 8.21 % del total general, seguido por una ocurrencia simultanea del mismo rango de alturas (2.0 a 2.5 [m]) para periodos de 12 a 13 [s].

Las direcciones predominantes que se aprecian en la Figura 26 provienen en su mayoría del tercer cuadrante, prevaleciendo como incidencia la dirección SW. Las alturas significativas más recurrentes para esta dirección se encuentran en los intervalos de 2.0 a 2.5 [m] y de 1.5 a 2.0 [m]. La rosa de oleaje de la Figura 27, por otra parte, muestra que la mayor concentración de datos se encuentran entre los rangos de periodos desde los 12 a 15 [s] para la dirección SW.

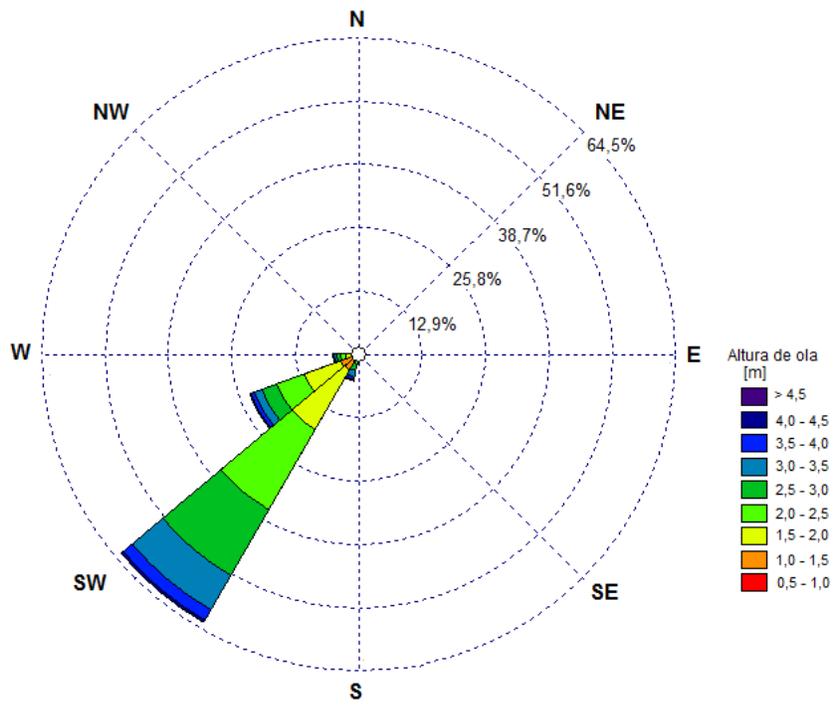
Análisis complementarios en tablas de indecencias de Altura vs Dirección y Periodo vs Dirección, junto a histogramas para las variables de altura, periodo y dirección, se presentan en el Anexo C, sección 12.1.

**Tabla 10:** Incidencia conjunta de Altura vs Periodo.

Altura Hs [m]	Periodo									% Ocurrencia
	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	16-17	17-18	
0.5-1	0.01	0.04	0.06	0.15	0.22	0.15	0.12	0.06	0.03	0.83
1-1.5	0.06	0.26	0.81	1.80	2.45	2.30	1.46	0.72	0.34	10.18
1.5-2	0.23	0.46	1.16	3.61	6.78	6.40	3.52	1.65	0.69	24.49
2-2.5	0.38	0.35	0.74	2.69	6.81	8.21	4.25	1.81	0.62	25.87
2.5-3	0.57	0.45	0.41	1.04	3.88	6.61	4.76	1.44	0.33	19.50
3-3.5	0.56	0.40	0.17	0.28	1.21	2.99	3.38	1.25	0.19	10.44
3.5-4	0.10	0.20	0.11	0.07	0.25	0.84	1.37	0.77	0.11	3.82
4-4.5	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.12	0.28	0.27	0.09	0.87
4.5-5		0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.08	0.08	0.02	0.23
5-5.5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.06
5.5-6		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
6-6.5		0.00	0.00	0.00		0.00			0.00	0.01
>6.5							0.00			0.00
<b>% Ocurrencia</b>	1.92	2.21	3.51	9.67	21.63	27.63	19.24	8.07	2.43	100%

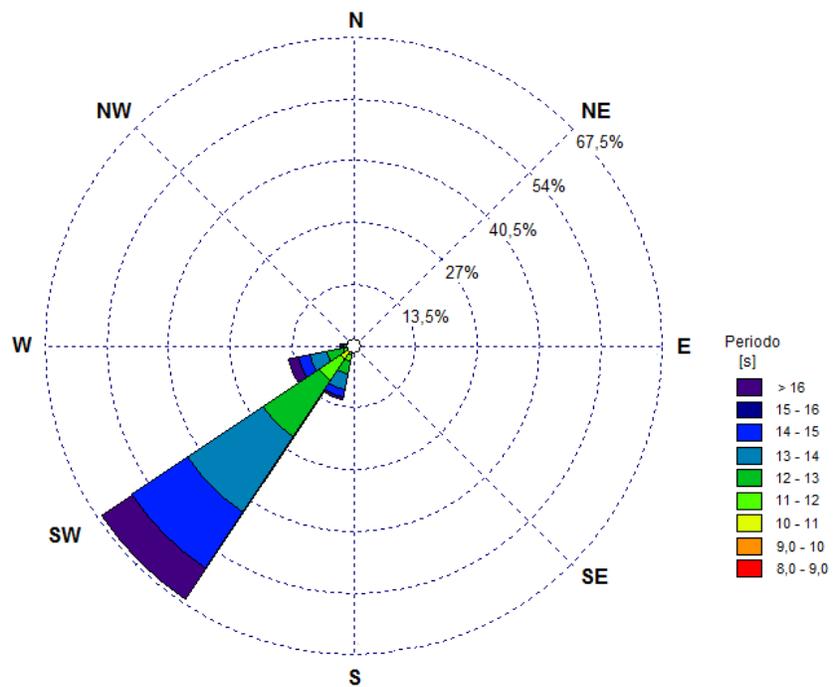
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 26:** Rosa de oleaje Dirección vs Altura.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 27:** Rosa de oleaje Dirección vs Periodo.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.2 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

En esta sección, se identificaron y caracterizaron los eventos extremos registrados en la estadística de aguas profundas utilizando la metodología expuesta por SHOA en su publicación N° 3201 (3ª edición 2005). Los eventos extremos de diseño obtenidos mediante este proceso se comparan con los resultados conseguidos de la metodología utilizada en el análisis “Clima Extremo de Oleaje en el Sitio de Interés” (sección 5.3.5).

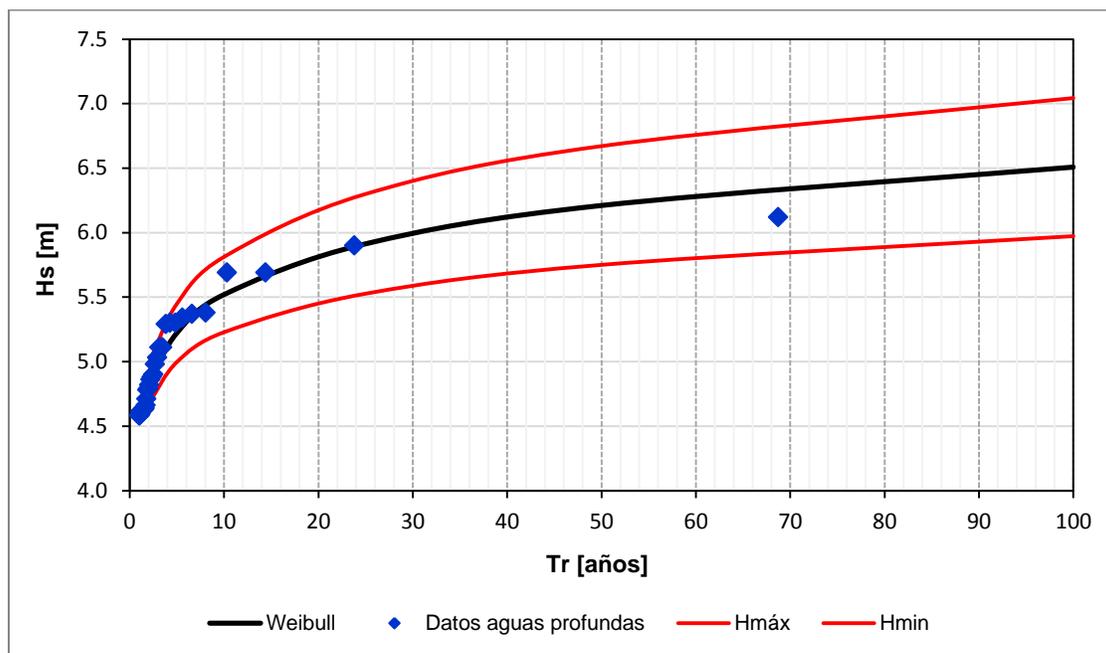
Se seleccionaron los datos extremos de acuerdo al criterio establecido por el método de “valores sobre el umbral”, discretizando los datos por direcciones de incidencia del oleaje, separándolas en dos cuadrantes (tercero y cuarto). El tercer cuadrante se consideró con direcciones incidentes desde los 180° a los 269°, mientras que para el cuarto cuadrante se tomaron en cuenta las direcciones desde los 270° a los 359°. En el caso cuya tormenta arrojó eventos incidentes desde ambos cuadrantes se consideró sólo el dato de mayor magnitud. La lista de eventos extremos seleccionados en aguas profundas para el cuarto cuadrante se muestra en la Tabla 42, sección 12.2 del Anexo C, mientras que la lista de los eventos extremos utilizados para el tercer cuadrante se puede observar en la Tabla 43 del mismo Anexo.

Se utilizó la función de distribución de probabilidades que presentó el mejor ajuste (Weibull, con probabilidad de ploteo Goda). Para el ajuste de la función, se realizó una linealización utilizando para ello el método de ajuste gráfico. El criterio de selección del ajuste fue el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) cuyo valor fue de 0.96 para la dirección del tercer cuadrante (con  $k = 1$ ) y de  $R^2=0.95$  para el cuarto cuadrante (con  $k = 1.4$ ).

La Figura 28 presenta la distribución proyectada de las alturas de ola extremas en función de los periodos de retorno teóricos calculados para el tercer cuadrante, junto a los límites mínimos máximos estimados. La Tabla 11, por otra parte, entrega las estimaciones de altura de ola significativa para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, y 100 años, incluyendo el límite mínimo y máximo de acuerdo al 95% de la banda de confianza.

Análogamente la Figura 29 muestra la distribución proyectada de las alturas de ola extremas en función de los periodos de retorno para el cuarto cuadrante, mientras que en la Tabla 12 se observan los resultados de las alturas ola extremas para los periodos de retorno en estudio.

**Figura 28:** Oleaje extremo en aguas profundas, tercer cuadrante, Weibull ( $k = 1.0$ ).



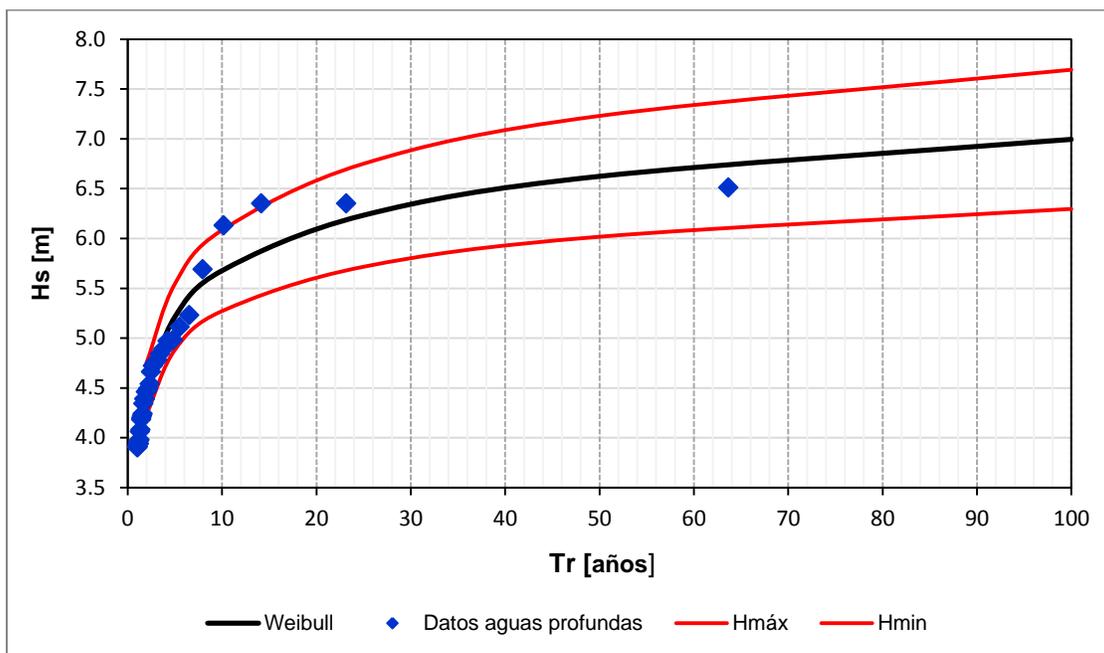
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11:** Oleaje extremo en aguas profundas, Valparaíso, tercer cuadrante.

Tr [años]	Hs [m]	Hs min [m]	Hs máx [m]
2	4.83	4.67	4.99
5	5.22	5.00	5.45
10	5.52	5.23	5.81
25	5.91	5.53	6.30
50	6.21	5.75	6.67
100	6.51	5.97	7.04

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 29:** Oleaje extremo en aguas profundas, cuarto cuadrante, Weibull ( $k = 1.4$ ).



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 12:** Oleaje extremo en aguas profundas, Valparaíso, cuarto cuadrante.

Tr [años]	Hs [m]	Hs min [m]	Hs máx [m]
2	4.49	4.23	4.75
5	5.21	4.88	5.54
10	5.68	5.27	6.08
25	6.23	5.72	6.75
50	6.62	6.02	7.23
100	7.00	6.30	7.69

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos en esta sección, las alturas utilizadas para caracterizar el fenómeno mediante esta metodología son aquellos valores incidentes desde el cuarto cuadrante equivalente a los periodos de retorno de 25 y 50 años. A estas alturas de ola, se les asignaron las direcciones más incidentes dentro del cuadrante (NW y NNW), con periodos característicos entre los 10 a 14 segundos.

### 5.3.3 TRANSFERENCIA DE OLEAJE

Este análisis presenta los resultados de la transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, utilizando para ello el modelo numérico SWAN junto a las mallas batimétricas generadas en la sección 5.2 (Batimetría Completa y Batimetría Modificada).

#### 5.3.3.1 TRANSFERENCIA PARÁMETROS ANÁLISIS BATIMÉTRICO

Para la realización del análisis batimétrico mostrado en la sección 5.2, se consideró la propagación de un total de tres estados de mar. El primero corresponde a la combinación de incidencia con mayor frecuencia según el análisis realizado a la estadística en aguas profundas, mientras que los otros dos casos representan aquellos parámetros de oleaje con mayor intensidad reciente de la estadística, permitiendo abarcar en el estudio no sólo el caso más frecuente, sino además, los que generan condiciones extremas. Los estados de mar que se seleccionaron comprende la dirección SW con periodo de 13 [s] y altura de 2.5 [m] para el caso más frecuente de ocurrencia, mientras que para la representación de condiciones extremas se tienen direcciones, WSW y NNW, para periodos de 18 y 12 [s] con alturas de 6.12 y 6.13 [m]. Estos eventos extremos son los ocurridos en la fecha del 3 de julio del año 2013 y 8 de agosto del año 2015 respectivamente. Los parámetros antes mencionados se pueden apreciar en la Tabla 13 y su propagación permitió el conocimiento de los campos de altura y profundidad para todo el dominio definido en la zona de estudio.

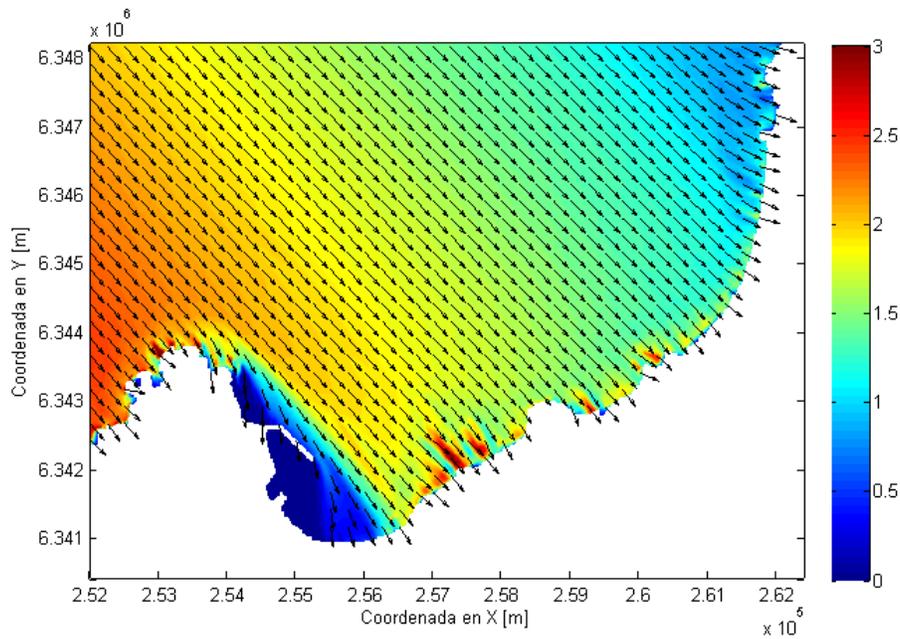
**Tabla 13:** Parámetros propagados en el análisis batimétrico.

Clasificación	Hm0 [m]	T [s]	Dirección
Reinante	2.50	13	SW
Dominante	6.12	18	WSW
Dominante	6.13	12	NNW

Fuente: Elaboración propia.

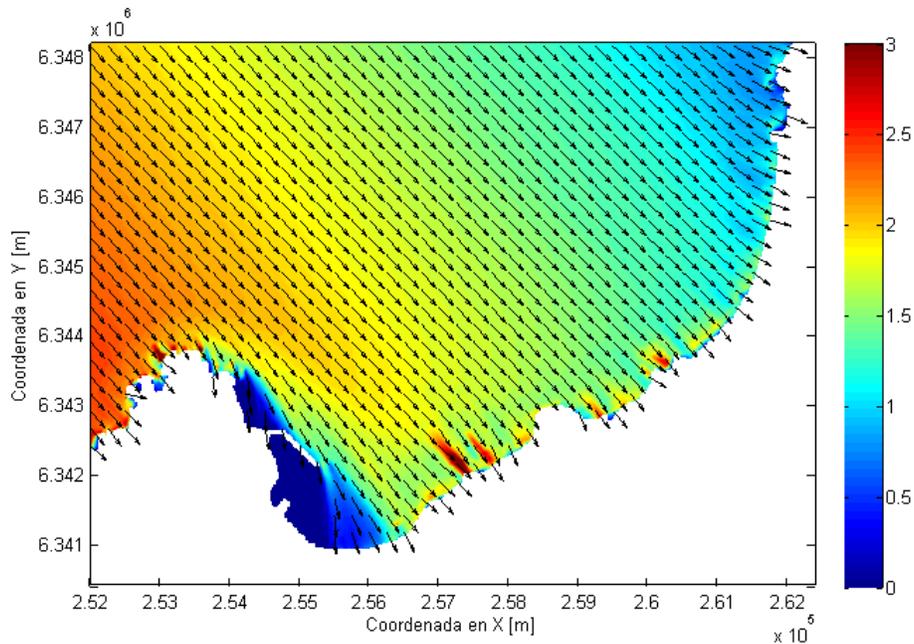
Cabe destacar que los parámetros expuestos en la Tabla 13 se propagaron utilizando la Batimetría Completa y Batimetría Modificada. A continuación (Figura 30 y Figura 31), a modo de ejemplo, se presenta la simulación de la transferencia de oleaje para la Batimetría Completa y Modificada, considerando los parámetros en aguas profundas de  $H_{m0}= 6.13$  [m];  $T= 12$  [s] y de dirección incidente NNW.

**Figura 30:** Transferencia de oleaje para la Batimetría Completa, Bahía de Valparaíso. La barra de color indica la altura de ola significativa en [m], para el estado de mar  $H_{m0} = 6.13$  [m],  $T = 12$  [s], Dirección NNW.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 31:** Transferencia de oleaje para la Batimetría Modificada, Bahía de Valparaíso. La barra de color indica la altura de ola significativa en [m], para el estado de mar  $H_{m0} = 6.13$  [m],  $T = 12$  [s], Dirección NNW.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.3.2 TRANSFERENCIA PARÁMETROS CUARTO CUADRANTE

Con el propósito de obtener parámetros representativos en el diseño, este análisis, presenta los resultados de las transferencias de oleaje estimadas para el cuarto cuadrante.

Se seleccionaron las alturas de ola de diseño asociadas a los periodos de retorno de 25 y 50 años (alturas expuestas en el análisis extremo de oleaje en aguas profundas), caracterizando estos parámetros con los periodos y las direcciones más frecuentes registradas en el cuadrante analizado.

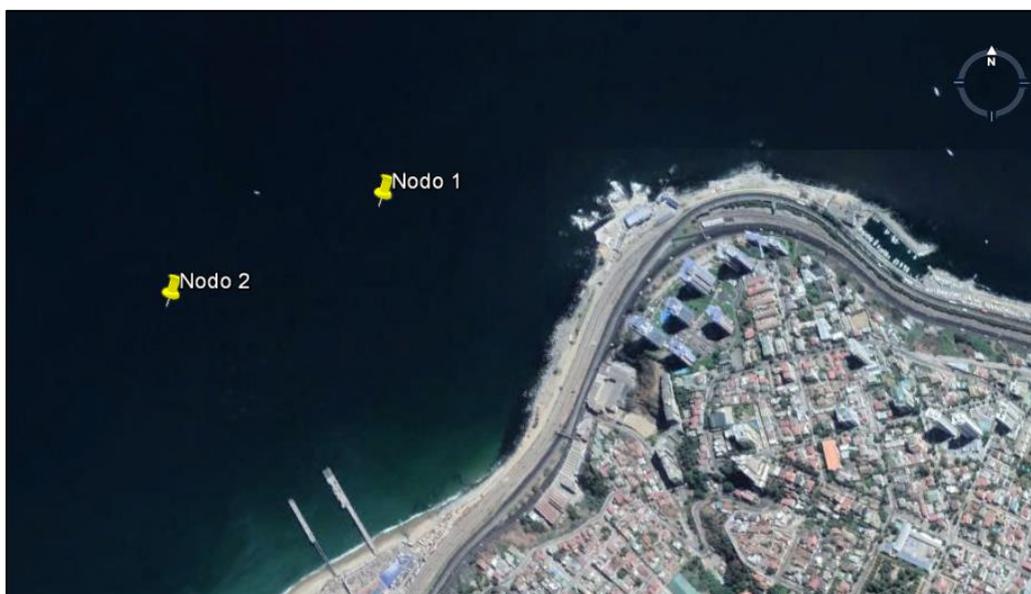
Utilizando las mallas batimétricas Completa y Modificada, se realizó la propagación de los parámetros seleccionados hasta dos nodos de control a una profundidad de 20 [m], ubicados específicamente en las coordenadas expresadas en la Tabla 14 y Figura 32. Lugar de la costa donde se plantea la aplicación de un caso práctico (sector paseo Juan de Saavedra).

**Tabla 14:** Coordenadas Nodo bahía de Valparaíso.

Descripción	Coord Este [m]	Coord Norte [m]
Nodo de Control 1	258100	6342875
Nodo de Control 2	257750	6342700

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 32:** Ubicación Nodos de Control en aguas someras, Bahía de Valparaíso, frente al paseo Juan de Saavedra.



Fuente: Elaboración propia a partir de **Google Earth**.

Se realizaron 80 transferencias de oleaje (considerando ambas batimetrías) provenientes desde el cuarto cuadrante para el Nodo de Control 1 y 2. Los resultados obtenidos de este proceso se detallan a continuación.

### **Transferencia de parámetros cuarto cuadrante Nodo de Control 1**

En la Tabla 15, se observan los parámetros propagados desde aguas profundas hasta el Nodo de Control 1, junto con los valores de altura obtenidos para una Batimetría Completa y una Batimetría Modificada.

**Tabla 15:** Resultados propagación parámetros cuarto cuadrante, Nodo de Control 1.

Aguas profundas					Batimetría Completa			Batimetría Modificada					
Tr [años]	H'0 [m]	Cuadrante	Dirección	T [s]	H s [m]	T [s]	Dirección	H s [m]	T [s]	Dirección			
25	6.23	IV	NW	10	3.49	10	312.84	3.56	10	311.9			
				11	<b>5.41</b>	11	312.81	<b>5.52</b>	11	311.9			
				12	5.06	12	312.34	5.17	12	311.3			
				13	4.61	13	311.8	4.73	13	310.5			
				14	4.46	14	311.5	4.58	14	310.1			
			NNW	10	1.04	10	308.1	1.04	10	307.0			
				11	1.62	11	308.1	1.62	11	306.9			
				12	1.52	12	307.8	1.52	12	306.5			
				13	1.40	13	307.6	1.39	13	306.0			
				14	1.36	14	307.4	1.34	14	305.8			
			50	6.62	IV	NW	10	3.71	10	312.8	3.78	10	311.9
							11	<b>5.75</b>	11	312.8	<b>5.87</b>	11	311.9
							12	5.37	12	312.3	5.49	12	311.3
							13	4.90	13	311.8	5.02	13	310.5
14	4.74	14					311.5	4.87	14	310.1			
NNW	10	1.11				10	308.1	1.11	10	307.0			
	11	1.72				11	308.1	1.72	11	306.9			
	12	1.62				12	307.8	1.61	12	306.5			
	13	1.49				13	307.6	1.47	13	306.0			
	14	1.45				14	307.4	1.43	14	305.8			

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 15, se puede apreciar que al propagar los parámetros de aguas profundas con una dirección NW, las alturas obtenidas en el Nodo 1 con la Batimetría Modificada son mayores que las obtenidas con la Batimetría Completa, alcanzando una diferencia máxima de hasta 0.12 [m]. Por otra parte, al propagar los parámetros con dirección NNW, los resultados obtenidos en el nodo de control no confirman tales diferencias, debido a que existe una leve desigualdad a favor de las alturas obtenidas utilizando la Batimetría Completa, respecto de las estimadas utilizando en la simulación la Batimetría Modificada.

Las mayores alturas obtenidas en el Nodo 1, corresponden a 5.75 [m] para la Batimetría Completa y 5.87 [m] para la Batimetría Modificada, propagadas desde aguas profundas con parámetros de 6.62 [m] de altura, dirección NW y periodo de 11 [s].

### **Transferencia parámetros cuarto cuadrante Nodo de Control 2**

Análogamente, en la Tabla 16, se presentan los parámetros utilizados en la simulación desde aguas profundas hasta el Nodo de Control 2 con los resultados de alturas de ola obtenidos para la Batimetría Completa y la Batimetría Modificada.

**Tabla 16:** Resultados propagación parámetros cuarto cuadrante, Nodo de control 2.

Aguas profundas					Batimetría Completa			Batimetría Modificada					
Tr [años]	H'0 [m]	Cuadrante	Dirección	T [s]	H s [m]	T [s]	Dirección	H s [m]	T [s]	Dirección			
25	6.23	IV	NW	10	3.17	10	307.11	3.39	10	307.4			
				11	<b>4.92</b>	11	307.05	<b>5.25</b>	11	307.3			
				12	4.61	12	306.26	4.91	12	306.5			
				13	4.22	13	305.3	4.48	13	305.4			
				14	4.08	14	304.8	4.34	14	304.9			
			NNW	10	1.01	10	303.2	1.00	10	303.1			
				11	1.57	11	303.2	1.55	11	303.0			
				12	1.47	12	302.5	1.44	12	302.4			
				13	1.33	13	301.8	1.29	13	301.6			
				14	1.29	14	301.4	1.23	14	301.2			
			50	6.62	IV	NW	10	3.37	10	307.1	3.60	10	307.4
							11	<b>5.23</b>	11	307.1	<b>5.58</b>	11	307.3
							12	4.90	12	306.3	5.22	12	306.5
							13	4.48	13	305.3	4.76	13	305.4
14	4.34	14					304.8	4.61	14	304.9			
NNW	10	1.07				10	303.2	1.07	10	303.1			
	11	1.67				11	303.2	1.65	11	303.0			
	12	1.56				12	302.5	1.53	12	302.4			
	13	1.42				13	301.8	1.37	13	301.6			
	14	1.37				14	301.4	1.31	14	301.2			

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 16, se desprende que las alturas de ola en el Nodo de Control 2 son mayores cuando la dirección con la que se propagaron los parámetros corresponde a la dirección NW, en desmedro de la dirección NNW, por otra parte, al analizar los resultados obtenidos en este nodo de control, se comprende que las alturas son mayores cuando se utiliza la Batimetría Modificada con dirección de propagación NW que al simular las alturas con la Batimetría Completa. Lo contrario a lo mencionado anteriormente ocurre cuando los parámetros son propagados con una dirección NNW, ya que las alturas

resultantes son superiores utilizando la Batimetría Completa que las obtenidas en una simulación con la Batimetría Modificada. En esta tabla se aprecia además, que las alturas máximas obtenidas en el Nodo 2 corresponden a 5.23 [m] para la Batimetría Completa y de 5.58 [m] para la Batimetría Modificada, arrojando una diferencia de 0.35 [m] entre ambos valores.

### 5.3.3.3 TRANSFERENCIA DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS

Para transferir toda la estadística desde aguas profundas hasta el sitio de interés, se realizó una propagación de alturas unitarias hasta los Nodos de Control 1 y 2. De esta transferencia se obtuvieron los coeficientes de agitación considerando para ello, periodos de 6 a 24 [s] (representan el 99,88% de la muestra) y nueve direcciones activas (S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW y N). Se propagaron alturas unitarias para todas las combinaciones de periodo-dirección.

Una vez obtenidos los coeficientes de agitación, se utilizó la formulación expuesta en la Ecuación 23 para la obtención del oleaje en el sector de estudio.

Para entender el comportamiento del oleaje, resultante producto de la utilización de batimetrías con variada resolución, es que se analizan los coeficientes de agitación (Tabla 17 y 18) de tal manera que reflejan las diferencias de las matrices de transformación entre la Batimetría Modificada y Batimetría Completa para los dos Nodos de Control.

Estos resultados además, son posibles visualizarlos de manera comparativa en un gráfico de frecuencias (Figura 33) que describe el comportamiento de la serie en término de sus diferencias en coeficientes de altura versus la frecuencia de ocurrencia que poseen estos intervalos dentro de la estadística.

En la Tabla 17, se observa que las diferencias más significativas para el Nodo 1 se obtienen en las direcciones WSW y W. En esta última dirección (W), se distingue el máximo valor correspondiente a una diferencia de 0.052 [m] para el periodo de 11 [s]. Esto quiere decir, que en esta dirección (de valores positivos), los coeficientes resultantes de la Batimetría Modificada son mayores a los obtenidos de la Batimetría Completa. En la dirección NNW, por otra parte, se observa, que desde el rango de periodos entre los 12 a 17 [s] los resultados son valores negativos, lo que indica una mínima diferencia a favor de los datos de la Batimetría Completa.

En líneas generales, se desprende que en el Nodo de Control 1, los valores de los coeficientes de agitación obtenidos de la utilización de la Batimetría Modificada son mayores que los coeficientes de agitación de la Batimetría Completa, detallando que la resolución impuesta en la construcción de la Batimetría Modificada sobreestima los coeficientes de transformación de oleaje en siete de las nueve direcciones activas para el rango de periodos entre los 6 a 22 [s] (según corresponda cada caso). Estas pequeñas diferencias en los resultados de una y otra batimetría, permite inferir, que en el Nodo de Control 1, el mayor oleaje se obtendrá producto de la utilización de la Batimetría Modificada en la propagación hacia el sitio de interés.

**Tabla 17:** Matriz de las diferencias de coeficientes de altura para el Nodo de Control 1.

Tp / Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
6					0.000	0.000		0.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.001	0.000	-0.011
8	0.000	0.001	0.002	0.002	0.011	0.006	0.003	0.000	
9	0.001	0.002	0.004	0.005	0.021	0.011	0.007	0.000	
10	0.001	0.003	0.007	0.010	0.034	0.018	0.011	0.000	
11	0.002	0.005	0.011	0.016	0.052	0.028	0.018	0.000	
12	0.003	0.006	0.015	0.031	0.040	0.025	0.018	-0.001	
13	0.004	0.009	0.023	0.035	0.021	0.023	0.019	-0.002	
14	0.005	0.009	0.024	0.020	0.009	0.023	0.020	-0.004	
15	0.004	0.009	0.021	0.007	0.002	0.024	0.020	-0.004	
16	0.004	0.007	0.017	0.011	0.000	0.023	0.019	-0.005	
17	0.003	0.006	0.014	0.009	0.002	0.020	0.016	-0.004	
18		0.005	0.013	0.011	0.004	0.017	0.014		
19		0.005	0.012	0.011	0.005				
20		0.005	0.011	0.010	0.004				
21		0.004	0.010	0.009	0.004				
22		0.004	0.010	0.009	0.003				
23		0.010	0.009	0.008					

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 18 se presenta la matriz con las diferencias entre los coeficientes de la Batimetría Modificada y la Batimetría Completa para el Nodo de Control 2. En este nodo, las diferencias significativas máximas se obtienen en las direcciones W y WNW para los periodos 11 y 12 [s] destacando un valor máximo de 0.094 [m] (dirección WNW). Del total de datos expuestos en la Tabla 18, se desprende que el 91% de los casos corresponden a valores positivos, datos que demuestran que los coeficientes resultantes de la Batimetría Modificada son mayores a los de la Batimetría Completa y solo en un 9% de los casos los coeficientes de la Batimetría Completa superan a los de la Batimetría Modificada. Este porcentaje se obtiene específicamente en las direcciones NNW y N. Para el caso de la dirección NNW predominan los valores negativos entre los periodos 9 a 17 [s], mientras que en la dirección N el valor negativo se obtiene en un periodo de 7 [s].

Las diferencias en coeficientes expuestos en la Tabla 18 dan cuenta que la Batimetría Modificada afecta la transformación del oleaje, de tal manera, que su utilización permite la obtención de mayores alturas de ola en el Nodo de Control 2 (en comparación a la utilización de la Batimetría Completa en este proceso).

El detalle de las matrices de agitación para cada nodo, utilizadas en la obtención de las diferencias en los coeficientes expuestos, se presenta en el Anexo C, sección 12.3.

**Tabla 18:** Matriz de las diferencias de coeficientes de altura para el Nodo de Control 2.

Tp / Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
6			0.000	0.000		0.000	0.000		0.000
7	0.000	0.000	0.001	0.001	0.005	0.005	0.003	0.000	-0.011
8	0.000	0.001	0.003	0.004	0.017	0.020	0.011	0.000	
9	0.001	0.002	0.006	0.009	0.033	0.037	0.020	-0.001	
10	0.002	0.004	0.011	0.017	0.055	0.061	0.034	-0.001	
11	0.003	0.006	0.017	0.027	0.085	0.094	0.053	-0.002	
12	0.004	0.008	0.022	0.044	0.076	0.079	0.048	-0.004	
13	0.005	0.011	0.030	0.054	0.056	0.061	0.042	-0.007	
14	0.006	0.012	0.032	0.039	0.040	0.052	0.041	-0.009	
15	0.006	0.012	0.030	0.027	0.029	0.047	0.041	-0.009	
16	0.005	0.010	0.025	0.029	0.022	0.042	0.038	-0.008	
17	0.004	0.008	0.021	0.025	0.022	0.038	0.034	-0.007	
18		0.007	0.019	0.024	0.022	0.035	0.029		
19		0.007	0.017	0.023	0.022				
20		0.006	0.016	0.021	0.020				
21		0.006	0.015	0.020	0.018				
22		0.005	0.014	0.018	0.016				
23		0.010	0.013	0.017					

Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de las diferencias en los coeficientes de altura que presentan los Nodos de Control 1 y 2 se muestran en la Figura 33 mediante un gráfico de frecuencias. El eje horizontal del presente grafico indica los intervalos numéricos obtenidos de la diferencia entre los coeficientes de agitación resultantes de la Batimetría Modificada respecto de los coeficientes de la Batimetría Completa. El eje vertical por su parte, representa la frecuencia porcentual que tiene los intervalos mencionados dentro de la estadística de los coeficientes de agitación obtenidos.

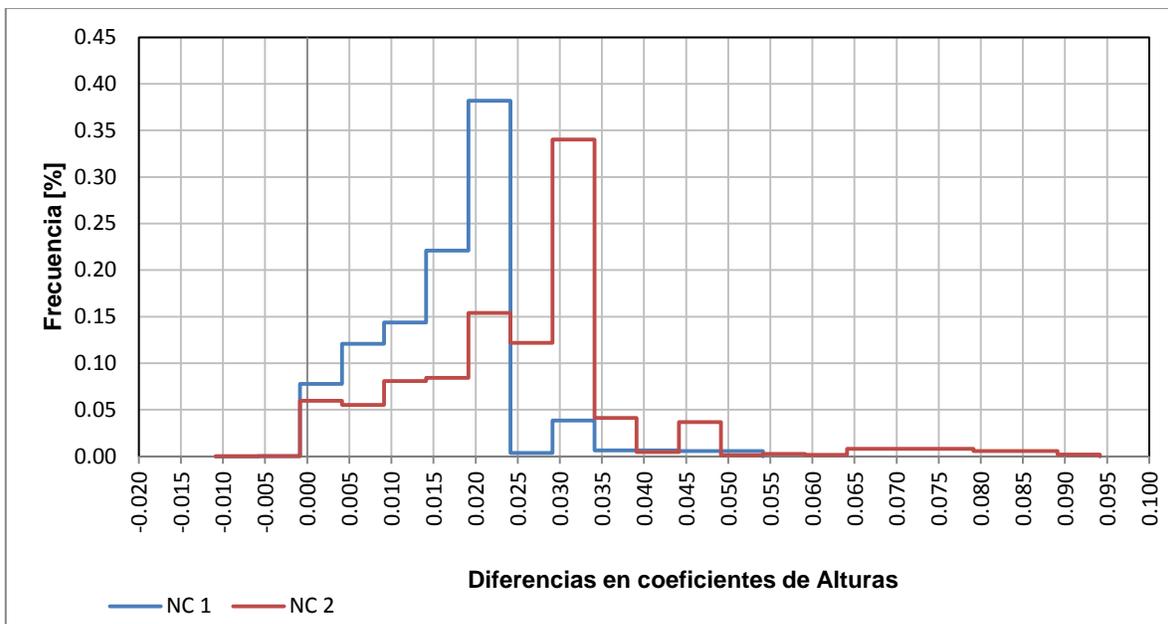
De la Figura 33 se observa, que la cantidad de intervalos positivos en el eje horizontal es significativamente mayor a la de valores negativos, lo que da cuenta que el valor de los coeficientes de agitación extraídos de la Batimetría Modificada son mayores que los obtenidos de la Batimetría Completa, es decir, una sobreestimación de la Batimetría Modificada a través de sus coeficientes de agitación. En líneas generales los resultados de estos coeficientes presentan un comportamiento similar en los dos nodos de control, pero, con un desfase tanto en los intervalos de las diferencias como en su frecuencia de ocurrencia.

Un desglose por Nodo de Control indica que para el Nodo 1 la diferencia con mayor frecuencia de ocurrencia es el rango que va desde 0.019 a 0.024, con una frecuencia de un 38.2% del total general de sus coeficientes. El segundo rango con mayor frecuencia de ocurrencia recae en el intervalo de diferencias entre los 0.014 a 0.019 con un 22.1% del total de sus datos. Si los intervalos mencionados anteriormente se ajustan al Nodo de

Control 2, se observa entonces una menor ocurrencia de los coeficientes en estos rangos, es así, como para el primer intervalo de diferencias y de mayor ocurrencia en el Nodo 1 (de 0.019 a 0.024), el Nodo 2 presenta una frecuencia de ocurrencia de 15,4% del total de sus datos, mientras que las diferencias en los coeficientes para el segundo intervalo que destaca en el Nodo 1 (de 0.014 a 0.019), en el Nodo de Control 2 solo se obtiene una frecuencia de ocurrencia cercana al 8,4%. Esto quiere decir, que las mayores frecuencias de ocurrencias se concentran en “intervalos de diferencias” distintos en ambos nodos, prueba de esto, es que en el Nodo de Control 2, la mayor frecuencia de ocurrencia recae en el intervalo de valores desde los 0.029 a 0.034 con un 34% de total general de datos, esto, seguido de una ocurrencia del 15% para el intervalo que agrupa los valores de diferencias en coeficientes entre los 0.019 a 0.024.

Finalmente, es posible agregar que las máximas y mínimas diferencias en los coeficientes de altura para el Nodo 1 corresponden a 0.052 y -0.011 respectivamente, mientras que en el Nodo 2 se observa como máxima diferencia en los coeficientes un valor de 0.094. La mínima diferencia, por otra parte, corresponde a un valor de -0.011.

**Figura 33:** Comparación de distribución de frecuencias para los Nodos de Control 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.4 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN SITIO DE INTERÉS

Transferida la estadística al sitio de interés, es necesario comprender la condición característica que presenta el oleaje en el sector Juan de Saavedra, para lo cual, se desarrollaron tablas de incidencia de altura por periodo, altura por dirección y periodo por dirección para el Nodo de Control 1 y 2. A continuación a modo de ejemplo, es posible observar la tabla de incidencia de altura por periodo para el Nodo de Control 1, Batimetría Completa. El resto de las tablas de incidencia, junto con los resultados del análisis realizado al Nodo de Control 2 se presentan en el Anexo C, sección 12.4.

**Tabla 19:** Incidencia conjunta de Altura vs Periodo, Nodo control 1 Batimetría Completa.

Altura Hs [m]	Periodo [s]										% Ocurrencia
	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	
0-0.5	0.47	4.35	5.34	29.92	27.27	26.95	2.42	0.63	0.08	0.02	97.44
0.5-1		0.07	0.13	0.87	0.23	0.23	0.01				1.54
1-1.5			0.13	0.13	0.06	0.07					0.40
1.5-2			0.08	0.11	0.02	0.04					0.25
2-2.5			0.04	0.14	0.03	0.01					0.23
2.5-3				0.07	0.01	0.01					0.09
3-3.5				0.04							0.04
5-5.5				0.01							0.01
<b>% Ocurrencia</b>	0.47	4.42	5.72	31.30	27.63	27.31	2.43	0.63	0.08	0.02	100%

Fuente: Elaboración propia.

De los análisis realizados en las tablas de incidencia, se desprende que en la estadística de oleaje el periodo más frecuente se encuentra entre los 11 a 12 [s] correspondiente al 31.30% de los registros, seguida de los periodos entre 13 y 14 [s] con una ocurrencia del 27.63% del total. Estos datos se distribuyen casi en su totalidad en el rango de alturas que van desde los 0.1 a 0.5 [m].

Direccionalmente, el régimen de olas se presenta en su totalidad desde el cuarto cuadrante, donde la dirección predominante con un 62.88% del total general de datos es la componente NW, representada gradualmente en tablas hasta los 326.25°, a partir de este valor se distingue la componente NNW con una representatividad en ocurrencia del 37.11% (Tabla 48 Anexo C).

Del análisis de oleaje expuesto para el Nodo 1 correspondiente a la Batimetría Modificada, se infiere, que en la estadística el periodo más frecuente se encuentra (al igual que en la Batimetría Completa) entre los 11 a 12 [s] correspondiente al 31.30% de los registros, seguida de los periodos entre 13 y 14 [s] con una ocurrencia del 27.63% del total. Estos datos se distribuyen casi en su totalidad en el rango de alturas que van desde los 0.1 a 0.5 [m].

Direccionalmente, se observa para la estadística de la Batimetría Modificada, que la totalidad del régimen de olas se presenta desde el cuarto cuadrante, donde la dirección

que predomina es la componente NW (hasta los 326.25°) con una ocurrencia total del 80.65% de datos, seguida de la componente NNW con un total general del 19.35%.

Expuestos los resultados del análisis de clima medio en el sitio de interés para el Nodo 1, se comprende que tanto para la Batimetría Completa como para la Batimetría Modificada, las alturas y periodos de ola presentan los mismos rangos en frecuencia de ocurrencia, destacando la mayor concentración de datos entre las alturas de 0.1 a 0.5 [m] para periodos entre los 11 a 16 [s]. En cuanto a la dirección de incidencia es posible destacar para el Nodo 1, que el 100% de la estadística proviene de las direcciones NW y NNW, distribuyéndose una mayor representatividad para la dirección NW. Direccionalmente es donde se logran apreciar las mayores diferencias entre ambas batimetrías, un ejemplo de esto es la dirección NW, donde para la Batimetría Completa esta dirección posee un 62.88% del total general, mientras que en la Batimetría Modificada la dirección NW representa un 80.65% del total de datos, con esto, se infiere que la Batimetría Modificada influye directamente en la dirección de incidencia del oleaje aportando en este caso, más datos a la dirección NW (17.77% más) que los obtenidos para la Batimetría Completa.

### **5.3.5 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN SITIO DE INTERÉS**

La estadística de aguas profundas Fondef “Un Atlas de Oleaje para Chile”, fue transferida a las cercanías costeras del paseo Juan de Saavedra utilizando la metodología cuasi purista. Obtenidos estos datos, fue necesaria una evaluación de los eventos extremos en el sitio de interés, para lo cual se aplicó la metodología conocida como “valores sobre el umbral”. La lista de los 36 eventos seleccionados en los Nodos de Control 1 y 2 de la Batimetría completa para las direcciones incidentes desde el cuarto cuadrante se pueden observar en las Tablas 59 y 60, sección 12.5 del Anexo C.

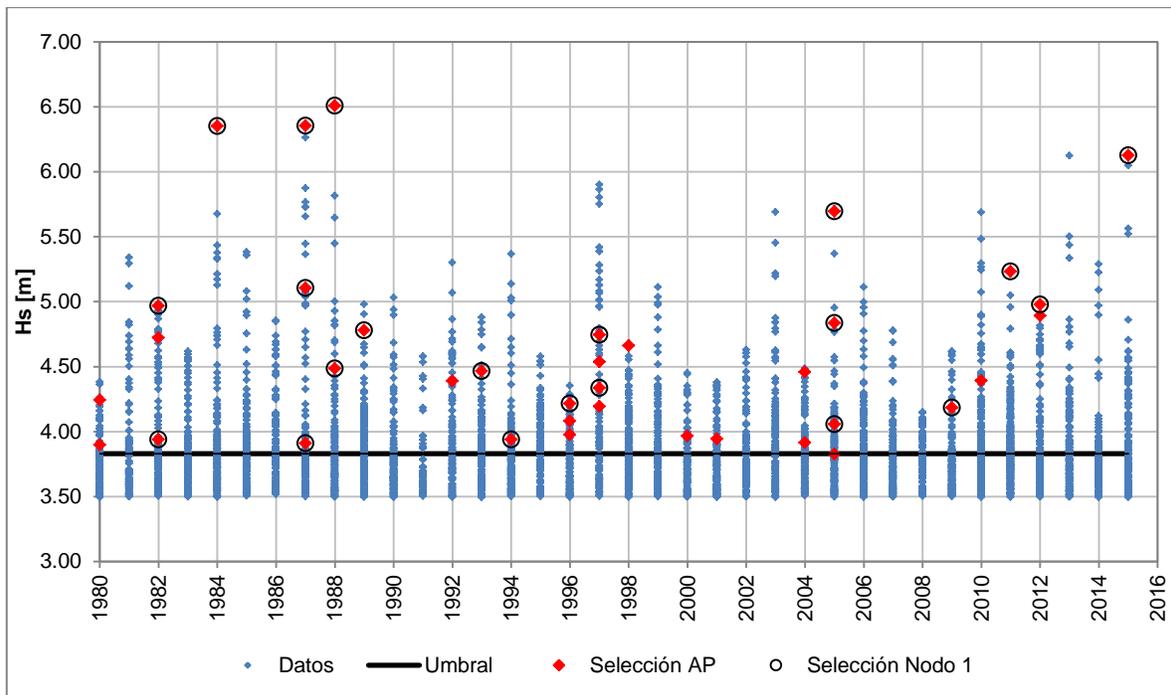
De la lista de eventos extremos seleccionados es posible apreciar diferencias en la conformación de los datos, ya que el primer evento identificado en el Nodo de Control 1 (24 de julio de 1987) es el número dos en la distribución de datos en aguas profundas (Tabla 42), además, el segundo evento que integra la lista en el sitio de interés es el cuarto seleccionado en aguas profundas. Análogamente, se detecta, que el primer dato en aguas profundas (13 de agosto de 1988, ver Tabla 42) es el número diecisiete en la conformación de datos extremos en el sitio de interés para el Nodo de Control 1.

Los resultados obtenidos de las evaluaciones de eventos extremos en aguas profundas y de la selección en el sitio de interés (Nodo de control 1) son comparados sólo desde el punto de vista del diseño, vale decir, en aquellos parámetros utilizados como criterios de diseño en obras marítimas, en este caso, la altura de ola significativa, obviando la discusión respecto de la forma espectral. En la Figura 34, es posible observar diferencias en la evaluación de eventos extremos entre aguas profundas y la selección en el sitio de interés. De los 36 eventos seleccionados tanto en aguas profundas como en el sitio de interés, se observa que 21 eventos que son considerados extremos en aguas profundas, también lo son en el sitio, además de esto, es posible agregar que del universo de eventos seleccionados son 17 los considerados como extremos en aguas profundas, y que no son identificados como tales en el sitio de interés, mientras que 15 eventos seleccionados como extremos en el Nodo de Control 1 no son tomados en cuenta en el análisis realizado en aguas profundas. Estas diferencias dan a entender que un evento

extremo en aguas profundas no necesariamente lo es en el sitio de interés y viceversa (Molina, 2016).

Los resultados expuestos en párrafos anteriores son producto de la metodología aplicada al Nodo de Control 1 para la Batimetría Completa. El mismo análisis se planteó sobre la base de la Batimetría Modificada no apreciando grandes diferencias en la selección de eventos extremos (igual número de eventos), ya que de la totalidad de eventos seleccionados son 21 los considerados como extremos en aguas profundas y que también lo son en el sitio de interés, concluyendo los mismos resultados de la selección de eventos extremos expuestos en la Figura 34.

**Figura 34:** Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en el sitio de interés, cuarto cuadrante, Batimetría Completa.



Fuente: Elaboración propia.

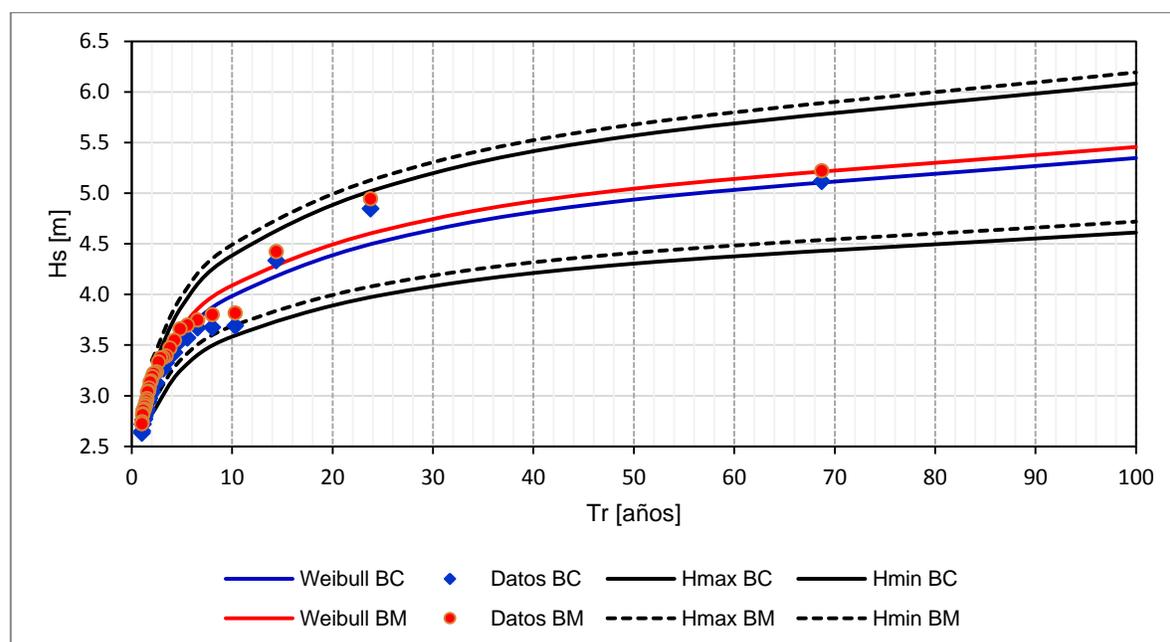
La selección de eventos expuesta anteriormente permitió la obtención de un registro de alturas de ola extremas, tanto para la Batimetría Completa como para la Batimetría Modificada. A continuación, se presenta una comparación de estos valores de altura mediante su utilización en el análisis extremal.

A partir de la función de distribución Weibull con probabilidad de ploteo Goda se proyectan las bandas de confianza de un 95% (Figura 35) y se calculan las alturas de ola significativas para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Tabla 20).

En la Figura 35, se muestra la distribución de las alturas de ola extremas proyectadas en función de los periodos de retorno teóricos calculados, esto, a partir de la inclusión en

esta sección de los datos de oleaje obtenidos en el sitio de interés para la Batimetría Completa y Batimetría Modificada. De la Figura 35, se observa además, que los datos extremos resultantes de la Batimetría Modificada (marcadores en rojo) generan magnitudes de altura mayores que los valores productos de la Batimetría Completa (marcadores en azul). Lo expuesto anteriormente, se demuestra numéricamente en la Tabla 20, donde se comparan las estimaciones de altura de ola significativa para los periodos de retorno en análisis. De esta comparación, se denota, que las alturas de ola ( $H_s$  [m]) de la Batimetría Modificada adquieren valores levemente superiores a las cifras alcanzadas por la Batimetría Completa, sobreestimando este parámetro en aproximadamente 0.10 [m] para los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años y de 0.11 [m] para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

**Figura 35:** Comparación de oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 1.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 20:** Comparación de valores oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 1.

Tr [años]	Batimetría Completa			Batimetría Modificada		
	Hs [m]	Hs min [m]	Hs máx [m]	Hs [m]	Hs min [m]	Hs máx [m]
2	3.03	2.82	3.25	3.13	2.92	3.35
5	3.57	3.26	3.88	3.68	3.37	3.99
10	3.98	3.58	4.39	4.09	3.69	4.49
25	<b>4.53</b>	4.00	5.06	<b>4.63</b>	4.10	5.17
50	<b>4.94</b>	4.30	5.57	<b>5.04</b>	4.41	5.68
100	5.35	4.61	6.08	5.46	4.72	6.19

Fuente: Elaboración propia.

Las metodologías expuestas en aguas profundas y en el sitio de interés se aplicaron en dos Nodos de Control utilizando en cada proceso dos batimetrías de diferente resolución (Completa y Modificada). A partir de este análisis se determina, por la cercanía a la zona de emplazamiento de la obra, plantear el pre-diseño de la defensa costera sobre la base de la información adquirida en el Nodo de Control 1.

Es así como la Tabla 21 presenta la comparación de las alturas de ola de diseño, resultados obtenidos mediante la utilización de ambos procesos metodológicos descritos anteriormente. La casilla de título “Transferencia IV cuadrante” presenta como resultado las alturas de ola obtenidas a través de la propagación de parámetros extremos seleccionados desde el cuarto cuadrante (aguas profundas) hacia el Nodo de Control 1 (sitio de interés) para las dos batimetrías construidas en el presente estudio, mientras que la columna denominada “Extremo sitio de interés” presenta alturas de ola calculadas mediante un clima extremo de oleaje, una vez transferida toda la estadística al sitio de interés.

**Tabla 21:** Comparación alturas de diseño aguas profundas vs sitio de interés, Nodo de Control 1.

Tr [años]	Alturas Hs [m] Transferencia IV cuadrante		Alturas Hs [m] Extremo sitio de interés	
	Batimetría Completa	Batimetría Modificada	Batimetría Completa	Batimetría Modificada
25	5.41	5.52	4.53	4.63
50	5.75	5.87	4.94	5.04

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos, se observa que las alturas de ola producto de la utilización de una metodología de selección de eventos en aguas profundas y posterior propagación (hacia en Nodo 1) son mayores a las obtenidas de la selección de eventos en el sitio de interés previa propagación de toda la estadística, alcanzando diferencias para la Batimetría Completa de aproximadamente 0.88 [m] para un periodo de retorno de 25 años y de 0.81 [m] para un periodo de retorno de 50 años, análogamente, en la Batimetría Modificada estas diferencias ascienden a 0.89 y 0.83 [m] para periodos de retorno de 25 y 50 años respectivamente, demostrando de esta manera, una sobreestimación de este parámetro de diseño a favor de la metodología de selección de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación al sitio de interés.

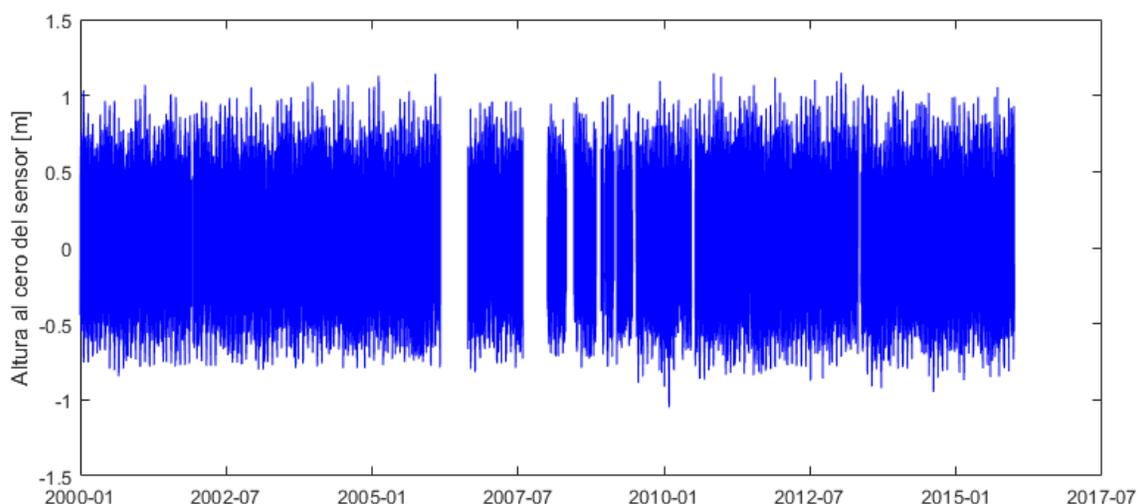
## 5.4 ANÁLISIS DE MAREA Y NIVELES

En esta sección se presentan los análisis realizados a la marea astronómica y meteorológica, cuyos resultados permitieron establecer los niveles característicos para el diseño en ingeniería costera.

### 5.4.1 CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

En el análisis realizado del nivel de mar a partir de los datos obtenidos de “*Sea Level Station Monitoring Facility*”, fue posible apreciar que la serie de tiempo se encuentra medida en distintos niveles y con periodos de datos faltantes “offset” (ver Figura 60 del Anexo D), esto probablemente, debido a la mantención realizada a los equipos de medición. Ante esto, y con el objetivo de ajustar las series al mismo nivel de referencia, se efectuaron procedimientos de correcciones en aquellos meses donde los registros presentaron diferencias de nivel, obteniéndose así lo expuesto en el gráfico de la Figura 36.

**Figura 36:** Serie del nivel del mar corregida para Valparaíso entre el año 2000 a 2015.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.2 MAREA ASTRONÓMICA

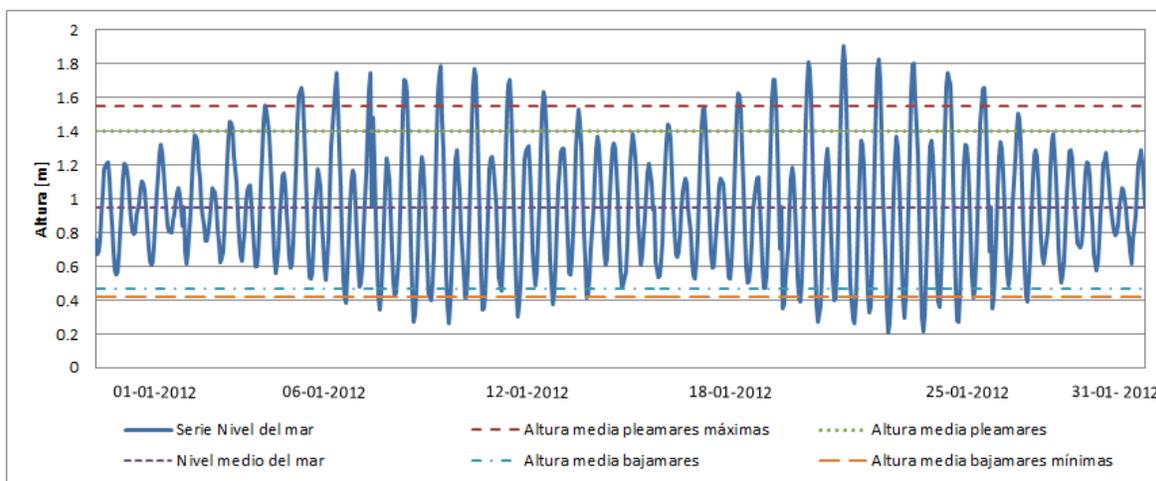
#### 5.4.2.1 ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE LA MAREA

Para el diseño de obras marítimas, el SHOA establece que el comportamiento de la marea se puede caracterizar a partir de las predicciones de marea, estableciendo un método oficial para el cálculo de los valores no-armónicos de la marea (SHOA, 1999).

Se analizó el registro del nivel del mar para la localidad de Valparaíso entre los años 2000 a 2015, obteniendo los planos característicos de referencia mareal con respecto al NRS.

En la Figura 37 se presenta un ejemplo de los planos de referencia mareal, correspondiente al mes de enero del año 2012, mientras que en la Tabla 22 se observan los resultados de la caracterización mareal para todos los años de estudio, incluyendo la probabilidad de ocurrencia que tiene cada plano mareal dentro de la estadística. Esta probabilidad, se estimó con la finalidad de otorgar un grado de certidumbre (menor o mayor) a cada evento caracterizado, logrando de esta manera identificar los valores que alcanza este parámetro en rangos de mayores frecuencias de ocurrencia.

**Figura 37:** Niveles de marea, Valparaíso, enero 2012.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 22:** Planos de referencia mareal para Valparaíso entre los años 2000 a 2015 con su probabilidad de ocurrencia dentro de la estadística.

Parámetros Referencia Mareal	m [NRS]	% Ocurrencia
Máxima pleamar	2.10	0.001%
Media pleamares máximas	1.51	6.53%
Media pleamares	1.37	13.11%
Nivel medio del mar	0.92	48.50%
Media bajamares	0.46	89.33%
Media bajamares mínimas	0.41	92.63%
Mínima bajamar	0.002	100%

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis expuesto anteriormente, se infiere que para los años en estudio se estableció la amplitud máxima en 2.10 [m] NRS, destacando como la mayor pleamar en todos los años de registro. Por otra parte, de la Tabla 22 además, se observa un promedio de las máximas pleamares estimadas en 1.51 [m] y cuya probabilidad de ocurrencia de un

evento similar o de mayor magnitud asciende a un 6.53% del total de la estadística. La media de las bajamares en tanto, se estimó en 1.37 [m], con una probabilidad de que ocurra un parámetro mareal de igual o mayor intensidad en un 13.11% del tiempo. Siguiendo el mismo análisis expuesto anteriormente, la media de las bajamares posee una probabilidad de ocurrencia de 89.38%, lo que indica que un gran porcentaje de los datos de la estadística supera el valor de los 0.46 [m]. Finalmente, la media de las bajamares mínimas fue de 0.41 [m] con un valor de ocurrencia de 92.63% y la mínima bajamar se estableció en 0.002 [m] respecto del NRS.

Los parámetros de referencia detallados en la Tabla 22, otorgan una idea significativa de las características que poseen los registros del nivel del mar en cuanto a la altura que alcanzan sus diferentes planos mareales. La probabilidad de ocurrencia calculada permite en los registros del nivel del mar interpretar la frecuencia con la que estos valores de altura son igualados o superados en magnitud, observándose diferencias notorias entre la ocurrencia de un parámetro de referencia mareal, respecto de otro. Prueba de ello, es la probabilidad de ocurrencia de valores que igualen o superen el parámetro del nivel medio del mar (48.50%) en comparación con estimaciones que sobrepasen la media de las pleamares (13.11%) (diferencia de 0.92 [m] a 1.37 [m]) o la diferencia que existe entre frecuencia de ocurrencia de un evento como la media de pleamares máximas (6.53%) y la máxima pleamar estimada (0.001%). Con base en el argumento anterior, se presenta en la Tabla 23 valores de referencia mareal complementarios a los ya expuesto, permitiendo así, comprender la distribución de ocurrencia que posee la estadística en la magnitud de sus alturas mareales.

**Tabla 23:** Planos de referencia mareal complementarios para Valparaíso entre los años 2000 a 2015 con su probabilidad de ocurrencia dentro de la estadística.

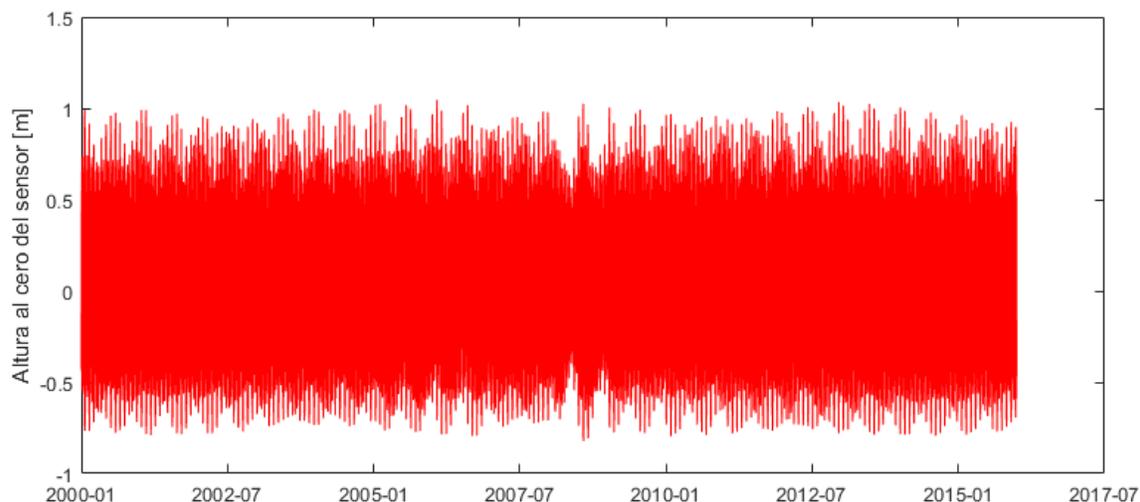
<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>	<b>% Ocurrencia</b>
<b>Máxima pleamar</b>	2.10	0.001%
Parámetro mareal	1.90	0.18%
Parámetro mareal	1.70	1.74%
<b>Máxima pleamares máximas</b>	1.51	6.53%
<b>Media pleamares</b>	1.37	13.11%
Parámetro mareal	1.10	32.71%
<b>Nivel medio del mar</b>	0.92	48.50%
Parámetro mareal	0.70	68.38%
<b>Media bajamares</b>	0.46	89.38%
<b>Media bajamares mínimas</b>	0.41	92.63%
Parámetro mareal	0.20	99.22%
<b>Mínima bajamar</b>	0.002	100%

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.2.2 ANÁLISIS ARMÓNICO DE LA MAREA

En esta sección, para la obtención de la marea astronómica, los registros del nivel del mar entre los años 2000 al 2015 fueron sometidos a un análisis armónico utilizando para ello la herramienta T-Tide de Matlab. La marea astronómica reconstruida se presenta en el siguiente gráfico.

**Figura 38:** Marea astronómica entre los años 2000 a 2015.



Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de comprender las diferencias existentes en los registros obtenidos, se realizó un análisis armónico anual. Este análisis permitió el conocimiento de las constituyentes de mayor amplitud en cada uno de los años en estudio, y donde la suma de las constituyentes dio como resultado la componente astronómica que posee la marea.

Dado el conocimiento de las constituyentes es posible calcular el Nivel de Reducción de Sonda utilizando lo mostrado en la Ecuación 24, según las Instrucciones Hidrográficas N°5 (Publicación SHOA N° 3105).

El NRS promedio de los años analizados se calculó a 0.92 [m] bajo el Nivel Medio del Mar, lo que resulta coincidente con el valor de 0.91 [m] que se estiman en las Tablas de Mareas elaboradas por el SHOA (ver más detalles en el Anexo D, sección 13.3).

Por otra parte, el coeficiente de Courtier se determinó en 0.44, lo que indica que el régimen de mareas en la localidad de Valparaíso es de tipo mixto semidiurno (dos pleamares y dos bajamares en un día).

### 5.4.3 MAREA METEOROLÓGICA

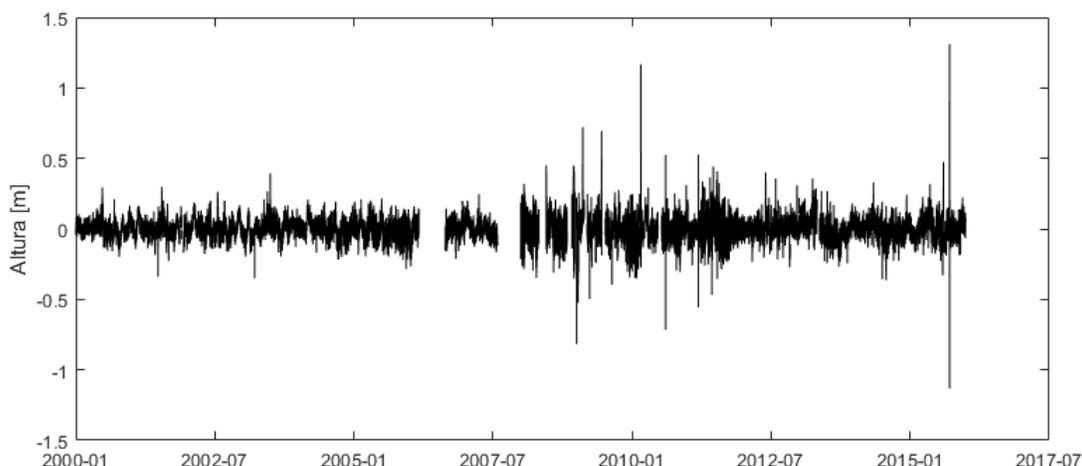
En esta sección se presentan los resultados del análisis de la marea meteorológica, el que se desarrolló bajo dos puntos de vista. El primero, consistió en calcular la marea meteorológica como la diferencia entre la serie del nivel del mar corregido y la serie de marea astronómica. De esta diferencia, se obtiene lo que comúnmente se denomina como residuo meteorológico, abarcando usualmente los efectos de la presión atmosférica (*barmetric set-up*) y de la sobreelevación por viento (*wind set-up*). El segundo punto de análisis, se enfocó en la determinación individual de los efectos antes mencionados (por presión atmosférica y viento), empleando las formulaciones establecidas en la literatura para dichos propósitos.

#### 5.4.3.1 ANÁLISIS DE RESIDUO

Como se expuso anteriormente, la marea meteorológica fue calculada a partir de la diferencia entre las series del nivel la mar corregida (Figura 36) y la marea astronómica reconstruida (Figura 38), obteniéndose el residuo mostrado en a Figura 39.

La grafica de la Figura 39 contempla 16 años de estudio de residuo meteorológico, donde es posible distinguir variaciones significativas del registro a través del tiempo (“*peaks*” de altura). Estas variaciones del nivel del mar coinciden con fechas destacadas en el ámbito marítimo nacional, un ejemplo se manifiesta en el primer *peak* de la serie, debido a que ocurre en febrero del año 2010, fecha conocida por el terremoto y posterior tsunami que afecto a Chile un 27 de febrero. De esta misma forma, es posible identificar grandes variaciones del nivel del mar como las ocurridas en marzo del año 2011 (efectos en costas chilenas tras terremoto en Japón) y septiembre del año 2015 (tsunami post terremoto en Illapel). Un evento de gran magnitud que provoco variadas alteraciones del nivel del mar fue el ocurrido el día 8 de agosto del año 2015, el cual no se encuentra representado en el grafico debido a problemas sufridos con el mareógrafo a consecuencias del mismo fenómeno (“*offset*” de datos desde el 8 al 11 de agosto).

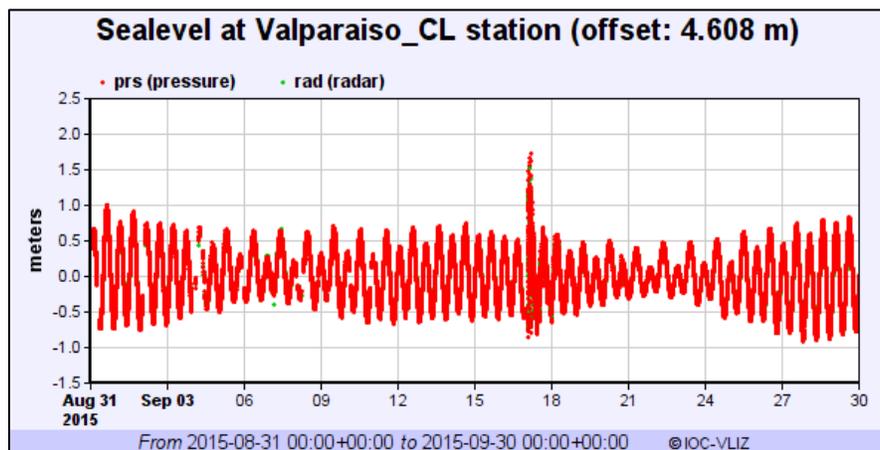
**Figura 39:** Serie de marea meteorológica obtenida (Residuo meteorológico).



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 40 se aprecia un ejemplo de las variaciones significativas del nivel del mar (por tsunami) mencionadas en párrafos anteriores, obtenido de los registros del “IOC”, correspondiente al tsunami post terremoto en Illapel el 16 de septiembre del año 2015.

**Figura 40:** Registro de variaciones del nivel del mar, septiembre 2015.



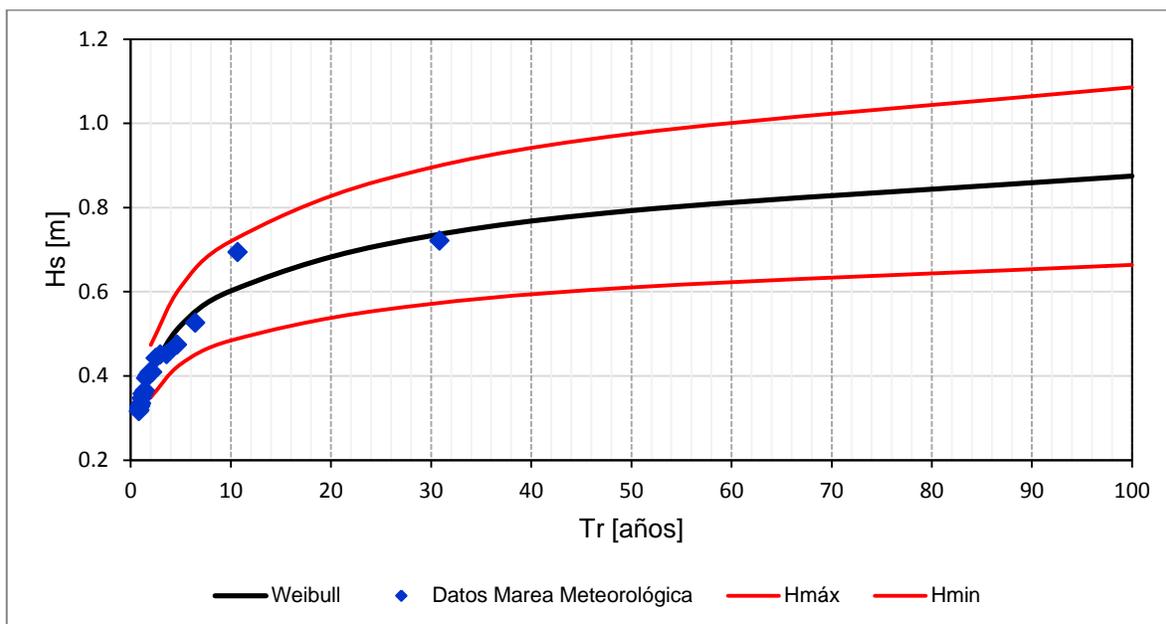
Fuente: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=valp2>.

En cuanto a los resultados del análisis residual, estos dan cuenta de una amplitud variable en la marea meteorológica, con una media cercana a 0.0004 [m] y un máximo estimado en 0.721 [m]. Para este proceso, se descartan los “*peaks*” máximos por efectos de tsunamis presentes en la estadística, registrados el 27 de febrero de 2010, el 11 de marzo de 2011 y el 16 de septiembre de 2015.

La caracterización del residuo meteorológico se planteó en base a un análisis de valores extremos, permitiendo obtener magnitudes energéticas del fenómeno asociado a ciertos periodos de retorno. Este procedimiento se basó en lo expuesto en la sección 5.3.2 “Clima extremo de oleaje en aguas profundas”, para lo cual se seleccionaron los 20 valores de mayor altura verificando una independencia con rango mínimo de tres días. Se analizaron las distribuciones de Weibull, Gumbel y Logarítmica (Log-Normal), ajustando una linealización estandarizada mediante el método de ajuste gráfico. Para el criterio de selección de ajuste se utilizó el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), cuyo valor correspondió a 0.95 para la distribución de Weibull-Goda como se aprecia en la Figura 41. El detalle con las fechas y magnitudes de los valores máximos utilizados para este estudio se pueden observar en la Tabla 71 del Anexo D (sección 13.4.1).

Finalmente los resultados de los valores extremos de la marea meteorológica ( $H_m$  [m]) para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, incluyendo los límites mínimos y máximos asociados a un intervalo de confianza del 95% se presentan en la Tabla 24.

**Figura 41:** Marea meteorológica extrema, Weibull ( $k = 1$ ).



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 24:** Marea meteorológica extrema, Valparaíso.

Tr [años]	Hm [m]	Hm min [m]	Hm máx [m]
2	0.41	0.37	0.47
5	0.52	0.43	0.62
10	0.60	0.47	0.74
25	0.71	0.53	0.9
50	0.79	0.57	1.02
100	0.87	0.62	1.14

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 24, se destaca para los periodos de retorno de 25 y 50 años valores extremos de marea meteorológica equivalentes a 0.71 [m] y 0.79 [m] respectivamente.

#### 5.4.3.2 EFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA (BAROMETRIC SET-UP)

Para cuantificar el incremento del nivel del mar por efectos de la variación de presión atmosférica se analizó la estadística de esta variable para la ciudad de Valparaíso entre los años 2013 al año 2016, obtenida de la Dirección General de Aeronáutica Civil, Dirección Meteorológica de Chile ([www.meteochile.cl/inicio.php](http://www.meteochile.cl/inicio.php)) para la estación de Rodelillo, correspondiente a valores promedios de presiones horarias a nivel del mar.

La Tabla 25 presenta un resumen de la estadística utilizada, en la que se refleja la intensidad de los valores analizados, representados en valores máximos, medios y mínimos de cada año en estudio. De la Tabla 25, es posible destacar que el mimo valor de presión atmosférica se registró en el año 2015 y corresponde al mes de agosto. Fecha conocida por el evento extremo que azoto las costas de Valparaíso un 8 de agosto. Para más detalles sobre las variaciones de la presión atmosférica durante los años en estudio (valores por mes) se recomienda ver las Figuras 62, 63, 64 y 65 (Anexo D sección 13.4.2).

**Tabla 25:** Valores anuales de presión atmosférica, Máximos, Medios y Mínimos, Valparaíso.

Año	Presión Atmosférica [ hPa ]		
	Valores máximo	Valores medios	Valores mínimos
2013	1026.0	1016.4	1009.7
2014	1029.1	1016.9	1010.2
2015	1026.1	1016.3	1006.4
2016	1027.8	1016.9	1007.0

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando los valores anuales de presión atmosférica y las correcciones propuestas por el SHOA (Tabla 1) en la Ecuación 8, se tiene para una presión atmosférica máxima de 1029 [hPa] asociado a “buen tiempo” una corrección aproximada de -0.16 [m], por otra parte, para una condición de “temporal” con una presión atmosférica mínima de 1006 [hPa] se propone una corrección del nivel del mar estimada en +0.07 [m].

#### 5.4.3.3 EFECTOS DEL VIENTO

Con la finalidad de identificar la contribución de los efectos del viento al nivel del mar, se calculó este parámetro siguiendo la metodología propuesta por Khamphuis (2010) (ver Ecuación 9), donde la desnivelación está determinada como una función del largo del *fetch*, la profundidad promedio de la zona de generación y la velocidad del viento.

El *fetch* se estimó en aquella zona de generación de ráfagas y vientos de alta intensidad, información basada en las cartas de superficie del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile. En cuanto a la velocidad del viento, el “Plan Maestro para la ciudad de Valparaíso” desarrollado para el año 2015, expone que las magnitudes características de estos efectos en época de primavera y verano alcanzan velocidades ocasionales de hasta 30 o 35 nudos con dirección proveniente desde el tercer cuadrante, mientras que en

invierno predominan vientos del cuarto cuadrante, con intensidades medias que fluctúan entre los 15 a 20 nudos.

Ante lo descrito anteriormente, se adoptó un valor medio para la velocidad del viento de 25 nudos (aproximadamente 46 km/hr), con lo cual, se obtiene que el aumento del nivel del mar por efectos del viento se encuentra entre los 0.025 a 0.11 [m]. Los parámetros utilizados para cuantificar el aumento del nivel del mar por efectos del viento se presentan en la Tabla 26.

**Tabla 26:** Parámetros iniciales para la sobreelevación del nivel del mar por viento.

Sección	Delta X (m)	d (m)	D (m)	$\Delta S$ (m)	S (m)	S (cm)
1	1700000	3660	3660	0.025	<b>0.025</b>	2.5
2	800000	2500	2500	0.017	<b>0.04</b>	4.2
3	610000	1000	1000	0.033	<b>0.08</b>	7.5
4	470000	4000	4000	0.006	<b>0.08</b>	8.2
5	146000	4500	4500	0.002	<b>0.08</b>	8.3
6	22000	700	700	0.002	<b>0.09</b>	8.5
7	16000	250	250	0.003	<b>0.09</b>	8.8
8	4700	100	100	0.003	<b>0.09</b>	9.1
9	2500	70	70	0.002	<b>0.09</b>	9.3
10	1200	40	40	0.002	<b>0.09</b>	9.5
11	1000	30	30	0.002	<b>0.10</b>	9.6
12	700	20	20	0.002	<b>0.10</b>	9.8
13	610	15	15	0.002	<b>0.10</b>	10.0
14	450	10	10	0.002	<b>0.10</b>	10.3
15	290	5	5	0.003	<b>0.11</b>	10.6

Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4.3.4 EFECTOS DEL SET-UP DE OLEAJE

El *Set-up* de oleaje se calculó mediante la metodología propuesta por el “*Coastal Engineering Manual*”, utilizando para ello, datos sobre la condición de oleaje en el sitio de interés, cambios de dirección por efectos de refracción, y la condición del oleaje en rotura. Para la realización de este cálculo en condiciones dominantes, se tomó en cuenta la información del análisis extremo realizado al Nodo de Control 1, considerando las alturas de ola para periodos de 25 y 50 años. Los resultados se muestran en la Tabla 27 y se destacan como valores de *Set-up* máximo 1.22 y 1.30 [m] para los periodos de retorno correspondientes.

**Tabla 27:** Parámetros cálculo *Set-up* de oleaje.

Parámetros		Tr 25 años	Tr 50 años
<b><u>Condición sitio de interés</u></b>			
Ola de diseño	H0	4.53	4.94
Periodo aguas profundas	Tp	11	11
Longitud de onda	L0	188.76	188.76
<b><u>Coefficiente de refracción</u></b>			
	Kr	0.99	0.99
Cambios de dirección efecto refracción por ley de Snell	$\alpha_0$ $\alpha$	17 12.24	17 12.24
Profundidad	D	20	20
Longitud de onda	L	136.86	136.86
<b><u>Condición en rotura</u></b>			
Ola refractada	H'0	4.48	4.89
Índice altura en rotura	$\Omega_b$	1.11	1.09
Altura en rotura	Hb	4.97	5.33
Índice profundidad en rotura Weggel	$\gamma_b$	0.82	0.82
Parámetro	A	7.58	7.58
Parámetro	B	0.86	0.86
Pendiente de fondo	$\tan\beta$	0.01	0.01
Profundidad en rotura	db	6.03	6.48
<b><u>Cálculo de Set-up de oleaje</u></b>			
Set-down	$\eta_b$	-0.26	-0.27
<b>Set-up</b>	<b><math>\eta_s</math></b>	<b>0.97</b>	<b>1.04</b>
Gradiente Set-up	$d\eta/dx$	0.0020	0.0020
Línea de costa media	$\Delta x$	121.52	129.92
<b>Set-up máximo</b>	<b><math>\eta_{m\acute{a}x}</math></b>	<b>1.22</b>	<b>1.30</b>

Fuente: Elaboración propia.

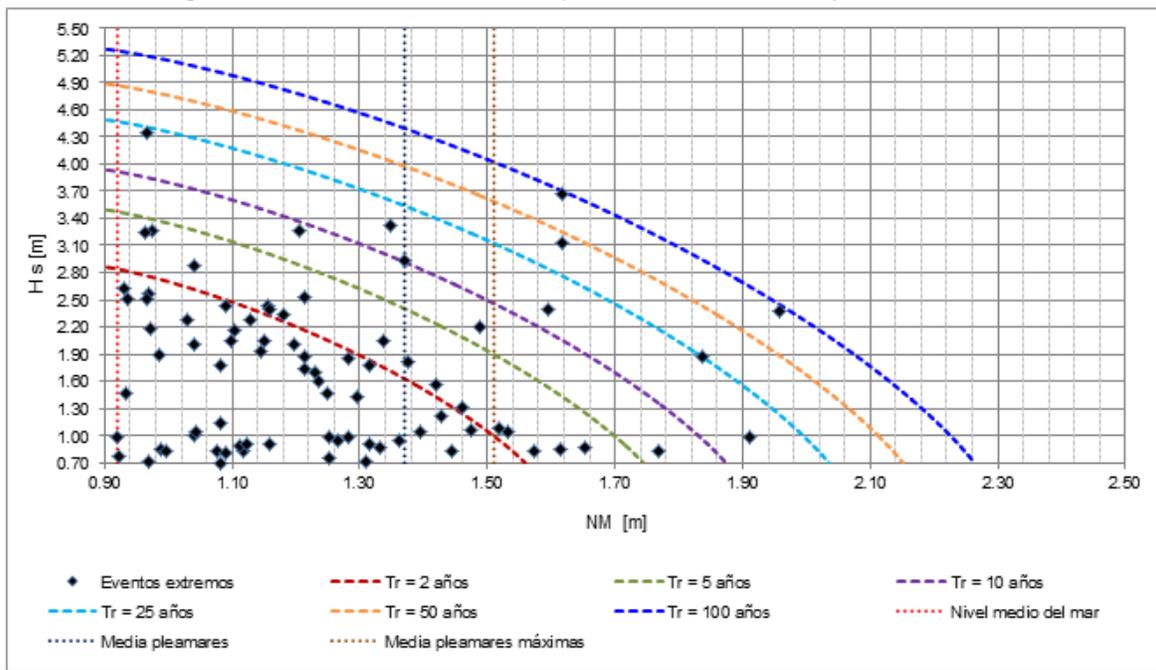
#### 5.4.4 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS

Para estimar la recurrencia de eventos extremos respecto de su altura significativa y nivel del mar, se utilizaron funciones paramétricas denominadas cópulas (sección 3.3). El análisis, se basó en la utilización conjunta de datos de nivel del mar y las alturas de ola transferida al Nodo de Control 1.

Los resultados de esta metodología se aprecian en la Figura 42, donde se grafican los periodos de retorno como curvas de nivel en función de las alturas significativas y niveles del mar. Estos resultados permiten establecer como objetivo final un nivel de diseño distinto al propuesto de manera convencional en ingeniería marítima. Este y otros niveles de diseño seleccionados se detallan en la próxima sección (5.4.5 “Niveles de Diseño”).

En la Figura 42, se pueden observar las curvas de periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, lo que permite comprender el periodo de retorno conjunto que posee la combinación de un par de datos extremos de altura de ola y nivel del mar. Se aprecia de forma general, que la mayor cantidad de valores extremos (52 datos) son inferiores a los 2 años de periodo de retorno (aproximadamente un 65% del total), para eventos extremos bajo los 2.86 [m] de altura de ola y 1.56 [m] de nivel del mar. De este análisis, es posible agregar, que eventos de menor altura de ola poseen mayor periodo de retorno que otros de mayor altura significativa, lo que se explica principalmente debido a la influencia de la variable del nivel del mar, donde, en dichos casos, esta componente es mayor que la media (se aleja del nivel medio del mar). De la Figura 42 se destacan además, 16 eventos extremos entre los periodos de retorno de 2 y 5 años, 3 eventos entre los 5 y 10 años, 6 datos extremos entre los 10 y 25 años, un valor entre los 25 y 50 años, y finalmente, 2 eventos extremos entre los periodos de retorno de 50 y 100 años.

Figura 42: Periodo de retorno conjunto de altura de olas y nivel del mar.



Fuente: Elaboración propia.

### 5.4.5 NIVELES DE DISEÑO

La conformación de un nivel de diseño convencional (CC) se planteó sobre la base de los parámetros obtenidos de los estudios de condiciones naturales, presentados mediante cuatro escenarios que se describen a continuación:

- Escenario 1, ocurrencia de una media de pleamares máxima, junto con una marea meteorológica extrema y un wave set-up, parámetros estimados para un periodo de retorno de 25 años.
- Escenario 2, ocurrencia de una media de pleamares máximas, junto con una marea meteorológica que considera efectos individuales de presión atmosférica y viento, además, de un wave set-up estimado para un periodo de retorno de 25 años.
- Escenario 3, ocurrencia de una máxima pleamar, junto con una marea meteorológica extrema y un wave set-up, parámetros estimados para un periodo de retorno de 50 años.
- Escenario 4, ocurrencia de una máxima pleamar, junto con una marea meteorológica que considera efectos individuales de presión atmosférica y viento, además, de un wave set-up estimado para un periodo de retorno de 50 años.

**Tabla 28:** Niveles de diseño convencional.

Componente		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	Marea astronómica	1.51	1.51	2.10	2.10
2	Marea Meteorológica	0.71	-	0.79	-
2.1	Por efectos de presión atmosférica	-	0.07	-	0.07
2.2	Por efectos del viento	-	0.11	-	0.11
3	Wave Set-up	1.22	1.22	1.30	1.30
<b>Nivel de Diseño</b>		<b>3.44 [m] NRS</b>	<b>2.91 [m] NRS</b>	<b>4.19 [m] NRS</b>	<b>3.58 [m] NRS</b>

Fuente: Elaboración propia.

Los cuatro escenarios descritos anteriormente se resumen en la Tabla 28 y constituyen los niveles de diseño denominados “convencional”. La diferencia entre un escenario y otro recae en la componente de marea meteorológica que lo integra, es así, como los escenarios 1 y 3 se establecieron mediante la conformación de una marea meteorológica calculada por un análisis valores extremo, aplicado al residuo entre la serie del nivel del mar y la marea astronómica (sección 5.4.3.1) para periodos de retorno de 25 y 50 años, mientras, en los escenarios 2 y 4, la marea meteorológica se determinó a partir de la evaluación de los parámetros individuales que la conforman (efectos por presión y viento).

De los niveles de diseño convencional expuesto en la Tabla 28 se seleccionan los escenarios 1 y 3, que en su conformación permiten tener certidumbre que las

componentes de marea meteorológica y wave set-up son determinadas en función de los periodos de retorno establecidos en las bases de diseño, esta diferencia respecto de los demás escenarios se logra principalmente debido a la metodología aplicada en la marea meteorológica, todo lo contrario se observa en el desarrollo de este fenómeno mediante sus componentes de presión atmosférica y viento, donde, a causa de las metodologías utilizadas no es posible plantear resultados en base a periodos de retorno propuestos.

Una vez establecidos los dos escenarios que integran los niveles de diseño convencional se planteó, a través de la aplicación de técnicas de cópulas en un estudio bivariado la evaluación de niveles de diseño alternos a los establecidos, considerando para ello alturas de ola extremas y niveles del mar como las variables que caracterizan el proceso denominado “Probabilidades Conjuntas Extremas”. La probabilidad conjunta se refiere a dos o más variables ambientales parcialmente relacionadas que ocurren simultáneamente para producir una respuesta de interés (Hawkes, et al., 2002), en este caso, niveles de diseño. Los niveles proyectados mediante este método por efectos diferenciativos reciben el nombre de “probabilístico”.

Los niveles de diseño probabilístico (CP) se definieron a partir de los resultados expuestos en la Figura 42, donde, debido a la importancia de la altura de ola en el diseño de obras marítimas, estos niveles se plantearon en función al parámetro antes mencionado, es así, como para los periodos de retorno de 25 y 50 años, las alturas de ola máximas corresponden a 4.53 y 4.94 [m] cuando el nivel del mar se encuentra en los 0.92 [m] (nivel medio del mar). En resumen, para un nivel de diseño probabilístico se contemplan los siguientes escenarios:

- Escenario 5, ocurrencia conjunta del nivel medio del mar, junto a un wave set-up, parámetros estimados para un periodo de retorno de 25 años.
- Escenario 6, ocurrencia conjunta del nivel medio del mar, junto a un wave set-up, parámetros estimados para un periodo de retorno de 50 años.

Con la finalidad de que las componentes que integran cada escenario de un nivel de diseño (convencional y probabilístico) sean equivalentes unas de otras, las magnitudes de alturas ola obtenidas de la Figura 42 (4.53 y 4.94 [m]) se expresan en términos de su wave set-up, obteniendo de esta manera lo expuesto en la Tabla 29.

**Tabla 29:** Niveles de diseño probabilístico.

<b>Componente</b>	<b>Escenario 5</b>	<b>Escenario 6</b>
1 Nivel del mar	0.92	0.92
2 Altura de ola		
2.1 Wave Set-up	1.22	1.30
<b>Nivel de diseño</b>	<b>2.14 [m] NRS</b>	<b>2.22 [m] NRS</b>

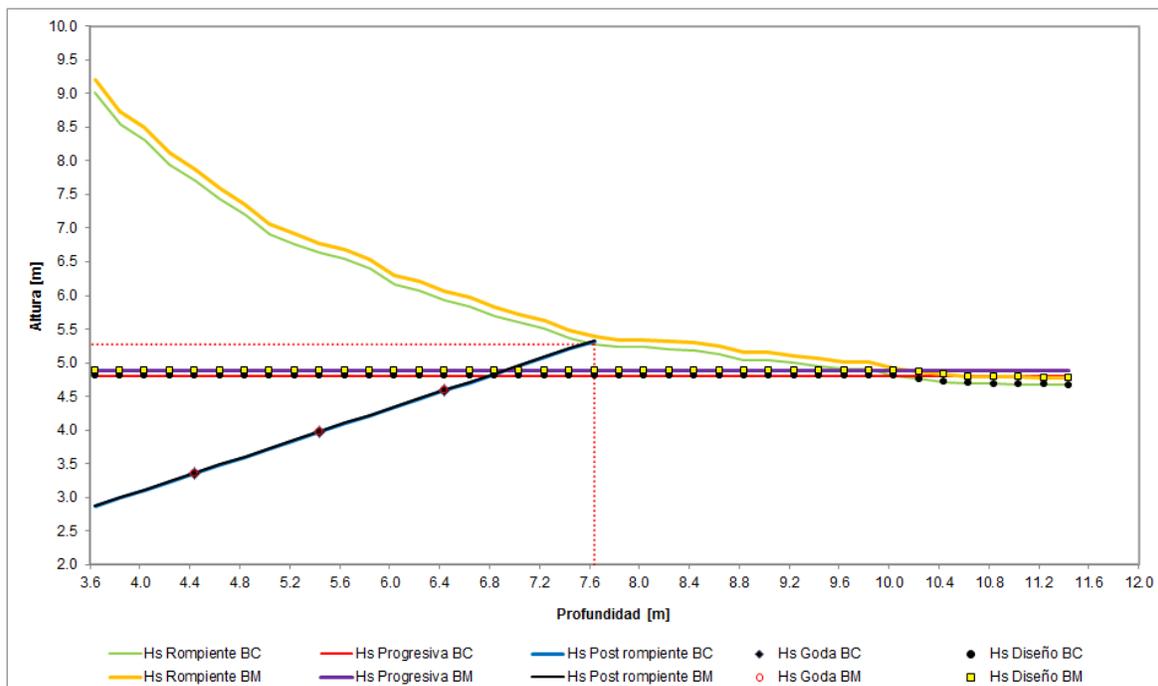
Fuente: Elaboración propia.

## 5.5 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE

La Figura 66 y Figura 67 del Anexo E, presenta imágenes de la topo-batimetría desarrollada por la empresa consultora GHD en la zona donde se emplaza la obra. En base a esta información se asume una proyección de la defensa costera no más allá del veril  $-3.0$  [m] NRS de profundidad, considerando este último parámetro como el caso más desfavorable. De esta manera, se analizan alturas a las cotas  $-3.0$ ,  $-2.0$  y  $-1.0$  [m] NRS.

Parte de los resultados del cálculo de las alturas de ola en la zona rompiente se pueden apreciar gráficamente en la Figura 43. En ella, se exponen los valores comparativos entre las alturas de ola calculas para uno de los escenarios planteados en el esquema metodológico expuesto en la sección 4.6. El detalle de los parámetros utilizados en la confección de cada caso, junto a los demás escenarios propuestos se pueden observar en el Anexo E sección 14. En cuanto a la Figura 43, es posible destacar que la altura de diseño propuesta por Goda (“Hs Goda” en la gráfica) corresponde al mínimo valor seleccionado entre las tres condiciones de altura de ola establecidas (en rompiente, progresiva y post rompiente). Al analizar la zona rompiente, se observa, que en las profundidades proyectas como “pie de la obra” las alturas de ola se encuentran en una condición post rompiente, lo que indica un oleaje ya roto, es por este motivo que se considera como altura de diseño (“Hs Diseño”) el mínimo valor estimado entre la condición de altura en rotura y altura progresiva, no descartando de los análisis, con fines comparativos, la inclusión de la altura de ola post rompiente como parámetro de diseño.

**Figura 43:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla 30, se presenta un resumen con los parámetros más importantes utilizados en el cálculo de las alturas de ola en zona rompiente, además de los resultados de las alturas de diseño evaluadas en las cotas al pie de la obra de -3.0, -2.0 y -1.0 [m] NRS.

**Tabla 30:** Estimación de alturas de ola en zona rompiente.

Parámetros de diseño		Batimetría completa			Batimetría modificada			
Nivel de diseño convencional	<b>Periodo de retorno 25 años</b>							
	Altura de diseño en punto de control	H [m]	4.53			4.63		
	Nivel de diseño convencional	CC [m]	3.44			3.44		
	Cota del fondo, referida al NRS	Z [m]	-3.0	-2.0	-1.0	-3.0	-2.0	-1.0
	Profundidad total evaluada	h [m]	6.44	5.44	4.44	6.44	5.44	4.44
		Post rompiente	<b>4.59</b>	<b>3.97</b>	<b>3.36</b>	<b>4.60</b>	<b>3.98</b>	<b>3.37</b>
	<b>Altura de ola significativa [m]</b>	Progresiva	<b>4.81</b>	<b>4.81</b>	<b>4.81</b>	<b>4.88</b>	<b>4.88</b>	<b>4.88</b>
		Rompiente	5.93	6.63	7.71	6.06	6.78	7.87
	<b>Periodo de retorno 50 años</b>							
	Altura de diseño en punto de control	H [m]	4.94			5.04		
	Nivel de diseño convencional	CC [m]	4.19			4.19		
	Cota del fondo, referida al NRS	Z [m]	-3.0	-2.0	-1.0	-3.0	-2.0	-1.0
	Profundidad total evaluada	h [m]	7.19	6.19	5.19	7.19	6.19	5.19
		Post rompiente	<b>5.08</b>	<b>4.47</b>	<b>3.85</b>	<b>5.09</b>	<b>4.48</b>	<b>3.86</b>
<b>Altura de ola significativa [m]</b>	Progresiva	<b>5.11</b>	<b>5.11</b>	<b>5.11</b>	<b>5.19</b>	<b>5.19</b>	<b>5.19</b>	
	Rompiente	6.52	7.28	8.40	6.65	7.43	8.57	
Parámetros de diseño		Batimetría completa			Batimetría modificada			
Nivel de diseño probabilístico	<b>Periodo de retorno 25 años</b>							
	Altura de diseño en punto de control	H [m]	4.53			4.63		
	Nivel de diseño probabilístico	CC [m]	2.14			2.14		
	Cota del fondo, referida al NRS	Z [m]	-3.0	-2.0	-1.0	-3.0	-2.0	-1.0
	Profundidad total evaluada	h [m]	5.14	4.14	3.14	5.14	4.14	3.14
		Post rompiente	<b>3.79</b>	<b>3.17</b>	<b>2.56</b>	<b>3.80</b>	<b>3.20</b>	<b>2.60</b>
	<b>Altura de ola significativa [m]</b>	Progresiva	<b>4.81</b>	<b>4.81</b>	<b>4.81</b>	<b>4.88</b>	<b>4.88</b>	<b>4.88</b>
		Rompiente	6.91	7.94	8.97	7.06	8.11	9.16
	<b>Periodo de retorno 50 años</b>							
	Altura de diseño en punto de control	H [m]	4.94			5.04		
	Nivel de diseño probabilístico	CC [m]	2.22			2.22		
	Cota del fondo, referida al NRS	Z [m]	-3.0	-2.0	-1.0	-3.0	-2.0	-1.0
	Profundidad total evaluada	h [m]	5.22	4.22	3.22	5.22	4.22	3.22
		Post rompiente	<b>3.87</b>	<b>3.25</b>	<b>2.64</b>	<b>3.88</b>	<b>3.26</b>	<b>2.65</b>
<b>Altura de ola significativa [m]</b>	Progresiva	<b>5.11</b>	<b>5.11</b>	<b>5.11</b>	<b>5.19</b>	<b>5.19</b>	<b>5.19</b>	
	Rompiente	7.38	8.50	9.68	7.53	8.68	9.87	

Fuente: Elaboración propia.

## 5.6 APLICACIÓN CASO PRÁCTICO

### 5.6.1 CRITERIOS MARÍTIMOS DE DISEÑO

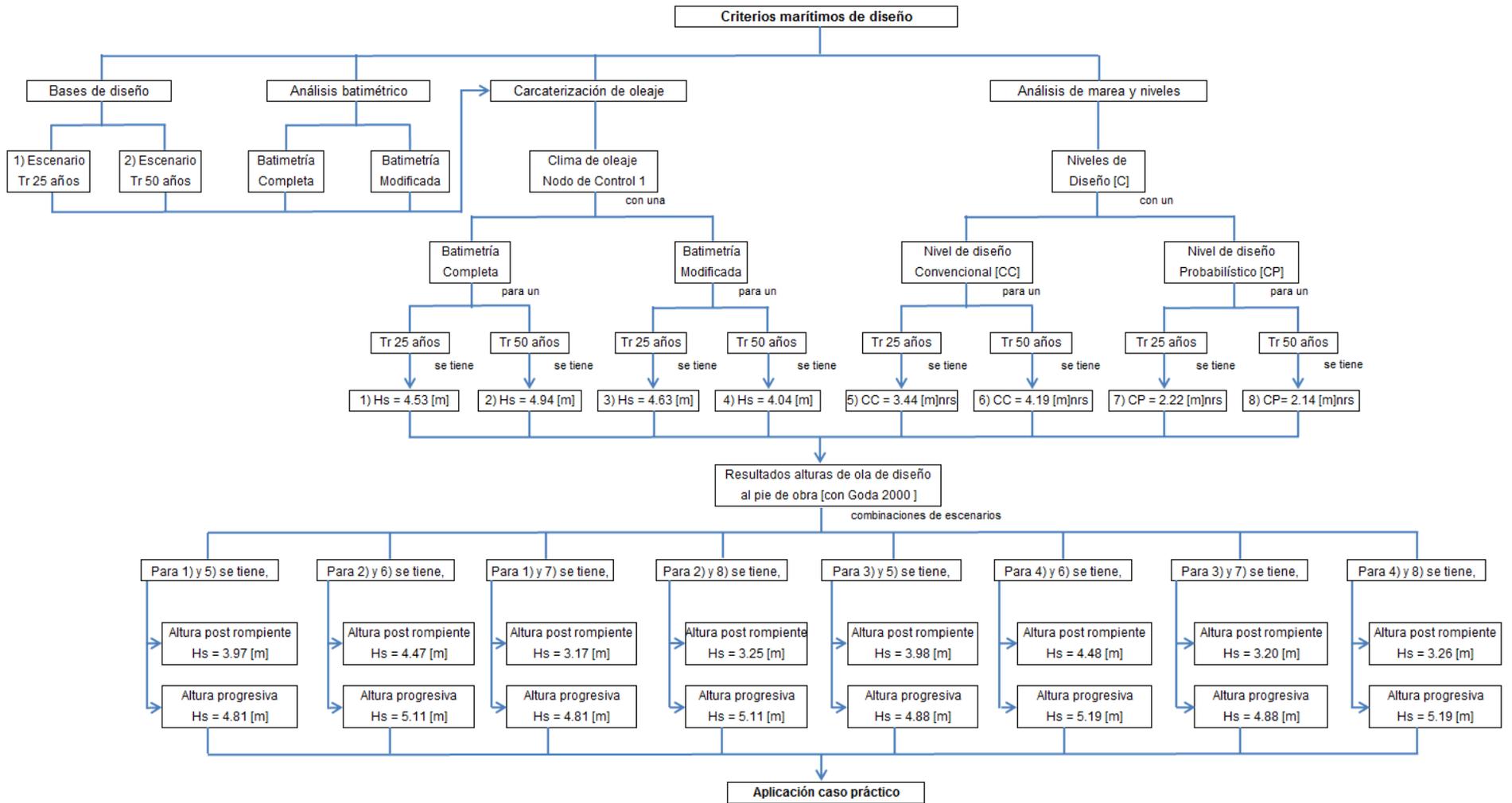
El presente capítulo tiene por objetivo resumir los criterios preliminares de diseño, aplicados al pre-diseño de una defensa costera en el sector de Juan de Saavedra. Estos criterios están basados en los resultados obtenidos de los estudios realizados en el acápite 5, y cuya síntesis (de criterios) es posible observar en el esquema presentado en la Figura 44.

El esquema de la Figura 44 comienza (de izquierda a derecha) con el planteamiento de las “Bases de diseño”, donde a partir de un riesgo y una vida útil establecida, se obtienen dos escenarios de periodo de retorno equivalentes a 25 y 50 años. Para el segundo criterio, se desarrolló un enfoque comparativo denominado “Análisis batimétrico” que permitió la construcción de dos batimetrías con diferente densidad de información, batimetrías designadas como “Batimetría Completa y “Batimetría Modificada”. El tercer criterio de diseño expuesto en el esquema corresponde a una “Caracterización de oleaje”, que para su desarrollo, utilizo los primeros dos criterios antes mencionados, propagando a través de la Batimetría Completa y la Batimetría Modificada toda la estadística de oleaje desde aguas profundas hasta el Nodo de Control 1, y seleccionado en este nodo, los valores extremos equivalentes a los escenarios de 25 y 50 años de periodo de retorno, obteniéndose en resumen, los cuatro valores de altura de ola exhibidos en la Figura 44. En cuanto al último criterio diseño, este corresponde a un “Análisis de marea y niveles”, que planteo como objetivo elaborar dos niveles de diseño, uno “convencional” y otro “probabilístico”, que en conformidad a los escenarios de periodos de retorno establecidos dan como resultado cuatro valores de niveles de diseño.

Cada resultado descrito anteriormente se utilizó a través de una combinación de escenarios (de periodo de retorno, altura de ola y nivel de diseño) en la metodología de Goda 2000, con el propósito de estimar las alturas de diseño al pie de la obra. El resultado, dos condiciones de altura de diseño, una denominada post rompiente y otra progresiva. Cada valor altura de ola resultante para las dos condiciones antes mencionadas, junto a la combinación de escenarios utilizados en cada caso, se presentan en el esquema de la Figura 44.

Finalmente, para cuantificar las diferencias adquiridas mediante estos procesos, cada par de alturas de ola fueron evaluadas en un caso práctico de defensa costera, a través de su diseño de estabilidad y su diseño hidráulico (secciones 5.6.2 y 5.6.3).

**Figura 44:** Esquema resumen de los criterios preliminares de diseño, utilizados para el pre-diseño de la defensa costera.



Fuente: Elaboración propia.

## 5.6.2 DISEÑO DE ESTABILIDAD

Se consideran las formulaciones de Hudson (1959) y Van der Meer (1988) para estimar el peso de los elementos que componen la coraza exterior de la defensa costera, formulaciones planteadas sólo para una configuración del tipo tronco, utilizando como parámetros generales, un peso específico de roca igual 2.65 [ton/m<sup>3</sup>], peso específico del agua de mar igual a 1.025 [ton/m<sup>3</sup>], y un talud de escollera 1:2 (V: H) (cot 2).

Las alturas significativas utilizadas en el cálculo del peso y dimensionamiento de los elementos son los parámetros obtenidos en la estimación de la altura de oleaje en zona rompiente, diferenciándose en alturas progresivas y post rompiente. La altura progresiva es el parámetro seleccionado como altura de diseño, observándose por contraparte, un análisis con la altura de ola post rompiente como parámetro de diseño, con la finalidad de exponer las diferencias que provoca, al diseño estructural, la elección de una altura de diseño respecto de otra. En este análisis se incluye además, la variación en magnitud de las alturas de ola producto de la Batimetría Completa y Batimetría Modificada.

- **Fórmula de Hudson (1959)**

En la utilización de la fórmula de Hudson se asume un tipo de canto rugoso y angular de colocación aleatoria (*random*) para una naturaleza de oleaje no roto, considerando un porcentaje de avería 5%. Los parámetros utilizados, junto con los resultados obtenidos se observan en las Tablas 31 y 32 para el nivel de diseño convencional y probabilístico respectivamente.

**Tabla 31:** Peso y Dimensiones de los elementos para un nivel de diseño convencional.

Parámetros de diseño				Batimetría Completa	Batimetría Modificada	Batimetría Completa	Batimetría Modificada
Nivel de diseño convencional	Densidad volumétrica del material	$\rho_s$	[ton/m <sup>3</sup> ]	2.65	2.65	2.65	2.65
	Densidad volumétrica del agua	$\rho_w$	[ton/m <sup>3</sup> ]	1.025	1.025	1.025	1.025
	Angulo del talud con respecto a la horizontal	cot ( $\alpha$ )		2.0	2.0	2.0	2.0
	Constante de estabilidad	KD		4.0	4.0	4.0	4.0
	<b>Periodo de retorno 25 años</b>			<b>Alturas progresivas</b>		<b>Alturas post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	H = H1/3	[m]	4.81	4.88	3.97	3.98
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W</b>	<b>[ton]</b>	<b>9.25</b>	<b>9.66</b>	<b>5.20</b>	<b>5.24</b>
	<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn</b>	<b>[m]</b>	<b>1.52</b>	<b>1.54</b>	<b>1.25</b>	<b>1.26</b>
	<b>Periodo de retorno 50 años</b>			<b>Alturas progresivas</b>		<b>Alturas post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	H = H1/3	[m]	5.11	5.19	4.47	4.48
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W</b>	<b>[ton]</b>	<b>11.09</b>	<b>11.62</b>	<b>7.42</b>	<b>7.47</b>
	<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn</b>	<b>[m]</b>	<b>1.61</b>	<b>1.64</b>	<b>1.41</b>	<b>1.41</b>

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos en la Tabla 31, se desprenden las siguientes observaciones:

- Utilizando como altura de diseño una condición progresiva de periodo de retorno 25 años para una Batimetría Completa, con valor igual a 4.81 [m] se obtiene un tamaño de roca equivalente a 9.25 [ton], mientras, para la misma condición progresiva de valor 4.88 [m], periodo de retorno 25 años y Batimetría Modificada, el peso de roca estimado es aproximadamente 9.66 [ton]. Es decir, estas diferencias iniciales en altura, cuantificadas en 0.07 [m] se traducen en diferencias de 0.41 [ton] en el peso de los elementos de protección.
- Por otra parte, al emplear como altura de diseño una condición post rompiente de periodo de retorno 25 años para una Batimetría Completa, con valor igual a 3.97 [m] se obtiene un tamaño de roca igual a 5.20 [ton], mientras, para la misma condición de altura y periodo de retorno, pero, utilizando el valor de altura 3.98 [m] obtenido por la Batimetría Modificada se tiene un valor del peso de la roca igual a 5.24 [ton]. En este caso, se observa, que la diferencia inicial de 0.01 [m] en la altura de ola se transforma en una diferencia de 0.04 [ton] en el peso de la roca.
- En cuanto al periodo de retorno de 50 años, se tiene, para una condición progresiva de Batimetría Completa un valor de altura de ola igual a 5.11 [m] con lo que se estima un tamaño de roca igual a 11.09 [ton]. Para la condición progresiva de Batimetría Modificada con valor de altura 5.19 [m] se obtiene un tamaño de roca estimado en 11.62 [ton]. Los valores expuesto anteriormente indican que estas diferencias en las alturas de ola, cuantificadas en 0.08 [m], se traducen finalmente en una diferencia en el tamaño de la roca igual a 0.53 [ton].
- En relación al periodo de retorno de 50 años y condición de altura post rompiente, se tiene un valor de altura de ola igual 4.47 [m] para la Batimetría Completa, con lo cual, el tamaño del elemento resultante es 7.42 [ton], mientras, al utilizar el valor de altura de la Batimetría Modificada igual 4.48 [m] se obtiene una roca de 7.47 [ton]. Se observa, que las diferencias iniciales de estas alturas, cuantificadas en 0.01 [m], se traducen en diferencias de 0.05 [ton] en el peso de roca.

**Tabla 32:** Peso y Dimensiones de los elementos, para un nivel de diseño probabilístico.

Parámetros de diseño			Batimetría	Batimetría	Batimetría	Batimetría	
			Completa	Modificada	Completa	Modificada	
Nivel de diseño probabilístico	Densidad volumétrica del material	$\rho_s$ [ton/m <sup>3</sup> ]	2.65	2.65	2.65	2.65	
	Densidad volumétrica del agua	$\rho_w$ [ton/m <sup>3</sup> ]	1.025	1.025	1.025	1.025	
	Angulo del talud con respecto a la horizontal	$\cot(\alpha)$	2.0	2.0	2.0	2.0	
	Constante de estabilidad	KD	4.0	4.0	4.0	4.0	
	<b>Periodo de retorno 25 años</b>			<b>Alturas progresivas</b>		<b>Alturas post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	H = H1/3 [m]	4.81	4.88	3.17	3.20	
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W [ton]</b>	<b>9.25</b>	<b>9.66</b>	<b>2.65</b>	<b>2.72</b>	
	<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn [m]</b>	<b>1.52</b>	<b>1.54</b>	<b>1.00</b>	<b>1.01</b>	
	<b>Periodo de retorno 50 años</b>			<b>Alturas progresivas</b>		<b>Alturas post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	H = H1/3 [m]	5.11	5.19	3.25	3.26	
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W [ton]</b>	<b>11.09</b>	<b>11.62</b>	<b>2.85</b>	<b>2.88</b>	
	<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn [m]</b>	<b>1.61</b>	<b>1.64</b>	<b>1.03</b>	<b>1.03</b>	

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos en la Tabla 32, se desprenden las siguientes observaciones:

- En la condición progresiva de altura de ola, los valores obtenidos del peso de los elementos de protección son idénticos a los expuestos en la Tabla 31 para la misma condición de altura, esto se debe principalmente, a que en ambas tablas, los valores de altura que conforman los parámetros de diseño son exactamente los mismos. Esta igualdad en los valores proviene de la determinación y posterior elección del tipo de altura de ola considerada como factor de diseño (sección 5.5), donde se designó como altura de ola de diseño la condición progresiva, siendo estos resultados de altura los que no presentan diferencias (permanecen constantes) debido a la formula implícita en su estimación, en cuyo proceso de obtención el parámetro de profundidad no es un factor demasiado relevante.
- En cuanto a la utilización como altura de diseño de una condición post rompiente, específicamente de periodo de retorno 25 años para una Batimetría Completa, con valor igual a 3.17 [m] se obtiene un tamaño de roca estimado en 2.65 [ton], mientras, para la misma condición de altura y periodo de retorno, pero, utilizando el valor de altura 3.20 [m] obtenido para la Batimetría Modificada se tiene un valor del peso de roca igual a 2.72 [ton]. De lo expuesto anteriormente, se entiende que, por la poca diferencia inicial en la altura de ola de 0.03 [m], existe una mínima diferencia en los resultado del peso de la roca entre una alternativa de altura y otra, diferencias cuantificada en 0.07 [ton].
- En relación al periodo de retorno de 50 años y condición de altura post rompiente, se tiene un valor de altura de ola igual 3.25 [m] para la Batimetría Completa, con lo cual, el tamaño del elemento resultante es 2.85 [ton], mientras, al utilizar el valor de altura de la Batimetría Modificada igual 3.26 [m] se obtiene una roca de 2.88

[ton]. Se observa, que las diferencias iniciales de estas alturas, cuantificadas en 0.01 [m], se traducen en diferencias de 0.03 [ton] en el peso de roca.

- **Fórmula de Van der Meer (1988)**

En esta sección, el peso de los elementos de protección se determina considerando una permeabilidad de 0.4 para la estructura, asumiendo un nivel de daño igual 5, para una duración de tormenta cercana a las 15 horas (aproximadamente 5000 olas activas con periodo de 11 [s]). El detalle de los parámetros empleados, junto con los resultados obtenidos para el nivel de diseño convencional se presenta en la Tabla 33, en cuanto a los resultados de la utilización de un nivel probabilístico como parámetro de diseño, estos, se exponen en la Tabla 76 del Anexo F, debido principalmente a que los valores obtenidos para ese nivel de diseño en la condición de altura progresiva son idénticos a los mostrados, para esta índole, en la Tabla 33 (caso similar a los expuesto en la formulación de Hudson).

**Tabla 33:** Peso y Dimensiones de los elementos, para un nivel de diseño convencional.

Parámetros de diseño				Batimetría Completa	Batimetría Modificada	Batimetría Completa	Batimetría Modificada	
Nivel de diseño convencional	Periodo peak	Tp	[s]	11.0	11.0	11.0	11.0	
	Periodo medio	Tm	[s]	10.0	10.0	10.0	10.0	
	Longitud de ola media	Lom	[m]	156.0	156.0	156.0	156.0	
	Peralte de ola	Sm		0.031	0.031	0.025	0.026	
	Densidad volumétrica del material	$\rho_s$	[ton/m <sup>3</sup> ]	2.65	2.65	2.65	2.65	
	Densidad volumétrica del agua	$\rho_w$	[ton/m <sup>3</sup> ]	1.025	1.025	1.025	1.025	
	Angulo del talud con respecto a la horizontal	cot ( $\alpha$ )		2.0	2.0	2.0	2.0	
	Permeabilidad	P		0.40	0.40	0.40	0.40	
	Numero de olas activas	Nz		4909	4909	4909	4909	
	Nivel de daño	S		5.0	5.0	5.0	5.0	
	Parámetro de Iribarren	$\epsilon_m$		2.85	2.83	3.13	3.13	
	Parámetro límite de Iribarren	$\epsilon_{mc}$		3.77	3.77	3.77	3.77	
	<b><u>Periodo de retorno 25 años</u></b>				<b>Alturas progresivas</b>		<b>Alturas post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	H = H1/3	[m]	4.81	4.88	3.97	3.98	
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W</b>	<b>[ton]</b>	<b>11.93</b>	<b>12.32</b>	<b>7.75</b>	<b>7.79</b>	
	<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn</b>	<b>[m]</b>	<b>1.651</b>	<b>1.669</b>	<b>1.430</b>	<b>1.432</b>	
<b><u>Periodo de retorno 50 años</u></b>				<b>Alturas progresivas</b>		<b>Alturas post rompiente</b>		
Altura significativa de diseño	H = H1/3	[m]	5.11	5.19	4.47	4.48		
<b>Peso de la roca</b>	<b>W</b>	<b>[ton]</b>	<b>13.67</b>	<b>14.16</b>	<b>10.12</b>	<b>10.17</b>		
<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn</b>	<b>[m]</b>	<b>1.728</b>	<b>1.748</b>	<b>1.563</b>	<b>1.565</b>		

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos en la Tabla 43, se desprenden las siguientes observaciones:

- Utilizando como altura de diseño la condición progresiva de periodo de retorno 25 años para una Batimetría Completa, con valor igual a 4.81 [m] se obtiene un tamaño de roca equivalente a 11.93 [ton], mientras, para la misma condición progresiva de valor 4.88 [m], periodo de retorno 25 años y Batimetría Modificada, el peso de roca estimado es aproximadamente 12.32 [ton]. Es decir, estas diferencias iniciales en altura, cuantificadas en 0.07 [m], se traducen en diferencias de 0.39 [ton] en el peso de los elementos de protección.
- Por otra parte, al emplear como altura de diseño una condición post rompiente de periodo de retorno 25 años para una Batimetría Completa, con valor igual a 3.97 [m] se obtiene un tamaño de roca igual a 7.75 [ton], mientras, para la misma condición de altura y periodo de retorno, pero, utilizando el valor de altura 3.98 [m] obtenido por la Batimetría Modificada se tiene un valor del peso de la roca igual a 7.79 [ton]. En este caso, se observa, que la diferencia inicial de 0.01 [m] en la altura de ola se convierte en una diferencia de 0.04 [ton] en el peso de la roca.
- En cuanto al periodo de retorno de 50 años, se tiene, para una condición progresiva de Batimetría Completa un valor de altura de ola igual a 5.11 [m] con lo que se estima un tamaño de roca igual a 13.67 [ton]. Para la condición progresiva de Batimetría Modificada con valor de altura 5.19 [m] se obtiene un tamaño de roca estimado en 14.16 [ton]. Los valores expuesto anteriormente indican que estas diferencias en las alturas de ola, cuantificadas en 0.08 [m], se traducen finalmente en una diferencia en el tamaño de la roca igual a 0.49 [ton].
- En relación al periodo de retorno de 50 años y condición de altura post rompiente, se tiene, un valor de altura de ola igual 4.47 [m] para la Batimetría Completa, con lo cual, el tamaño del elemento resultante es 10.12 [ton], mientras, al utilizar el valor de altura de la Batimetría Modificada igual 4.48 [m] se obtiene una roca de 10.17 [ton]. Se observa, que las diferencias iniciales de estas alturas, cuantificadas en 0.01 [m], se traducen en diferencias de 0.05 [ton] en el peso de roca.
- En cuanto a la utilización de un nivel de diseño probabilístico, el lector podrá encontrar en la Tabla 76 del Anexo F que los valores resultantes para la condición progresiva son idénticos mostrados en Tabla 33, mientras, para la condición post rompiente de periodo de retorno 25 años y Batimetría Completa, se tiene una altura de ola de 3.17 [m], lo que arroja un peso de roca estimado en 3.41 [ton]. Para la misma condición pero de valor 3.20 [m] de altura, correspondiente a la Batimetría Modificada, se obtiene un peso de roca igual 3.47 [ton]. En este caso, una diferencia de altura estimada en 0.03 [m] corresponden a una desigualdad en el peso de los elementos de roca igual a 0.06 [ton]. Siguiendo el mismo análisis en la condición post rompiente para periodo de retorno 50 años, se tiene, para la Batimetría Completa una altura de 3.25 [m] arrojando un tamaño de 4.94 [ton], en cuanto a la altura inicial de 3.26 [m] correspondiente a la Batimetría Modificada se obtiene un valor en el peso de la roca de 4.97 [ton]. Los valores expuestos para el periodo de retorno de 50 años dan cuenta que una diferencia inicial en la altura de ola de 0.01 [m] se traduce en una desigualdad de 0.03 [ton] en el tamaño de la roca.

### 5.6.3 DISEÑO HIDRÁULICO

En este apartado, la tasa de sobrepaso admisible se estimó utilizando la tabla mostrada en la Figura 76 Anexo F, propuesta el por el *Coastal Engineering Manual* en su capítulo “*Surf Zone Hydrodynamic*”. Con base en esta ilustración, se adoptó un sobrepaso admisible medio-bajo equivalente a 2.0 [l/s/m] para una condición extrema. La utilización de un caudal admisible como el seleccionado indica que la seguridad estructural de la defensa costera se verá afectada por daños si es talud interior no se encuentra protegido (daños controlables), mientras desde el punto de vista de la seguridad funcional, este caudal admisible indica condiciones inseguras en el tránsito de vehículos a cualquier velocidad, junto con ser considerado una zona peligrosa para peatones.

El caudal de sobrepaso se calculó mediante la formulación expuesta en la EurOtop (2018), obteniéndose diferentes cotas de coronamiento para la estructura en función al nivel de diseño adoptado, y a las diferencias en las alturas de ola evaluadas (solo se consideró la utilización de la condición de altura de ola progresiva). Para efectos del pre-diseño de la defensa costera los resultados se presentan en la Tabla 34 y en Tabla 35.

**Tabla 34:** Caudal de sobrepaso estimado considerando un nivel de diseño convencional.

Parámetros de diseño			Batimetría Completa	Batimetría Modificada	
	Aceleración de gravedad	g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	9.81	
	Periodo peak	T <sub>p</sub> [s]	11	11	
	Dirección de incidencia sobre la estructura	Dir [°]	312	312	
	coeficiente de reducción por rugosidad	γ <sub>f</sub>	0.40	0.40	
	Angulo de incidencia respecto a la normal al dique	β [°]	17	17	
	coeficiente de reducción por incidencia del oleaje	γ <sub>β</sub>	0.89	0.89	
	<b>Periodo de retorno 25 años</b>		<b>Altura progresiva</b>		
Nivel de diseño convencional	Altura de ola significativa en el pie del rompeolas	H <sub>mo</sub> [m]	4.81	4.88	
	Nivel de diseño	C [m]	3.44	3.44	
	<b>Francobordo</b>	R <sub>c</sub> [m]	5.97	6.07	
	<b>Francobordo desde NRS</b>	<b>R<sub>c</sub> NRS</b> [m]	<b>9.41</b>	<b>9.51</b>	
	<b>Sobrepaso Estimado</b>	<b>q</b> [l/s/m]	<b>1.97</b>	<b>1.97</b>	
	Sobrepaso Admisible	q <sub>adm</sub> [l/s/m]	2.0	2.0	
	<b>Condición</b>		<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>	
		<b>Periodo de retorno 50 años</b>		<b>Altura progresiva</b>	
	Altura de ola significativa en el pie del rompeolas	H <sub>mo</sub> [m]	5.11	5.19	
	Nivel de diseño	C [m]	4.19	4.19	
<b>Francobordo</b>	R <sub>c</sub> [m]	6.40	6.51		
<b>Francobordo desde NRS</b>	<b>R<sub>c</sub> NRS</b> [m]	<b>10.59</b>	<b>10.70</b>		
<b>Sobrepaso Estimado</b>	<b>q</b> [l/s/m]	<b>1.98</b>	<b>1.99</b>		
Sobrepaso Admisible	q <sub>adm</sub> [l/s/m]	2.0	2.0		
<b>Condición</b>		<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>		

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos en la Tabla 34, se desprenden las siguientes observaciones:

- En cuanto al nivel de diseño convencional, utilizando como altura de diseño un valor de 4.81 [m] (condición progresiva) de periodo de retorno 25 años para una Batimetría Completa, se obtiene, en cumplimiento de la tasa de sobrepaso admisible, un francobordo ( $R_c$ ) de 5.97 [m] (9.41 [m] con respecto al NRS) equivalente a un caudal de sobrepaso estimado de 1.97 [lts/s/m]. En cuanto al mismo escenario de periodo de retorno, pero, utilizando un valor de altura de 4.88 [m] producto de la Batimetría Modificada, se tiene un  $R_c$  de 6.07 [m] (9.51 mNRS) para cumplir con el caudal admisible propuesto, lo que deriva en la obtención de un sobrepaso estimado de 1.97 [lts/s/m]. De los valores expuestos anteriormente, se puede apreciar que una diferencia inicial en la altura de ola de 0.07 [m] se traduce finalmente en una diferencia en el coronamiento de la estructura de 0.10 [m].
- El periodo de retorno de 50 años se evaluó en base al mismo valor propuesto de sobrepaso admisible, con esto, para un valor de altura de 5.11 [m] correspondiente a la Batimetría Completa, se estima un  $R_c$  de 6.40 [m] (10.59 mNRS) con caudal aproximado de 1.98 [lts/s/m], por otra parte, al enfocar el análisis en la altura de diseño obtenida de la Batimetría Modificada con valor 5.19 [m], se obtiene un  $R_c$  con una coronación aproximada de 6.51 [m] (10.70 mNRS) que produce un caudal estimado de 1.99 [lts/s/m]. De los datos indicados en este escenario, se observa, que la diferencia inicial de altura de ola cuantificada en 0.08 [m], se convierte en una diferencia de 0.11 [m] en la proyección de la coronación del francobordo.

**Tabla 35:** Caudal de sobrepaso estimado considerando un nivel de diseño probabilístico.

Parámetros de diseño			Batimetría Completa	Batimetría Modificada	
Nivel de diseño probabilístico	Aceleración de gravedad	g [m/s <sup>2</sup> ]	9.81	9.81	
	Periodo peak	Tp [s]	11	11	
	Dirección de incidencia sobre la estructura	Dir [°]	312	312	
	coeficiente de reducción por rugosidad	$\gamma_f$	0.40	0.40	
	Angulo de incidencia respecto a la normal al dique	$\beta$ [°]	17	17	
	coeficiente de reducción por incidencia del oleaje	$\gamma_\beta$ □	0.89	0.89	
	<b>Periodo de retorno 25 años</b>		<b>Altura progresiva</b>		
	Altura de ola significativa en el pie del rompeolas	Hmo [m]	4.81	4.88	
	Nivel de diseño	c [m]	2.14	2.14	
	<b>Francobordo</b>	Rc [m]	5.97	6.07	
	<b>Francobordo desde NRS</b>	<b>Rc NRS [m]</b>	<b>8.11</b>	<b>8.21</b>	
	<b>Sobrepaso Estimado</b>	<b>q [l/s/m]</b>	<b>1.97</b>	<b>1.97</b>	
	Sobrepaso Admisible	qadm [l/s/m]	2.0	2.0	
	<b>Condición</b>		<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>	
<b>Periodo de retorno 50 años</b>		<b>Altura progresiva</b>			
Altura de ola significativa en el pie del rompeolas	Hmo [m]	5.11	5.19		
Nivel de diseño	c [m]	2.22	2.22		
<b>Francobordo</b>	Rc [m]	6.40	6.51		
<b>Francobordo desde NRS</b>	<b>Rc NRS [m]</b>	<b>8.62</b>	<b>8.73</b>		
<b>Sobrepaso Estimado</b>	<b>q [l/s/m]</b>	<b>1.98</b>	<b>1.99</b>		
Sobrepaso Admisible	qadm [l/s/m]	2.0	2.0		
<b>Condición</b>		<b>Cumple</b>	<b>Cumple</b>		

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados expuestos en la Tabla 35, se desprenden las siguientes observaciones:

- Para este nivel de diseño, utilizando un valor de 4.81 [m] de altura de ola con periodo de retorno 25 años para la Batimetría Completa, se obtiene un francobordo de 5.97 [m], el que aumenta a 8.11 [mNRS] considerando la inclusión a la distancia vertical, del nivel de diseño probabilístico. Con el Rc propuesto anteriormente se obtiene un caudal de sobrepaso estimado de 1.97 [lts/s/m]. En cuanto al escenario de periodo de retorno 25 años considerando un valor de altura 4.88 [m] producto de la Batimetría Modificada, se tiene un Rc de 6.07 [m] (8.21 mNRS) para cumplir con el caudal admisible propuesto, lo que provoca un sobrepaso estimado de 1.97 [lts/s/m]. Al igual que lo expuesto en las observaciones de los resultados de la Tabla 34 equivalentes a la utilización de un nivel de diseño convencional, en esta sección, en la utilización de un nivel de diseño probabilístico las diferencias en altura de ola inicial y diferencias entre los valores de francobordo obtenidos son exactamente los mismos (0.07 [m] en altura de ola y 0.10 [m] en el coronamiento de la estructura).

- Para el caso del periodo de retorno de 50 años de valor de altura 5.11 [m] Batimetría Completa, se estima un coronamiento de la estructura a 6.40 [m] correspondiente a 8.62 [m] desde el NRS, por otra parte, la altura de ola de valor 5.19 [m] de la Batimetría Modificada se traduce en un Rc de 6.51 [m] (8.73 mNRS) que provoca un caudal de sobrepaso estimado de 1.99 [lts/s/m]. De lo descrito anteriormente, se observa, que la diferencia inicial de altura de ola cuantificada en 0.08 [m], se convierte en una diferencia de 0.11 [m] en el coronamiento de la estructura.

## **6 DISCUSIÓN**

De los estudios desarrollados a lo largo del presente proyecto, se desprenden los siguientes puntos a modo de discusión.

### **Respecto del clima extremo de oleaje en el sitio de interés:**

- La aplicación de dos metodologías para comparar la selección de eventos extremos de oleaje en aguas profundas y en el sitio de interés (sección 5.3.2 y sección 5.3.5), permite apreciar diferencias en la conformación de los eventos extremos, donde un evento seleccionado como extremo en aguas profundas no es considerado como tal en el sitio de interés, conjuntamente, se detecta que eventos seleccionados en el Nudo de Control 1 no presentan esa condición en aguas profundas. Los resultados expuestos en estos capítulos dan cuenta además, diferencias metodológicas en ambos procesos, observándose, para el caso de la “selección de eventos extremos en aguas profundas”, que los parámetros extremos de amplitud de ola utilizados para caracterizar el oleaje dependen (su magnitud) directamente de la dirección de incidencia y del periodo con el que se propaguen desde aguas profundas, prueba de esto, son las alturas de ola expuestas en la Tabla 15, sección 5.3.3.2. De estos valores, se obtuvo que las alturas propagadas con dirección NW son notoriamente mayores que las estimadas con dirección NNW, a esto se suma, que el periodo con el que se propaga cada altura dentro de la dirección incidente es una condicionante de las diferencias obtenidas en magnitud. Estas diferencias se traducen en subestimaciones y sobreestimaciones de altura, dependiendo justamente, de las características que se le asignen al oleaje propagado y las condiciones físicas (de abrigo) que presente el sector en estudio. Es esta variabilidad la que no asegura que exista una combinación de características periodo-dirección, que al propagarlas permita tener una confiabilidad en los resultados obtenidos para un punto de control. Por otra parte, la variabilidad que expone la metodología de “selección de eventos extremos en el sitio de interés”, recae en la transferencia de la estadística completa desde aguas profundas hacia aguas someras, acotando las direcciones de incidencia y modificando los campos de alturas en función de las condiciones que presente el lugar de estudio. De este proceso, se obtienen las características del oleaje en el sitio de interés, discretizando en base a esto, la obtención de los eventos extremos obviando en este caso, la variabilidad de los resultados respecto de la dirección y el periodo con el que se propaguen los parámetros desde aguas profundas (resultados expuestos en la Tabla 20).

### **Respecto de la estimación de altura de oleaje en zona rompiente:**

- Según la referencia utilizada, la altura de diseño es el mínimo valor estimado entre las tres alturas calculadas para las profundidades vinculadas a las cotas -3.0, -2.0 y -1.0 [m] NRS, denominadas para el análisis como “Hs Goda”. Al ampliar este análisis e incluir profundidades que conforman la denominada zona rompiente, se observa, para todas las gráficas realizadas (Figura 43 y Figuras 68 a 74), que, en las profundidades proyectadas como “pie de la obra” (suma de la cota referida al NRS más el nivel de diseño), las alturas de ola se encuentran en una condición

post rompiente (oleaje ya roto), por este motivo, se considera como altura de diseño (“Hs Diseño”) el mínimo valor estimado entre la condición de altura en rotura y altura progresiva.

- Comparativamente hablando, el estudio propuesto plantea la utilización de las alturas de diseño en el punto de control producto de una Batimetría Completa y una Batimetría Modificada como parámetros iniciales en la obtención de la altura de oleaje al pie de la obra. Estas comparaciones se establecen específicamente por nivel de diseño, ya sea convencional y/o probabilístico, para periodos de retorno de 25 y 50 años. Se cuantifica para los dos periodos de retorno mencionados una diferencia inicial en las alturas de diseño en el punto de control de aproximadamente 0.10 [m] (ver Tabla 30), diferencias que disminuyen una vez implementada la formulación de Goda para la altura de diseño seleccionada (condición progresiva) en aproximadamente 0.07 [m] entre una batimetría y otra para un periodo retorno 25 años, mientras, para un periodo de retorno 50 años la diferencia resultante es 0.08 [m]. En cuanto al caso post rompiente, las diferencias iniciales de 0.10 [m] se reducen considerablemente a 0.01 [m].
- La Figura 71 y Figura 72 mostradas en el Anexo E, permiten comprender, que la utilización de un nivel de diseño respecto de otro afecta significativamente los resultados de las alturas de ola en condición de rotura y post rompiente (valores más energéticos utilizando un nivel de diseño convencional), debido a la relación directa e indirecta que posee la profundidad en la estimación de estos parámetros (en rotura y post rompiente), todo lo contrario se observa en la denominada altura progresiva donde los valores permanecen constantes entre un nivel de diseño y otro, esto debido a que su estimación depende de factores no asociados a profundidades.
- Finalmente, y, en base a los argumentos expuestos anteriormente se hace necesario destacar la importancia que tiene, para la formulación de Goda, la profundidad evaluada en la estimación de la altura de oleaje en zona rompiente, es por este motivo que se sugiere en primera instancia, ampliar la evaluación a un rango de profundidades que formen parte de la zona rompiente, con la finalidad de entender el comportamiento que presentan las alturas de ola en las cercanías costeras para sus tres condiciones establecidas (progresiva, en rotura y post rompiente), en este caso, el entendimiento del proceso permitió definir un criterio para la selección de la altura de ola de diseño.

#### **Respecto del diseño de estabilidad:**

- En cada combinación de parámetros donde se utilizó como condición de diseño una altura de ola post rompiente, los valores obtenidos del tamaño de la roca resultan muy por debajo a los estimados para una condición de altura progresiva, subestimando en demasía el peso de los elementos de protección. Se confirma además, que estas diferencias se incrementan cuando se utiliza un nivel probabilístico como nivel de diseño en la estimación de peso de los elementos de protección.

- En base a lo expuesto en el párrafo anterior se descarta como parámetros de diseño los valores obtenidos utilizando la condición de altura ola post rompiente en el cálculo de los elementos de protección, quedando de esta forma los resultados estimados en función de la condición de altura progresiva. En lo que respecta a las diferencias de altura inducidas por la inclusión en los análisis de una batimetría con variada resolución, se refleja, una sobreestimación en el tamaño de la roca por parte de los valores determinados a través de la Batimetría Modificada, es así como para la formulación de Hudson y escenario de periodo de retorno 25 años, se tiene que, la batimetría construida con motivo de una baja calidad de resolución produce una sobreestimación de un 4.43% en el peso de la roca, mientras para el escenario de 50 años de periodo de retorno existe un 4.47% de sobreestimación en peso del elemento por parte Batimetría Modificada en comparación a los valores obtenidos a través de la Batimetría Completa. La magnitud de estas sobreestimaciones disminuyen levemente al utilizar la fórmula de Van der Meer en el cálculo del peso de la roca, prueba de ello es que, para un escenario de periodo de retorno 25 años existe una diferencia a favor de la Batimetría Modificada en el tamaño de la roca de un 3.26%, en cuanto al escenario de 50 años de periodo de retorno, la cifra obtenida a través de la Batimetría Modificada alcanza una sobreestimación de un 3.58% en el peso del elemento respecto de los valores desarrollados por medio de la Batimetría Completa. Cabe mencionar que la condición de altura de ola progresiva utilizada como parámetro de diseño en esta sección, al no estar influenciada en su cálculo por la profundidad, deriva en valores constantes en el tamaño de la roca independientemente del nivel de diseño adoptado para el cálculo (convencional o probabilístico).
- Detalladas las diferencias entre la utilización de valores obtenidos por medio de una batimetría y otra, se hace necesario comparar los resultados estimados a través del uso de ambas formulaciones. Estos resultados indican que la aplicación de la fórmula de Van der Meer presenta valores más elevados en el tamaño de los elementos (en comparación a la formulación de Hudson), valores que se encuentran entre una diferencia que varía en un rango de un 21 a 29% dependiendo de las condiciones asignadas para el cálculo (escenario de 25 o 50 años de periodo de retorno, altura de diseño producto de la Batimetría Completa o Modificada, etc.).

#### **Respecto del diseño hidráulico:**

- La utilización de dos alturas de ola con variada resolución se manifiestan en diferencias en el coronamiento de la estructura, alcanzando para la Batimetría Modificada valores de hasta un 1.68% más en el francobordo de la estructura.
- La inclusión de dos niveles de diseño afecta significativamente la cota de coronamiento de la estructura, obteniéndose mayores valores de francobordo [mNRS] en la utilización de un nivel de diseño convencional respecto de un nivel probabilístico de diseño. Un desglose de los valores propuestos indica para el escenario de 25 años de periodo de retorno una diferencia a favor del nivel de diseño convencional de 1.30 [m] equivalente a un 13.81% más en el valor de la cota de coronamiento de la estructura, por otra parte, para el escenario de 50 años de periodo de retorno, la diferencia entre el nivel convencional y probabilístico de

diseño se cuantifica en 1.97 [m], diferencia que se traduce finalmente en una cota de coronamiento mayor de un 18.60% para el nivel de diseño convencional respecto del probabilístico.

- En base a los argumentos expuestos anteriormente queda en evidencia las diferencias en la utilización de un nivel propuesto de manera convencional en ingeniería marítima, respecto de otro implementado a través de la utilización de técnicas bivariadas denominadas cópulas (probabilístico). Respecto de este último nivel, al ser considerado no convencional en el ámbito del diseño nacional se puede argumentar que, subestima los parámetros obtenidos del diseño hidráulico según las diferencias que se cuantifiquen con respecto al nivel de diseño convencional, es decir, la subestimación de la cota de coronación de la estructura es directamente proporcional a la obtenida entre ambos niveles de diseño.

#### **Evaluación de resultados:**

- Con la finalidad de interpretar los resultados obtenidos en el proyecto, esta sección del apartado expone, en una primera instancia, cuadros comparativos con los parámetros de diseño estimados a largo del presente estudio. Estos cuadros permiten apreciar las diferencias que tienen en magnitud los valores, cuyo origen de su obtención, se fundamenta en la utilización de dos batimetrías con variada resolución. A partir de este resumen de variables es posible establecer una propuesta de ingeniería básica que represente, a través del diseño de secciones tipo, las diferencias detectadas en el desarrollo de cada actividad.
- En lo que respecta al diseño de estabilidad, específicamente en la estimación del peso de los elementos que componen la coraza exterior de la defensa costera, se consideraron aquellos valores obtenidos mediante la formulación de Hudson (1959), mientras, la estimación del filtro, núcleo y diseño del pie del rompeolas se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones expuestas en el "*Coastal Engineering Manual*". El proceso para la obtención del peso de elementos del filtro, núcleo y pie, junto con la metodología empleada en el diseño del muro de contención utilizado, se presentan en la sección 16.1 y 16.2 del Anexo G.
- En la Tabla 36 se muestra, de manera inicial, las comparaciones de valores para la obra de carácter provisorio de periodo de retorno 25 años, donde se incluyen dos columnas diferenciadoras denominadas "Batimetría Completa" y "Batimetría Modificada". Para la sección "Batimetría Completa" (BC) se tiene un peso unitario de roca estimado en 9.3 [ton], donde se considera un margen mínimo y máximo de un 10% en el tamaño de la roca (mínimo 90% y máximo 110%) con lo que se obtiene finalmente un rango entre un 8.3 a 10.2 [ton] en el peso de la roca que conforma la coraza. En función al peso unitario de roca descrito anteriormente es posible calcular el peso de aquellos elementos que formen parte del filtro del rompeolas, obteniéndose de esta forma un valor aproximado de 0.93 [ton], lo que permite a su vez proyectar el rango de valores para el tamaños de los elementos del filtro, rango considerando entre los 0.83 a 1.02 [ton]. Por otra parte, el rango de pesos para los elementos que componen el núcleo se calcula entre los 2.3 a 46.3 [kg]. En cuanto a la geometría de la coraza, se determina un espesor de dos rocas equivalente a 3.09 [m] y un ancho de cresta de tres piezas de roca igual 4.64 [m].

El diseño del pie de apoyo se plantea como una extensión de la coraza conformada por una doble capa de roca de espesor 3.09 [m] y 4 piezas de rocas de extensión aproximadamente 6.19 [m]. Finalmente, el diseño de estabilidad se corona con un muro de contención rígido a la cota +9.41 [m] NRS para el nivel de diseño convencional y a la cota +8.11 [m] NRS para el nivel de diseño probabilístico.

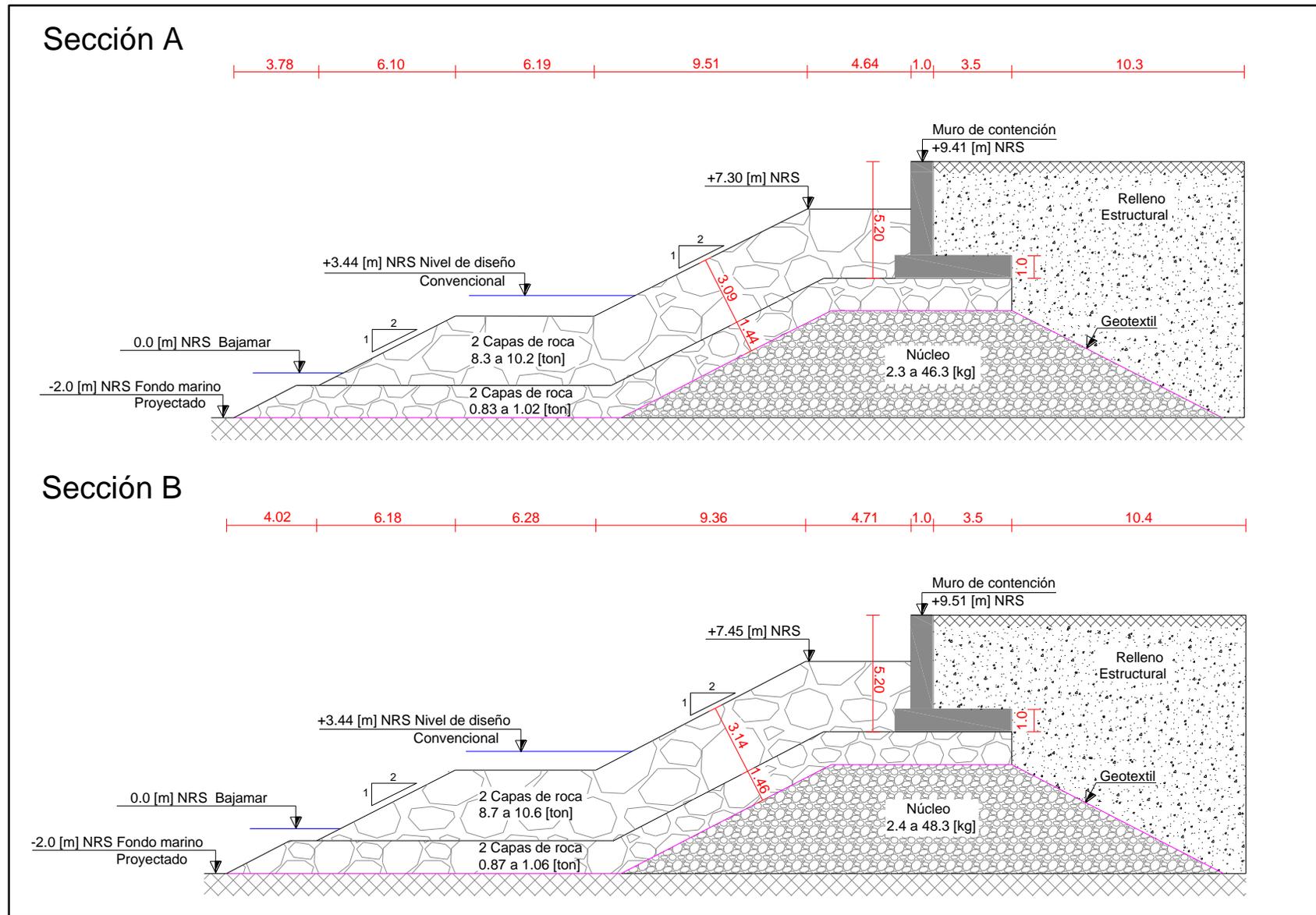
- En cuanto a la sección “Batimetría Modificada”(BM) se tiene un peso unitario de roca estimado en 9.7 [ton] y un rango que va desde los 8.7 a 10.6 [ton] en el peso de la roca de coraza. Para el filtro el valor de la roca se calcula en 0.97 [ton], fluctuando un rango de pesos de roca entre los 0.87 y 1.06 [ton]. Los pesos de los elementos del núcleo arrojan un mínimo de 2.4 [kg] y un máximo valor de 48.3 [kg]. La geometría de la coraza se estima en un espesor de dos rocas por un largo proyectado de 3 rocas de valor aproximado 4.71 [m]. Por otra parte, el pie de apoyo mantiene el mismo concepto de diseño con una extensión de doble capa de espesor igual a 3.14 [m] por 4 piezas de extensión igual a 6.28 [m]. Este diseño de estabilidad se corona con un muro de contención a los +9.51 [m] NRS para el nivel diseño convencional y +8.21 [m] NRS para el nivel de diseño probabilístico.
- Finalmente los parámetros recopilados y descritos anteriormente se comparan gráficamente mediante la proyección de secciones tipo de defensa costera. La ilustración 45 expone dos configuraciones correspondiente al escenario 25 años de periodo de retorno que compara las columnas “Batimetría Completa” versus “Batimetría Modificada” para el nivel de diseño convencional, mientras la Figura 46 muestra dos configuraciones desarrolladas a partir del mismo periodo de retorno (25 años) y columna “Batimetría Completa”, pero con diferente nivel de diseño (convencional versus probabilístico).

**Tabla 36:** Comparación parámetros de diseño para un escenario de 25 años de periodo de retorno.

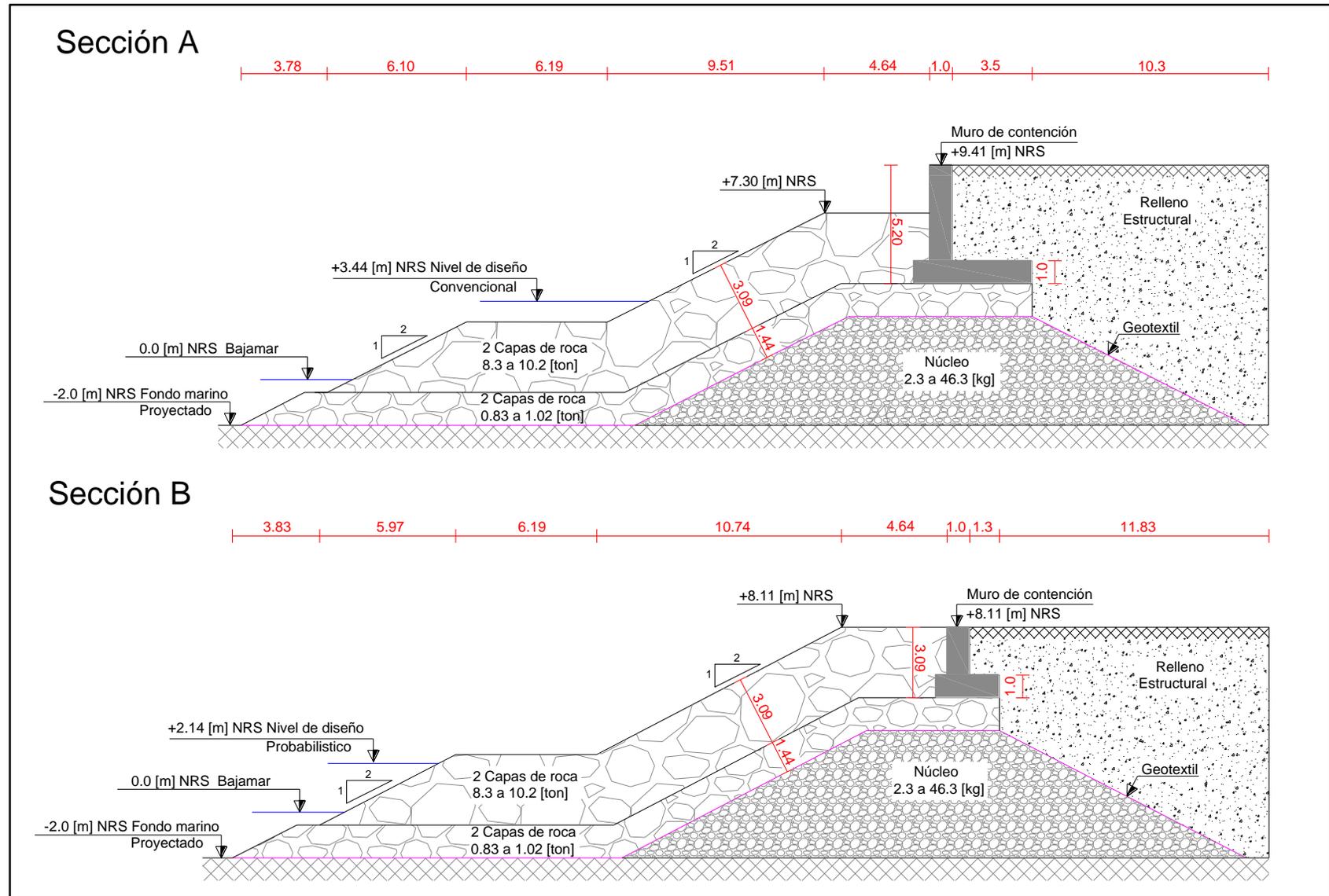
Parámetro de diseño		Batimetría Completa	Batimetría Modificada	Diferencias [BM-BC]		
Escenario periodo de retorno 25 años	<b>Altura de diseño</b>					
	Altura al pie del rompeolas	Hmo [m]	4.81	4.88	0.07	
	<b>Diseño Estructural</b>					
	<b>Peso elementos de coraza</b>					
	Peso mínimo	Wmin [ton]	8.30	8.70	0.37	
	Peso estimado	W [ton]	9.30	9.70	0.41	
	Peso máximo	Wmax [ton]	10.2	10.6	0.45	
	<b>Peso elementos filtro</b>					
	Peso mínimo	W/10min [ton]	0.83	0.87	0.04	
	Peso estimado	W/10 [ton]	0.93	0.97	0.04	
	Peso máximo	W/10max [ton]	1.02	1.06	0.05	
	<b>Peso elementos núcleo</b>					
	Peso mínimo	W/4000min [kg]	2.30	2.40	0.10	
	Peso máximo	W/200max [kg]	46.3	48.3	2.05	
	<b>Berma</b>					
	Ancho cresta	B [m]	4.64	4.71	0.07	
	<b>Espesor coraza</b>					
	Espesor de la capa	r [m]	3.09	3.14	0.05	
	<b>Espesor filtro</b>					
	Espesor de la capa	r [m]	1.44	1.46	0.02	
	<b>Pie de apoyo</b>					
	Espesor pie	[m]	3.09	3.14	0.05	
	Largo pie	[m]	6.19	6.28	0.09	
	<b>Diseño Hidráulico</b>					
	<b>Nivel de diseño convencional</b>		CC [m]	3.44	3.44	
	Francobordo	Rc [m]	5.97	6.07	0.10	
	Francobordo desde NRS	RcNRS [m]	9.41	9.51	0.10	
	<b>Nivel de diseño probabilístico</b>		CP [m]	2.14	2.14	
Francobordo	Rc [m]	5.97	6.07	0.10		
Francobordo desde NRS	RcNRS [m]	8.11	8.21	0.10		

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 45:** Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional.



**Figura 46:** Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico.



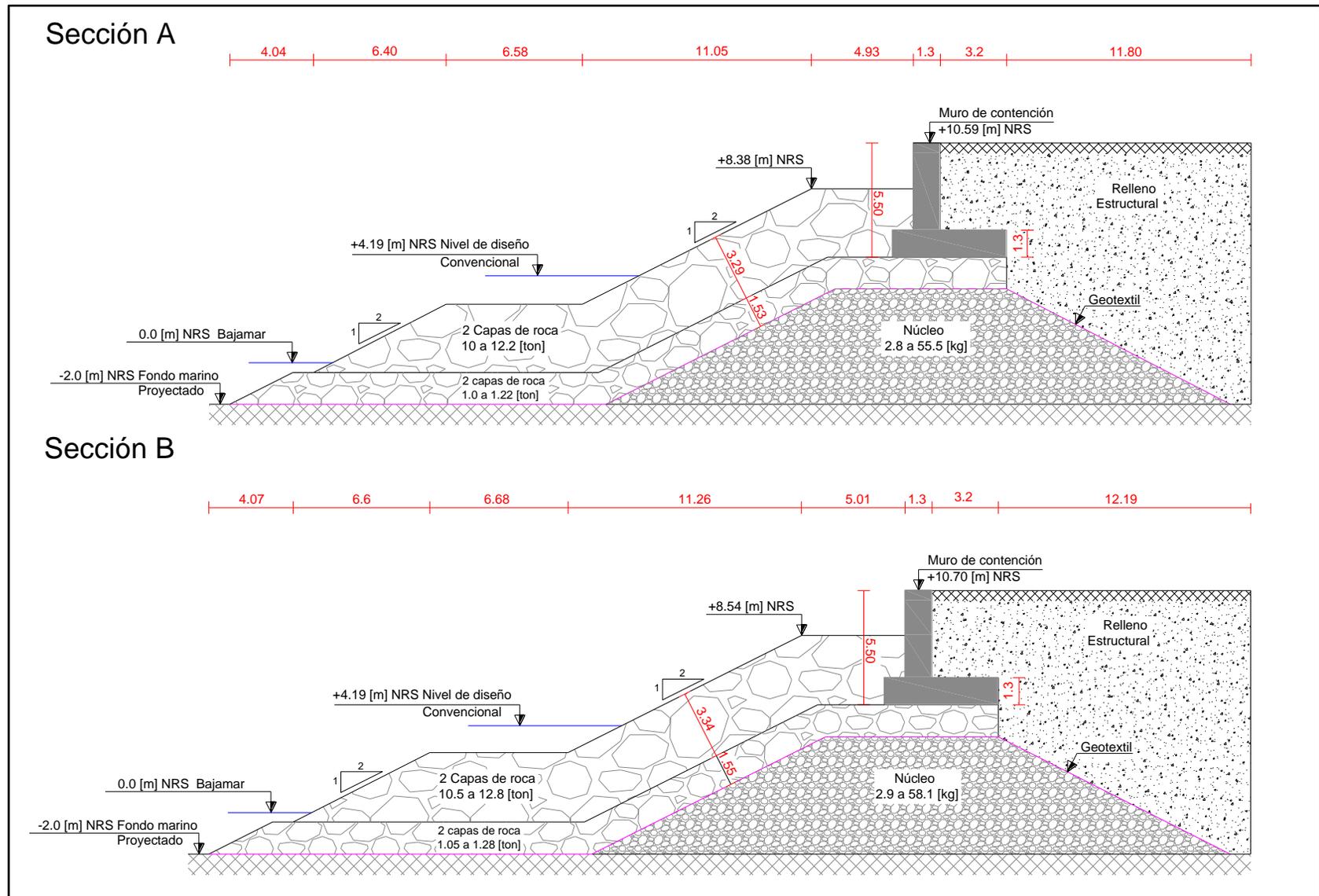
- Siguiendo la misma disposición expuesta en párrafos anteriores, para la Tabla 37 es posible observar, una comparación en magnitud de los valores obtenidos para el escenario de estructura de carácter general con periodo de retorno de 50 años. En así como en la Tabla 37, para columna “Batimetría Completa” se obtiene un peso unitario de roca estimado en 11.1 [ton] que permite establecer un rango de valores entre 10 a 12.2 [ton] para el tamaño de la roca que conforma la coraza. En cuanto al filtro de la escollera, el peso varía entre los 1.0 a 1.2 [ton] con un peso unitario estimado de 1.1 [ton]. La composición del núcleo por otra parte, debe ser integrada con material cuyas piezas se encuentre en un rango entre los 2.8 a 55.5 [kg]. Finalmente, cabe mencionar que la geometría de la coraza debe tener un espesor de 3.29 [m] equivalente a una capa conformada por 2 piezas de rocas, en cuanto al largo, se proyecta una extensión de 3 piezas del mismo material, estimando de este modo una longitud igual a 4.93 [m]. Esta misma concepción se plantea para el pie de apoyo, proyectando una extensión de 4 piezas de largo igual a 6.58 [m] por una capa doble de roca de espesor equivalente a 3.29 [m]. La configuración de las estructuras antes mencionadas se coronan con un muro de contención rígido a la cota +10.59 [m] NRS para el nivel de diseño convencional y a la cota +8.62 [m] NRS incluyendo en el análisis el nivel de diseño probabilístico.
- En la Tabla 37, pero para la columna “Batimetría Modificada” se tiene para la coraza, un peso unitario de roca estimado en 11.6 [ton] con un rango de peso que va desde los 10.5 a 12.8 [ton]. El filtro presenta valores de roca calculados en 1.16 [ton], para un rango de pesos entre los 1.05 y 1.28 [ton], mientras, los pesos de los elementos del núcleo arrojan un mínimo de 2.9 [kg] y un máximo valor de 58.1 [kg]. Por otro lado, la configuración de la geometría de la coraza plantea un espesor de 2 rocas igual a 3.34 [m] y un largo equivalente para 3 rocas estimado en 5.01 [m]. El diseño del pie de apoyo extiende la configuración de la coraza con 2 rocas de espesor por 4 rocas de largo. En este caso el muro de contención corona la estructura a los +10.70 [m] NRS para el nivel de diseño convencional y a la cota +8.73 [m] NRS para el nivel de diseño probabilístico.
- Finalmente las secciones tipo que integran y proyectan los valores descritos anteriormente se presentan en la Figura 47 y Figura 48. La Figura 47 expone dos configuraciones correspondiente al escenario 50 años de periodo de retorno que compara la sección “Batimetría Completa” versus “Batimetría Modificada” para el nivel de diseño convencional, mientras, la Figura 48 muestra dos configuraciones desarrolladas para el mismo periodo de retorno de 50 años Batimetría Completa, pero con el uso de los dos niveles de diseño calculados (convencional y probabilístico).

**Tabla 37:** Comparación parámetros de diseño para un escenario de 50 años de periodo de retorno.

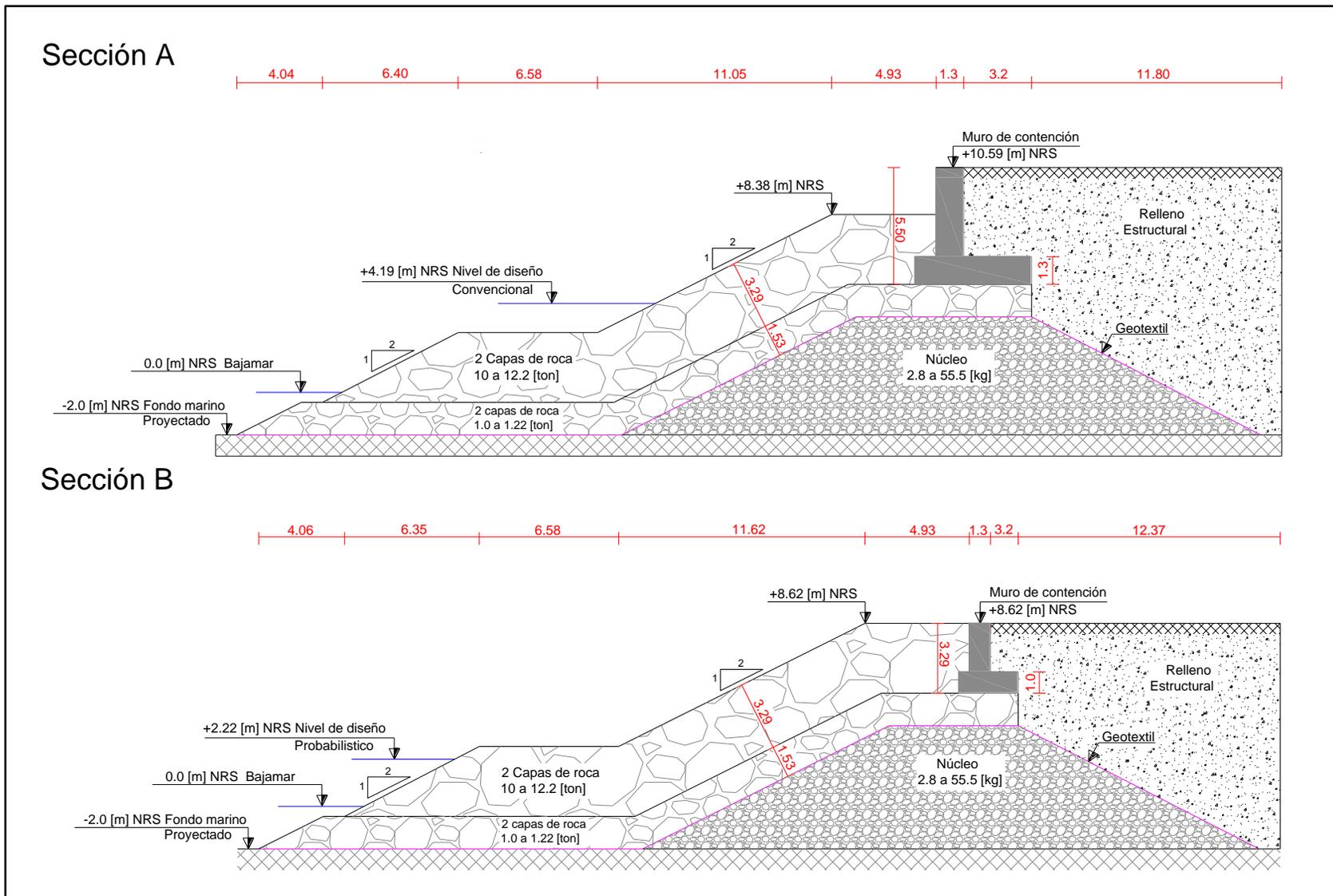
Parámetro de diseño		Batimetría Completa	Batimetría Modificada	Diferencias [BC-BM]		
Escenario periodo de retorno 50 años	<b>Altura de diseño</b>					
	Altura al pie del rompeolas	Hmo [m]	5.11	5.19	0.08	
	<b>Diseño Estructural</b>					
	<b>Peso elementos de coraza</b>					
	Peso mínimo	Wmin [ton]	10.0	10.5	0.48	
	Peso estimado	W [ton]	11.1	11.6	0.53	
	Peso máximo	Wmax [ton]	12.2	12.8	0.58	
	<b>Peso elementos filtro</b>					
	Peso mínimo	W/10min [ton]	1.00	1.05	0.05	
	Peso estimado	W/10 [ton]	1.11	1.16	0.05	
	Peso máximo	W/10max [ton]	1.22	1.28	0.06	
	<b>Peso elementos núcleo</b>					
	Peso mínimo	W/4000min [kg]	2.77	2.91	0.13	
	Peso máximo	W/200max [kg]	55.5	58.1	2.65	
	<b>Berma</b>					
	Ancho cresta	B [m]	4.93	5.01	0.08	
	<b>Espesor coraza</b>					
	Espesor de la capa	r [m]	3.29	3.34	0.05	
	<b>Espesor filtro</b>					
	Espesor de la capa	r [m]	1.53	1.55	0.02	
	<b>Pie de apoyo</b>					
	Espesor pie	[m]	3.29	3.34	0.05	
	Largo pie	[m]	6.58	6.68	0.10	
	<b>Diseño Hidráulico</b>					
	<b>Nivel de diseño convencional</b>		CC [m]	4.19	4.19	
	Francobordo	Rc [m]	6.40	6.51	0.11	
	Francobordo desde NRS	RcNRS [m]	10.59	10.70	0.11	
	<b>Nivel de diseño probabilístico</b>		CP [m]	2.22	2.22	
	Francobordo	Rc [m]	6.40	6.51	0.11	
	Francobordo desde NRS	RcNRS [m]	8.62	8.73	0.11	

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 47:** Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional.



**Figura 48:** Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico.



## **7 CONCLUSIONES**

De los estudios desarrollados a lo largo del presente proyecto se establecen las siguientes conclusiones.

### **Respecto del análisis batimétrico:**

- La información recabada en este análisis permite generar una Batimetría Completa con una densidad aproximada de 100 puntos de profundidad por km<sup>2</sup>, y una Batimetría Modificada que representa una densidad de 3 puntos por Km<sup>2</sup>. Una comparación visual a través de un mapa de veriles permite detectar similitud en el comportamiento (forma y posición de las líneas) de ambas batimetrías hasta el veril de los 20 [m], apreciándose a partir de este, diferencias visuales notorias en los veriles de 40, 60 y 80 [m].
- En el campo de las profundidades, se aprecia que en variadas zonas, la Batimetría Modificada presenta subestimaciones de profundidades respecto de la Batimetría Completa, alcanzando rangos mayores a los 28 [m] de diferencia.
- Se generan perfiles transversales en aquellas zonas donde se identifican las mayores diferencias en profundidad de una batimetría respecto de otra. Estos perfiles permiten entender la configuración resultante del terreno mediante la interpolación de la información utilizada en la generación de ambas mallas batimétrica. En este análisis se observa que las diferencias entre los perfiles generados se acentúan cuando el terreno presenta cambios bruscos de profundidad entre un punto y otro (mayores a 10 [m]), que generalmente, se producen por irregularidades propias del fondo marino. Estas irregularidades no alcanzan a ser representadas por la interpolación de la Batimetría Modificada, caso contrario se produce en la Batimetría Completa, donde los datos de las cartas náuticas son representados de manera óptima por el perfil transversal.
- Las diferencias en los análisis antes mencionados se ven reflejadas en las alturas que alcanza el oleaje para el área donde se aplica el estudio. El campo de altura para el estado de mar más frecuente (SW) presenta variadas diferencias en la altura de ola, destacando como sobreestimaciones máximas valores de 0.3 [m] y subestimaciones máximas de -0.2 [m] por parte de la Batimetría Modificada. En cuanto a los casos extremos analizados, se tiene para la dirección WSW que la Batimetría Modificada genera un incremento máximo de 1.0 [m] de altura por sobre la Batimetría Completa y una disminución de -1.5 [m]. Por otra parte, el evento proveniente de la dirección NNW, presenta sobreestimaciones máximas de hasta 1.0 [m] de altura por parte de la Batimetría Modificada y subestimaciones cercanas a los -1.0 [m] de altura.
- De la información expuesta en las series de altura de ola a lo largo de la costa, se puede concluir, que las mayores alturas de ola se obtienen en el veril de los 10 [m] de profundidad en comparación al veril de 20 [m]. Esto se explica principalmente que conforme la profundidad decrece, la longitud de ola se acorta, lo que resulta en una concentración de energía en menores distancias y por tanto, en un

aumento de la altura del oleaje, fenómeno conocido como asomeramiento. Ambas figuras expuestas en el estudio (Figura 22 y Figura 23) presentan los mismos sectores de análisis, conocidos como; Punta Ángeles, Paseo Wheelwright y playa los Marineros. El sector de Punta Ángeles resulta ser una zona bastante energética con *peaks* marcados de alturas para las direcciones WSW y NNW, lo que se asume debido a la intensidad de los parámetros propagados desde aguas profundas. El sector frente al paseo Wheelwright, por otra parte, manifiesta tendencias desiguales entre las series de alturas de ola analizadas, adquiriendo rangos máximos para la dirección NNW. Estas desigualdades resaltan producto de la exposición que posee la zona a la dirección incidente del oleaje. En cuanto al sector playa los marineros, este resulta ser un segundo foco de concentración de alturas de ola energéticas (después de Punta Ángeles) para las dirección SW y WSW, no así para la dirección NNW, que expone valores progresivamente menores a los mostrados por otros sectores de la serie.

- Finalmente, respecto de los estudios comparativos realizados en el análisis batimétrico es posible concluir que, la construcción de dos batimetrías con notorias diferencias en resolución no reflejan tales desigualdades al momento de comparar sus resultados, específicamente al ser utilizadas (las batimetrías) como herramientas de propagación en modelos de oleaje para la estimación de parámetros de diseño, quedando las diferencias dependientes, en su mayoría, de las características particulares que presente el sector en estudio.

#### **Respecto de la caracterización del oleaje:**

- Los valores típicos que presenta la estadística de oleaje analizado en aguas profundas varían desde los 2.0 [m] a 2.5 [m] de altura significativa para periodos *peak* de 13 a 14 [s], representando un 8.21% del total general con dirección incidente proveniente desde el SW.
- La caracterización del clima extremo de oleaje en aguas profundas, se desarrolla siguiendo lo expuesto por el SHOA en su publicación N° 3201 (3ª edición año 2005). De los resultados obtenidos, las alturas utilizadas para caracterizar el fenómeno son las incidentes desde el cuarto cuadrante con periodos de retorno de 25 y 50 años, equivalentes a 6.23 [m] y 6.62 [m] respectivamente. Se asignaron las direcciones más incidentes dentro del cuadrante (NW y NNW), para periodos *peak* característicos entre los 10 [s] a 14 [s].
- Se propagan los parámetros obtenidos del cuarto cuadrante, asociadas a los periodos de retorno de 25 y 50 años, utilizando la Batimetría Completa y Batimetría Modificada hacia dos nodos de control ubicados frente al paseo Juan de Saavedra. La mayores alturas que se obtienen en el Nodo 1 son producto de un periodo de retorno de 50 años, y corresponden a 5.75 [m] para una Batimetría Completa y 5.87 [m] para una Batimetría Modificada, dando una diferencia de 0.12 [m] a favor de la Batimetría Modificada (sobreestimación). En cuanto al Nodo 2, para el mismo periodo de retorno, se obtienen alturas máximas de 5.23 [m] para la Batimetría Completa y de 5.58 [m] en la Batimetría Modificada arrojando una diferencia de 0.35 [m] entre ambos valores (sobreestimación de la Batimetría Modificada).

- Se compara la selección de eventos extremos de oleaje descrita por el SHOA en su publicación 3201 (3ª edición año 2005) con una que transfiera espectralmente toda la estadística hacia el sitio de interés, realizando allí la evaluación de eventos extremos. Esta metodología se basa en la referencia expuesta por Molina (2016) y cuyos resultados avalan lo obtenido en esta sección desde el punto de vista de selección de eventos extremos. Se observan diferencias en la selección de eventos extremos en ambas metodologías, donde de los 36 eventos seleccionados, son 17 los considerados como extremos en aguas profundas, y que no son identificado como tales en el sitio de interés, mientras que 15 eventos seleccionados como extremos en el sitio de interés (Nodo de Control 1), no son tomados en cuenta en el análisis realizado en aguas profundas.
- Es posible afirmar que la metodología de evaluación de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación, presenta diferencias en las alturas de olas calculadas, subestimando y sobreestimando este parámetro dependiendo de las características que se le asignan al oleaje propagado, esto, sumado a las condiciones físicas que presenta el sector en estudio, resultan ser incertidumbres que no aseguran la existencia de una combinación periodo-dirección, que transferida al sitio de interés permita una confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Las dos metodologías descritas se aplican a dos Nodos de control para demostrar que las diferencias obtenidas corresponden a un comportamiento generalizado del proceso y no solo a características propias del lugar seleccionado para la extracción de datos. Ante esto, y por la cercanía a la zona de emplazamiento de la obra se plantea el pre-diseño en base a la información obtenida en el Nodo de Control 1, correspondientes a alturas de 4.53 y 4.94 [m] para el periodo de retorno de 25 y 50 años Batimetría Completa y alturas de 4.63 y 5.04 [m] para los periodos de retorno de 25 y 50 años Batimetría Modifica.

#### **Respecto del análisis de marea y niveles:**

- El Análisis No Armónico de Marea se basa en lo establecido por el SHOA en su publicación "Instrucciones Oceanográficas N°2". Del registro del nivel del mar entre los años 2000 a 2015, se destacan como valores de referencia mareal, una máxima pleamar de 2.10 [m] NRS, una media de pleamares máximas estimada en 1.51 [m] NRS, un nivel medio del mar obtenido en 0.92 sobre el NRS y una mínima bajamar de 0.002 [m] NRS.
- Por otra parte, el Análisis Armónico de la Marea se fundamenta en la utilización de la herramienta T-Tide de matlab, obteniendo de esta manera, series de nivel del mar corregido y marea astronómica entre los años 2000 a 2015. De la diferencia entre la serie del nivel del mar y marea astronómica se obtiene el denominado residuo meteorológico. La caracterización del residuo meteorológico se plantea mediante un análisis de valores extremos, permitiendo la obtención de parámetros representativos de este fenómeno en función a los periodos de retorno establecidos como base del diseño. Se obtiene una sobreelevación por efectos meteorológicos de 0.71 [m] y 0.79 [m] para los periodos de retorno de 25 y 50 años respectivamente.

- Junto al análisis anterior, se plantea la determinación de los efectos individuales que conforman la marea meteorológica (por presión atmosférica y viento), empleando formulaciones establecidas para dichos propósitos. La presión atmosférica máxima asociada a “buen tiempo” se establece en 1029 [hPa], mientras que para una condición de “temporal” la presión atmosférica es de 1006 [hPa]. Utilizando la Ecuación 8 y la Tabla 1 propuesta por el SHOA en sus publicaciones N°3009 “Tablas de marea de la costa de Chile” se tiene correcciones de -0.16 [m] asociada a “buen tiempo” y de +0.07 [m] para una condición de “temporal”.
- Los efectos que el viento induce sobre el nivel del mar se obtienen de la metodología propuesta por Khamphuis (2010). En estos resultados se puede observar que la contribución del viento al nivel del mar varía entre los 0.025 [m] a 0.11 [m].
- La obtención del *Set-up* oleaje se lleva a cabo siguiendo lo propuesto por el “*Coastal Engineering Manual*”, tomando en cuenta la información del análisis extremo propuesto para el Nodo de Control 1. El *Set-up* máximo se estima en 1.2 [m] para la altura de ola asociada al periodo de retorno 25 años, mientras que para un periodo de retorno 50 años el *Set-up* alcanza una desnivelación equivalente a 1.30 [m].
- Se desarrollan dos metodologías para la estimación de los niveles de diseño. La primera consiste en la conformación de un nivel sobre la base de los parámetros obtenidos en los estudios de condiciones naturales, nivel de diseño denominado “Convencional” y de valores 3.44 [m] NRS para el periodo de retorno de 25 años y de 4.19 [m] NRS para el periodo de retorno 50 años. La segunda metodología se fundamenta a través de funciones paramétricas llamadas cópulas, utilizando los parámetros conjuntos del nivel del mar y alturas de ola transferidas al Nodo de Control 1. Estos resultados se visualizan mediante periodos de retorno expuestos como curvas de nivel de valores 2.14 [m] NRS para el periodo de retorno de 25 años y de 2.22 [m] NRS para el periodo de retorno 50 años. Los valores expuestos muestran una clara diferencia entre los niveles de diseño, destacando mayores valores a través de la aplicación de la metodología convencional. De la metodología probabilística es posible resaltar el grado de información que brinda al diseño, logrando para un cierto periodo de retorno, identificar en los eventos seleccionados la combinación de magnitudes que conforman los niveles extremos del mar, sin embargo, se hace necesario destacar, que el análisis multivariado tiene asociado un alto grado de incertidumbre debido a la incorporación de las funciones de cópulas (Álvarez, et al., 2016).

#### **Respecto de la altura de ola en zona rompiente:**

- Se emplea la formulación de Goda (2000) para entender el comportamiento del oleaje a través de la zona rompiente y cuantificar de esta forma, cuanto pueden afectar a los resultados finales (altura de diseño al pie de la estructura) las variaciones adquiridas en estudios anteriores y utilizadas como parámetros iniciales en esta metodología, dentro de las que se incluyen, los niveles de diseño convencional y probabilístico, junto a las alturas extraídas en el Nodo de Control 1

para la Batimetría Completa y Modificada. Cabe destacar que los resultados seleccionados como parámetros de diseño se fundamentan sobre una cota de profundidad -2.0 [m] NRS y corresponden a las alturas de diseño “progresiva” y “post rompiente”. De estos resultados es posible observar diferencias significativas en magnitud, cuantificadas para el nivel de diseño convencional de periodo de retorno 25 años en 0.84 [m] caso Batimetría Completa y de 0.90 [m] para el caso con Batimetría Modificada. En cuanto al periodo de retorno de 50 años las diferencias disminuyen entre los resultados de una altura de diseño y otra, obteniéndose valores de 0.64 [m] para la Batimetría Completa y de 0.85 [m] para la Batimetría Modificada. Ahora bien, la inclusión de un nivel de diseño probabilístico significa para el análisis evaluar la altura de ola de diseño a una menor profundidad total, por lo que los resultados de aquellas condiciones de oleaje que dependen de la profundidad en su estimación se ven directamente afectadas, esto ocurre en el caso de la altura de ola post rompiente cuyos valores descienden con respecto a los obtenidos para el nivel de diseño convencional en aproximadamente un 20% para el periodo de retorno de 25 años y en un 27% para el periodo de retorno de 50 años. Finalmente y a modo general, se concluye no utilizar la formulación de Goda (2000) para transferir directamente el oleaje al pie de la obra sin realizar una evaluación previa de las condiciones que este fenómeno presenta en las profundidades que conforman esta zona, específicamente, antes, durante y después de la rotura, de este modo, se adquiere un panorama completo de todas las alturas de ola resultantes en función a las distintas profundidades evaluadas, lo que permite en definitiva, tomar decisiones respecto del valor que tendrá la altura de diseño al pie de la obra considerando, en virtud a estos resultados que una selección inadecuada de la altura de diseño implica una subestimación o sobreestimación en la configuración final de la estructura.

#### **Respecto de la aplicación caso práctico:**

- Para el diseño de estabilidad, se estima el peso de los elementos que componen la coraza de la defensa costera, mediante dos formulaciones, Hudson (1959) y Van der Meer (1988). Al utilizar la fórmula de Hudson con la altura de ola obtenida mediante el nivel de diseño convencional de periodo de retorno 25 años Batimetría Completa y condición progresiva se tiene un peso de roca igual a 9.25 [ton], mientras para la condición post rompiente, el peso de roca estimado es 5.20 [ton] es decir, una diferencia de 4.05 [ton] equivalente a más de un 43% en el tamaño de la roca. En cuanto al periodo de retorno de 50 años se cuantifica una diferencia de un 33% en el tamaño de la roca correspondiente a 3.67 [ton] de diferencia favor del peso obtenido por la altura de ola progresiva. Estas diferencias se reafirman al utilizar la fórmula de Van der Meer, donde se obtiene diferencias de 4.18 [ton] equivalente a más de un 35% en el tamaño de la roca para el periodo de retorno de 25 años y de 3.55 [ton] (más de un 25%) de diferencia entre una altura y otra para el periodo de retorno de 50 años. A través de estos valores queda demostrado la diferencia de la utilización de una altura de ola progresiva versus una altura de ola post rompiente como parámetro inicial en la obtención de los pesos de elemento de coraza, ante lo cual se opta por seleccionar la altura progresiva como valor de altura de ola de diseño.

- Si se enfoca el estudio solo a una condición de altura de ola como la condición progresiva, se pueden incluir en los análisis las diferencias que se obtienen a través de la utilización de las alturas de ola producto de la transferencia de dos batimetrías con variada resolución. Es así como al utilizar la fórmula de Hudson con la altura de ola obtenida ya sea mediante el nivel de diseño convencional o probabilístico de periodo de retorno 25 años y Batimetría Completa se tiene un peso de roca igual 9.25 [ton], mientras al usar como parámetro de diseño la altura de ola asociada a la Batimetría Modificada el peso resultante de la roca es 9.66 [ton], cuantificando una diferencia de 0.41 [ton] a favor de la altura de diseño de la Batimetría Modificada. El periodo de retorno de 50 años, por otra parte, se resume en valores de 11.09 [ton] de peso de roca para Batimetría Completa y de 11.62 [ton] para la Batimetría Modificada, obteniéndose finalmente una diferencia de 0.53 [ton] entre ambos parámetros. Ante los valores expuestos, cabe mencionar que las diferencias detectadas e impuestas como parámetros iniciales en la formulación de Hudson constituyen una variación en la altura de ola cuantificada en 0.07 y 0.08 [m] para el periodo de retorno de 25 y 50 años respectivamente, estas diferencias, no representan más allá de un aumento del 4% en el tamaño de la roca a favor de los resultados obtenidos mediante el perfil batimétrico modificado.
- Respecto de la utilización de la fórmula de Van der Meer se puede destacar como antecedente general que presenta valores más elevados en el peso de los elementos que componen la coraza (en comparación con la fórmula de Hudson). Sin embargo, la tendencia en el análisis presenta el mismo comportamiento, destacando que para un nivel convencional o probabilístico de periodo de retorno 25 años y Batimetría Completa se obtiene un peso de roca igual a 11.93 [ton], 0.39 [ton] menos de las que se obtienen para la misma condición con Batimetría Modificada, es decir una diferencia en la altura de ola inicial de 0.07 [m] a favor de la condición de Batimetría Modificada produce un aumento en el peso de la roca de hasta un 3.16%, caso similar ocurre al estimar el tamaño de los elementos para el periodo de retorno de 50 años donde la diferencia en altura de ola de 0.08 [m] se convierte finalmente en una diferencia en peso de la roca de 0.49 [ton] equivalente a un aumento del 3.46%.
- Para el diseño hidráulico, la tasa de sobrepaso admisible se estima siguiendo lo propuesto por el *Coastal Engineering Manual*, estableciendo un valor de 2.0 [lts/s/m] para una condición extrema. El sobrepaso se calcula mediante la formulación expuesta en la EurOtop (2018), obteniendo diferentes cotas de coronamiento en función a una altura de ola de diseño para un nivel convencional y probabilístico. Los resultados en esta sección, presentan para un nivel de diseño convencional con periodo de retorno 25 años Batimetría Completa una cota de coronamiento de 9.41 [m] desde el NRS, mientras para la condición con Batimetría Modificada la cota resulta 0.10 [m] mayor, es decir, el coronamiento de la estructura se da a los +9.51 [m] NRS. El periodo retorno de 50 años en cambio presenta valores para el francobordo de +10.59 [m] NRS para la condición con Batimetría Completa y de un +10.70 [m] NRS para la condición Batimetría Modificada, por lo que se desprende que la variación inicial en la altura ola de 0.08 [m] para el presente caso se traduce en una diferencia de 0.10 [m] en el coronamiento de la estructura.

- En cuanto a la inclusión del nivel de diseño probabilístico en el análisis, se obtienen en líneas generales menores cotas en el coronamiento de la estructura, observándose valores de +8.11 [m] NRS para la condición de Batimetría Completa y periodo de retorno 25 años (1.30 [m] menor que su condición similar en el nivel de diseño convencional), mientras para el periodo de retorno de 50 años el valor de la cota de coronamiento de la estructura asciende a +8.62 [m] NRS (1.97 [m] menor). Respecto de la utilización de la batimetría modificada las diferencias expuestas para el nivel de diseño convencional en el coronamiento de la estructura se mantienen en 0.10 y 0.11 [m] para el periodo de retorno de 25 y 50 años respectivamente.
- La aplicación de metodologías para la determinación de parámetros de diseño asociados a los escenarios de 25 y 50 años de periodo de retorno presentan diferencias considerables en los resultados, tanto en el nivel y altura de diseño como en la estimación de valores estructurales e hidráulicos. La cuantificación de estas diferencias concluyo de manera gráfica a través del diseño de secciones tipo de dique en talud proyectadas para los distintos escenarios evaluados.

Al término del presente proyecto se concluye el cumplimiento de los objetos propuesto, sensibilizando un diseño de obra marítima mediante un análisis y evaluación de los parámetros y metodologías que integran cada etapa en los estudios de condiciones naturales. Este proceso, culminó con la cuantificación de la sensibilidad detectada, la que se aplicó al diseño de estabilidad e hidráulico de una defensa costera, lográndose como conclusión general del proyecto, que una falta de precisión en la obtención de los parámetros que integran una metodología en la caracterización de los estudios de condiciones naturales, no influye de manera significativa en el diseño final de la defensa costera (tamaño de la roca y estimación de la cota de coronamiento), como sí lo hace, un cambio de metodología o la utilización de una metodología diferente en la estimación de estos parámetros.

## **8 RECOMENDACIONES**

En virtud a lo presentado en este proyecto de título, se contemplan las siguientes recomendaciones:

- La determinación de las batimetrías utilizadas en este estudio es producto de la digitalización de las cartas náuticas SHOA. Se propuso la construcción de las batimetrías variando la densidad de información a gran escala, por lo que se descartó el acoplamiento de un levantamiento batimétrico en el sitio de interés. Aun así, y con los resultados obtenidos en esta sección, se recomienda la utilización de una información batimétrica precisa para el sitio que se desee estudiar, demostrando que esta información será de mayor utilidad cuando el fondo marino presente características irregulares (grandes diferencias de profundidad).
- Para una transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas hacia la zona de interés se recomienda la utilización del método de propagación cuasi-purista.
- La metodología para la determinación de valores de diseño asociados a periodos de retorno a partir de una selección de eventos extremos en aguas profundas es propuesta por el SHOA en su publicación 3201 (3<sup>a</sup> edición año 2005). Esta metodología presentó diferencias en los resultados de las alturas de ola, subestimando o sobreestimando este parámetro dependiendo de las características asignadas al oleaje propagado y las condiciones físicas del sector en estudio, esto, en comparación a una metodología que transfiera toda la estadística al sitio de interés, realizando allí, la selección de eventos extremos de oleaje. En base a este argumento, se recomienda la utilización de una metodología que seleccione los eventos extremos en el sitio de interés, posterior a una transferencia espectral completa de toda la estadística desde aguas profundas.
- Se recomienda para el análisis armónico y no armónico de la marea utilizar registros prolongados del nivel del mar que permitan considerar y cuantificar los mayores y menores registros mareales que involucre el fenómeno.
- La obtención de la marea meteorológica se realizó mediante dos procedimientos, el primero, determinando esta marea como la diferencia entre la serie del nivel del mar corregido y la serie de marea astronómica. El segundo, mediante la determinación individual de los efectos que componen el fenómeno (presión atmosférica y elevación por viento). Se aconseja, desarrollar el primer procedimiento para la obtención de una marea meteorológica cuyos resultados estén asociados a un cierto periodo de retorno, destacando que este procedimiento presenta valores de marea mucho más conservadores que los mostrados en el segundo procedimiento.
- Para la determinación de las probabilidades conjuntas extremas se recomienda la utilización de una serie temporal de nivel del mar y altura de ola por sobre los 20 años de registro, evaluando para este proceso más de una función de cópula.

- Es aconsejable determinar el nivel de diseño de manera convencional y probabilística, dependiendo su utilización (de uno u otro nivel) de las características físicas de la obra a proyectar, junto con el criterio ingenieril que se aborde para el proyecto. Esto debido a las diferencias que la utilización de los niveles provocó en los parámetros de diseño resultantes, como una altura de ola post rompiente o el francobordo estimado para el coronamiento de la estructura.
- Para estimar la altura de ola de diseño al pie de obra mediante la formulación de Goda (2000) se recomienda en primera instancia realizar una evaluación de las condiciones del oleaje para las distintas profundidades que conforman la zona rompiente, evitando realizar la transferencia de la altura de ola sólo a la profundidad proyectada para el pie de la obra.

## 9 REFERENCIAS

- Álvarez, M., Gallardo, A. & Beyá, J., 2016. *Comparación de análisis extremo uni y bivariado para marejadas recientes en Chile*. XXVII. Congreso Latinoamericano de Hidráulica LADHI. Lima, Perú: s.n.
- Bernal, C., 2015. *Análisis comparativo de formulaciones para el diseño de diques en talud de roca y la verificación de su aplicabilidad en Chile*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Beyá, J. & Winkler, P., 2012. *Inundaciones Costera, Más Allá de los Tsunamis.*, Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Campos, R., 2016. *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Campos, R., Beyá, J. & Mena, M., 2015. *Cuantificación de los Daños Históricos a Infraestructura Costera por Marejadas en las Costas Chilenas.* s.l.:Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica..
- d'Angremond, K. & Van Roode, F., 2004. *Breakwaters and Closure Dams*. Delft, Holanda: Taylor & Francis Group.
- Dean, R. & Dalrymple, R., 2001. *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Enginyeria Marítima, 2002. *Caracterización del oleaje*, Barcelona: Universidad politecnica de Cataluña.
- EurOtop, 2018. *Manual on Wave overtopping of sea defences and related structures.* s.l.:s.n.
- Foreman, M., 1977. *Manual for Tidal Heights, Analysis and Prediction*. s.l.:Institute of oceans sciences.
- GHD, 2010. *Informe para Análisis Borde Costero de Valparaíso, Sector Juan de Saavedra. Informe Etapa 3*. s.l.:s.n.
- Goda, Y., 2000. *Random seas and design of maritime structures*. 2° ed. Tokyo: Yokohama National University.
- Granada., U. d., s.f. *Teoría de cópulas y aplicaciones en simulación de riesgos financieros e ingeniería civil.* Granada, España: Universidad de Granada.
- Guisado, E., Malvárez, G. & Navas, F., 2010. *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*, Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Hawkes, P., Gouldby, B., Tawn, J. & Owen, M., 2002. The joint probability of wave and water levels in coastal engineering design. *Journal of Hydraulic Research*, pp. Vol.40, N° 3..
- Hernández, H., 2015. *Predicción del oleaje mediante técnicas de conjunto en la costa Catalana*. Barcelona: Universidad técnica de Cataluña.
- Ingenieria Fiorella Vega Jácome, 2016. *Análisis del riesgo de sequias en el sur de Perú.* Lima: s.n.

- Kamphuis, J., 2000. *Introduction coastal engineering and management*. Canada: Queen's University.
- Liu, P. & Losada, I., 2000. El modelado matemático de la propagación del oleaje en ingeniería de costas. *Ingeniería del agua*, Volumen volumen 7, p. pág 37.
- Liu, Z. & Frigaard, P., 2001. *Generation and Analysis of Random Waves*. s.l.:s.n.
- Masas, F., Kergadallan, X., Garat, P. & Hamm, L., 2014. Applying POT methods to the Revised Joint Probability Method for determining extreme sea levels.. *Coastal Engineering*, pp. 140-150.
- Mazas, F. & Hamm, L., 2017. An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels. *Coastal Engineering*, pp. 44-59.
- Molina, M., 2016. *Eventos extremos de oleaje para diseño de obras, ¿Evaluar en aguas profundas o en el sitio?*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Montoya, R. & Osorio, A., 2007. Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia. *Avances en recursos Hidráulicos*, pp. 47-74.
- MOP; DGOP; Dirección de vialidad de Chile, 2013. *Manual de Carreteras Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño*. s.l.:s.n.
- MOP & DOP, 2013. *Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras*. Santiago: Primera edición.
- Morales, E., Winckler, P. & Herrera, A., 2019. *Costas de Chile*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica.
- Morales, P. & Rodriguez, L., 2016. *Aplicación de los coeficientes correlación de Kendall y Spearman*. Barquisimeto, Venezuela.: Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado".
- Negro, V. & Varela, O., 2002. *Diseño de diques rompeolas*. s.l.:Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Nicolau del Roure, F., 2004. *Evaluación de metodologías de transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras*. Santiago: Universidad de Chile.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. & Lentz, S., 2002. *Classical Tidal Analysis Including error estimates in Matlab using T\_tide*. s.l.:Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia.
- Pugh, D., 1987. *Tides, surges and mean sea-level*. U. K: John Wiley and sons, Ltda.
- Requena, A., Mediero, L. & Garrote, L., 2015. *Comprobación de la seguridad hidrológica de aliviaderos mediante un análisis multivariado con la técnica de las cópulas*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos..
- ROM 0.0, 2001. *Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias*. Madrid: s.n.
- ROM 0.2-90, 1990. *Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*. Madrid: s.n.
- ROM 1.0-90, 2009. *Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo (Parte I. Bases y Factores para el proyecto. Agentes Climáticos)*. Madrid: s.n.

- Salles, P. & Silva, R., 2004. *Infraestructura de Protección Costera en Manejo Costero en México*. s.l.:Instituto de Ingeniería, UNAM..
- Sampedro, A., 2009. *Metodologías de calibración de bases de datos de reanálisis de clima marítimo*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- SHOA, 1992. *Glosario de mareas y corrientes*. 2° ed. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Publicación 3013.
- SHOA, 1999. *Instrucciones oceanográficas N°2*. 2° ed. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Publicación 3202.
- SHOA, 2005. *Instrucciones Oceanográficas N°1*. 3° ed. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Publicación 3201.
- SHOA, 2016. *Tablas de marea de la costa de Chile*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Publicación 3009.
- SHOA, 2017. *Instrucciones Hidrográficas N° 5, Especificaciones Técnicas para la Ejecución de Sondajes*. Valparaíso: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Publicación N° 3105.
- Sierra, J. & Lo Presti, A., 1998. *Estudio comparativo de criterios de roturas del oleaje regular*. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña.
- Silva, R., 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1984. *Shore Protection Manual*. s.l.:s.n.
- UNICAM, 2000. *Documento de referencia*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- USACE, 2003. *Coastal Engineering Manual - Surf Zone Hydrodynamics*. EEUU: s.n.
- USACE, 2006. *Coastal Engineering Manual - Water Wave Mechanics*. EEUU: s.n.
- Whitham, G., 1974. *Linear and nonlinear waves*. New York: Wiley.

## 10 ANEXO A - BASES DE DISEÑO

En la Tabla 38 se presentan los valores para la vida útil, mientras en la Tabla 39 los parámetros asociados al riesgo.

**Tabla 38:** Vida útiles mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo.

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 0.2-90, 1990).

**Tabla 39:** Riesgos máximos admisibles.

<b>a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS</b>			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
Indice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
	ALTA	0,25	0,15

<b>b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL</b>			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
Indice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	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, semirígidas 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
 

Indice  $r = \frac{\text{Coste de pérdidas directas e indirectas}}{\text{Inversión}}$

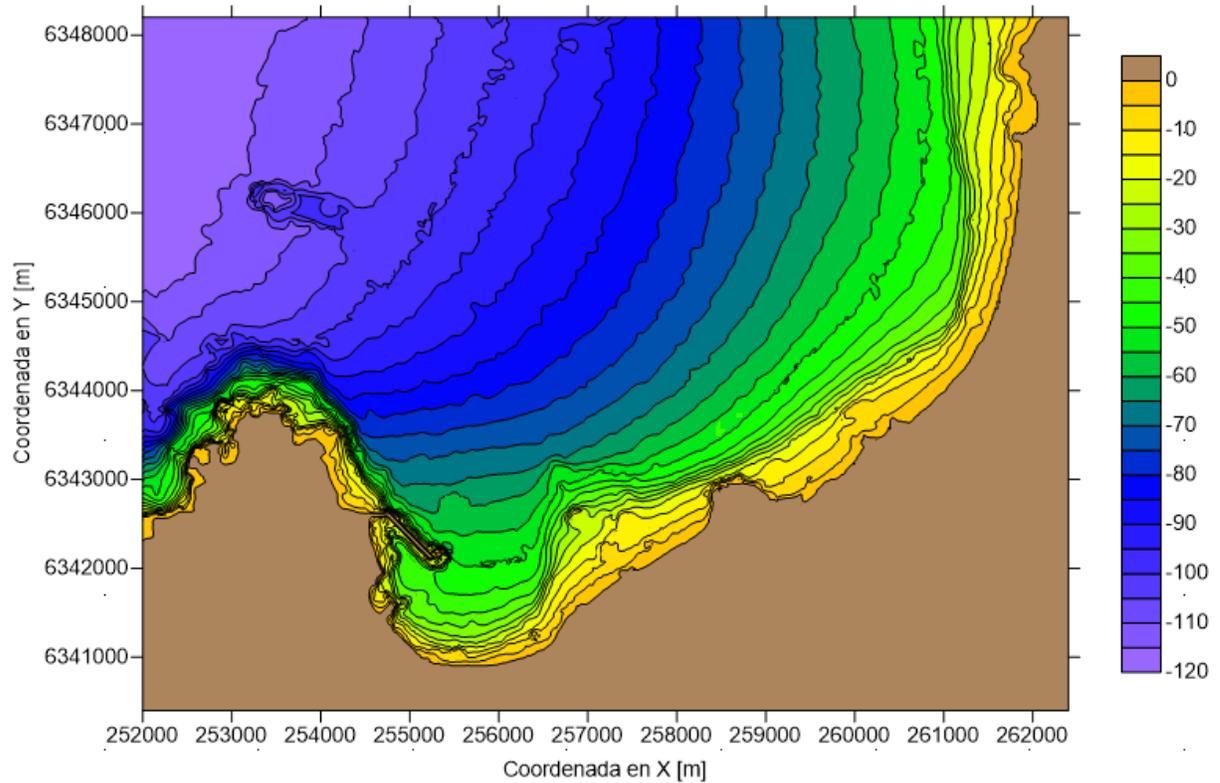
  - BAJA:  $r \leq 5$
  - MEDIA:  $5 < r \leq 20$
  - ALTA:  $r > 20$

Fuente: (ROM 0.2-90, 1990).

## 11 ANEXO B - ANÁLISIS BATIMÉTRICO

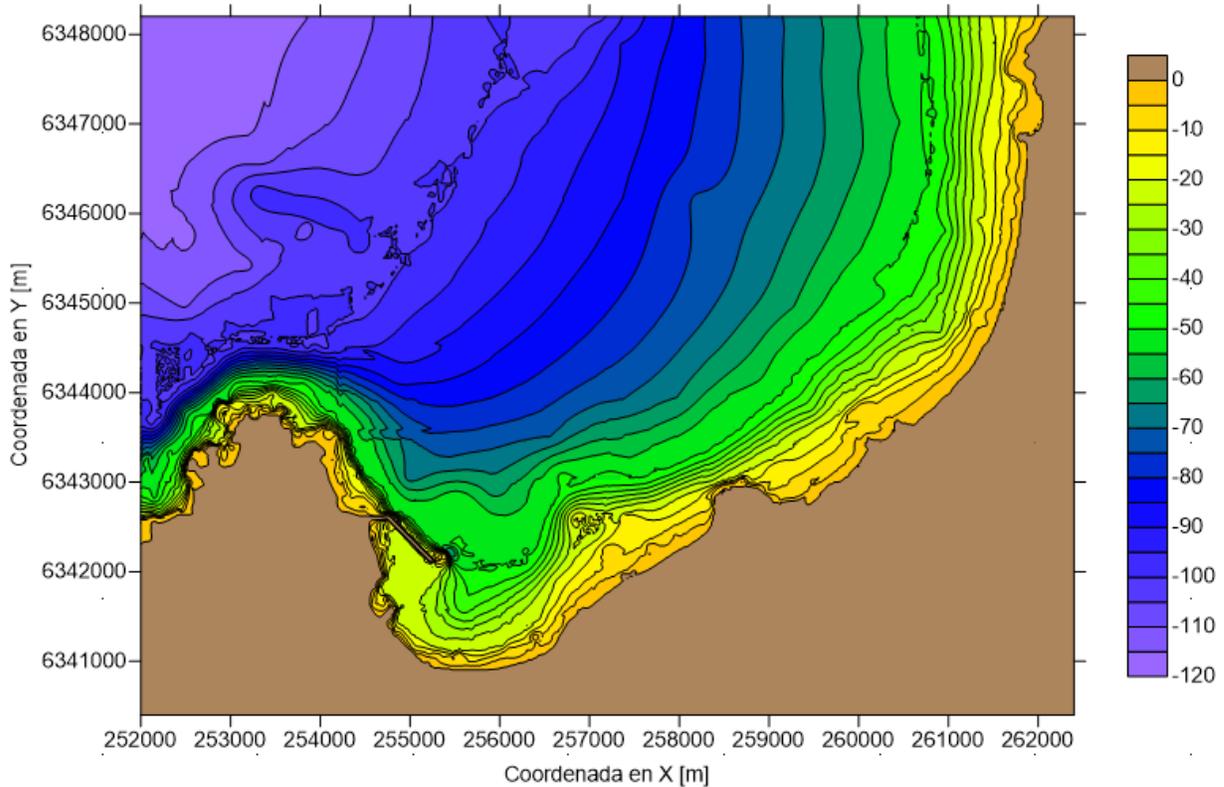
En la Figura 49 y Figura 50 se presentan imágenes de la Batimetría Completa y Batimetría Modificada respectivamente, ambas construidas en el análisis batimétrico expuesto en la sección 5.2.

**Figura 49:** Batimetría Completa. La barra de color indica el rango de profundidades en metros.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 50:** Batimetría Modificada. La barra de color indica el rango de profundidades en metros.

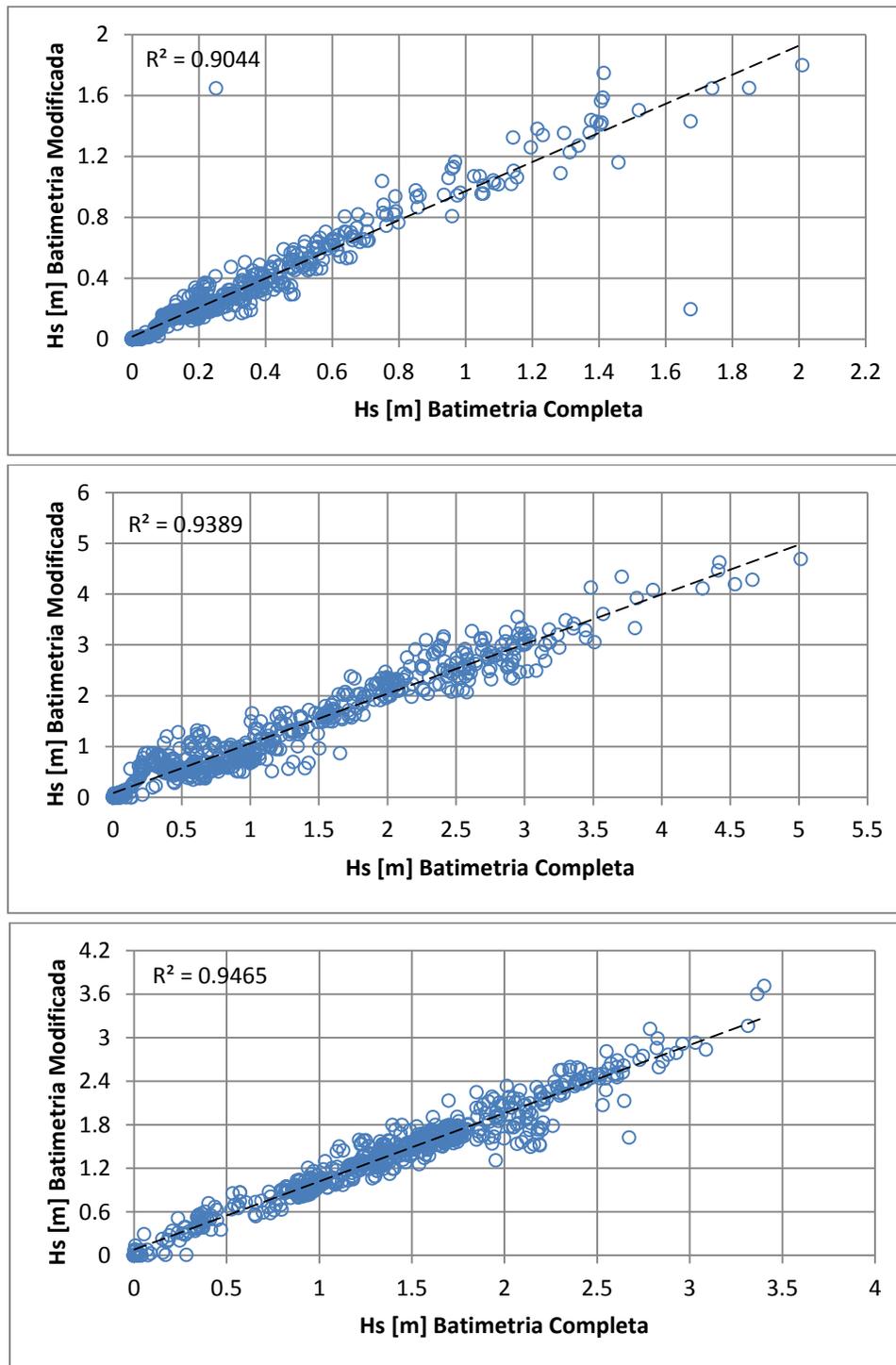


Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes figuras se presentan los diagramas de dispersión realizados para la sección 5.2.3 “Efectos de la densidad batimétrica en la propagación de oleaje”. En estos diagramas se contrastan los resultados de las alturas de ola obtenidas producto de dos batimetrías con diferente resolución, para los veriles de 10 y 20 [m] asociadas a las direcciones de incidencia SW, WSW y NNW.

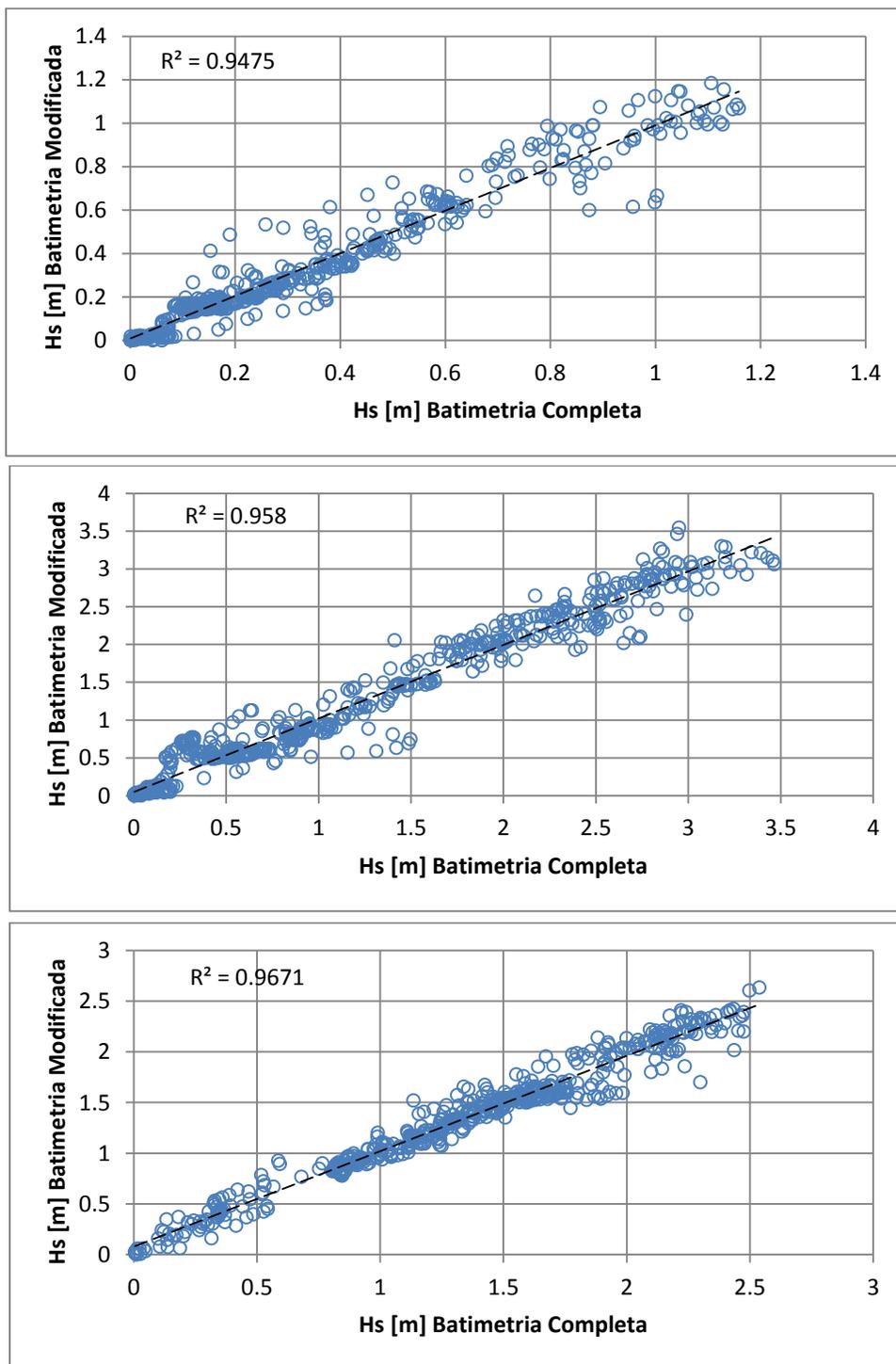
En la Figura 51 y Figura 52 se observan los diagramas de alturas significativas para el veril de 10 [m] y 20 [m] respectivamente. De los gráficos se infiere que los coeficientes de correlación  $R^2$  superan los 0.90 para todos los casos estudiados, lo que da a entender un buen ajuste por el alto grado de relación lineal entre ambas variables. Esto básicamente, muestra que las alturas obtenidas por ambas batimetrías siguen un patrón constante, pero presentando diferencias significativas en puntos aislados, traducidos principalmente en sobreestimaciones de alturas en diferentes sectores por parte de la Batimetría Modificada.

**Figura 51:** Diagramas de dispersión Hs [m] Batimetría Completa vs Hs Batimetría Modificada para veril de 10 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 52:** Diagramas de dispersión Hs [m] Batimetría Completa vs Hs Batimetría Modificada para veril de 20 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo).



Fuente: Elaboración propia.

## 12 ANEXO C - CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE

### 12.1 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Complementando el estudio del clima medio de aguas profundas se presentan tablas de incidencias e histogramas generados para las variables de altura, periodo y dirección.

De la Tabla 40, se observa, que la mayor ocurrencia simultánea de los estados de mar recae en el rango de alturas de 2.0 a 2.5 [m] para una dirección SW con una frecuencia de ocurrencia de 19.14%, seguido del rango de alturas entre los 1.5 a 2.0 [m] para la misma dirección (SW) con un 17.48%. En cuanto a periodo-dirección (Tabla 41), la mayor combinación de ocurrencia se da en el rango de 13 a 14 [s] proveniente del SW con un 19.50% del tiempo. La segunda mayor combinación es el rango de 14 a 15 [s] para la dirección SW con una frecuencia de 14.36%.

Sobre la base de esta información estadística, se puede establecer que: el rango de alturas significativas con mayor frecuencia de ocurrencia es de 2.0 a 2.5 [m] con un 27.30% del total (Figura 53); el rango de periodos *peak* con mayor frecuencia de ocurrencia (27.63%) es de 13 a 14 [s] (Figura 54) y la dirección con mayor frecuencia de ocurrencia es SW con un 65.68% del total general (Figura 55).

**Tabla 40:** Incidencia conjunta de Altura vs Periodo.

Altura Hs [m]	Dirección									% Ocurrencia
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
0.5-1	0.00	0.43	0.35	0.07	0.00					0.86
1-1.5	0.42	6.20	3.12	0.57	0.06	0.00				10.37
1.5-2	2.17	17.48	4.72	0.77	0.12	0.03	0.00			25.29
2-2.5	0.01	4.00	19.14	3.23	0.66	0.19	0.06	0.01		27.30
2.5-3	0.00	4.25	13.68	1.78	0.43	0.21	0.10	0.02	0.00	20.47
3-3.5	0.00	2.88	6.31	1.03	0.22	0.15	0.08	0.02		10.69
3.5-4	1.10	1.94	0.48	0.13	0.09	0.07	0.03			3.84
4-4.5	0.20	0.43	0.16	0.03	0.03	0.02	0.01			0.88
4.5-5	0.03	0.07	0.07	0.04	0.01	0.01	0.00			0.23
5-5.5	0.00	0.01	0.03	0.02			0.00			0.06
5.5-6	0.00		0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			0.02
6-6.5			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.01
>6.5				0.00						0.00
<b>% Ocurrencia</b>	0.01	15.06	65.68	14.97	2.93	0.87	0.37	0.10	0.00	100%

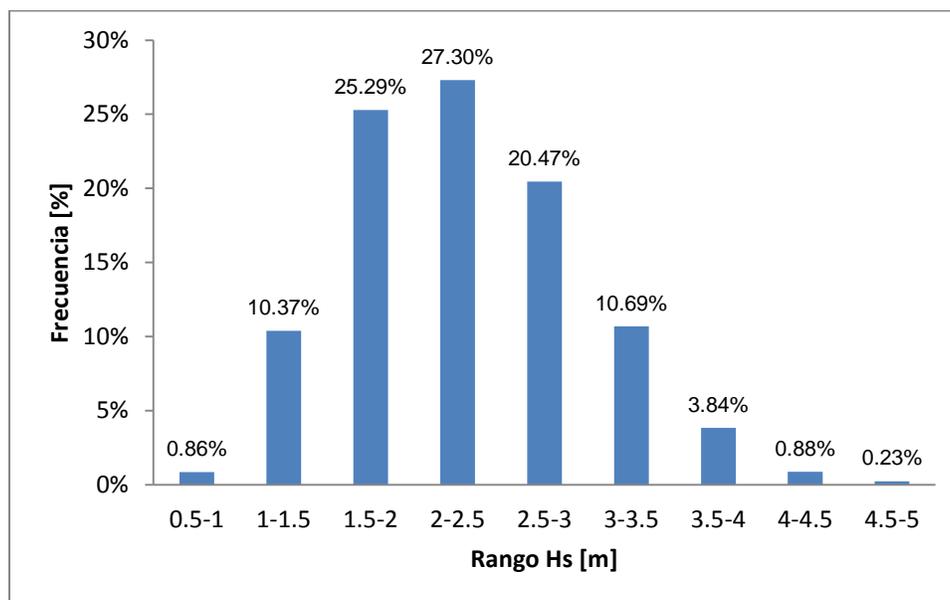
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 41:** Incidencia conjunta Periodo vs Dirección.

Periodo Tp [m]	Dirección									% Ocurrencia	
	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N		
4-5		0.01									0.01
5-6		0.07	0.02	0.00		0.00	0.01	0.00			0.10
6-7	0.01	1.01	0.21	0.00		0.02	0.04	0.01			1.30
7-8	0.00	1.14	0.30	0.01	0.01	0.02	0.06	0.01	0.00		1.56
8-9	0.00	1.11	0.60	0.02	0.05	0.05	0.06	0.03			1.92
9-10		0.72	1.02	0.16	0.16	0.07	0.05	0.03			2.21
10-11		0.58	1.84	0.59	0.27	0.15	0.08	0.01			3.51
11-12		1.31	5.72	1.85	0.56	0.20	0.04	0.00			9.67
12-13		3.04	14.17	3.60	0.63	0.17	0.02				21.63
13-14		3.65	19.50	3.97	0.42	0.09	0.01	0.00			27.63
14-15		1.80	14.36	2.58	0.42	0.06	0.01	0.00			19.24
16-17		0.48	5.87	1.46	0.22	0.04	0.00	0.00			8.07
17-18		0.12	1.63	0.54	0.13	0.00	0.00				2.43
19-20		0.02	0.40	0.15	0.06						0.63
21-22		0.00	0.04	0.03	0.01						0.08
23-24			0.01	0.01							0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.01	15.06	65.68	14.97	2.93	0.87	0.37	0.10	0.00		100%

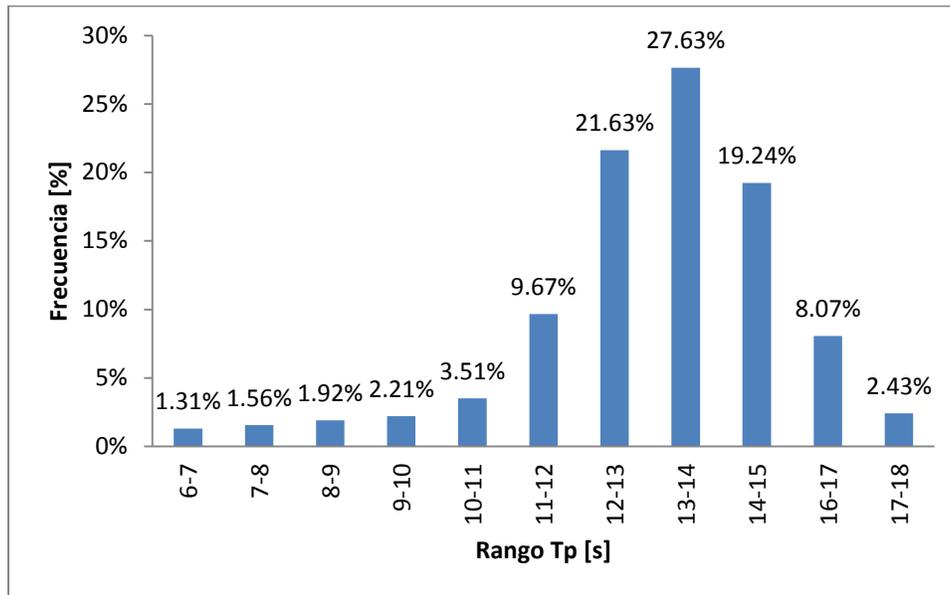
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 53:** Distribución de frecuencias para la Altura significativa.



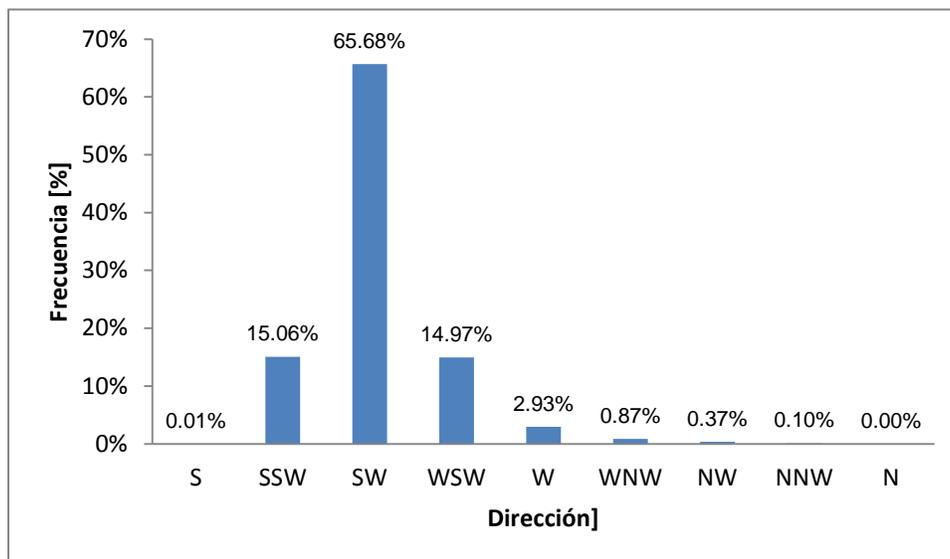
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 54:** Distribución de frecuencias para el Periodo peak.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 55:** Distribución de frecuencias para la Dirección media.



Fuente: Elaboración propia.

## 12.2 CLIMA EXTREMO DE OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS

En la Tabla 42, se observa la lista de los 36 eventos extremos seleccionados en aguas profundas para el cuarto cuadrante.

**Tabla 42:** Lista de eventos seleccionados para el cuarto cuadrante en aguas profundas.

Dirección IV Cuadrante				
N° Datos	Fecha	Hs [m]	T[s]	Dirn [°]
1	13 de agosto de 1988	6.51	14.87	272.33
2	24 de julio de 1987	6.35	10.16	318.04
3	4 de julio de 1984	6.35	10.16	284.65
4	8 de agosto de 2015	6.13	11.18	331.73
5	16 de agosto de 2005	5.69	13.52	279.59
6	18 de junio de 2011	5.23	16.36	281.07
7	11 de julio de 1987	5.11	10.16	332.19
8	27 de mayo 2012	4.98	11.18	309.44
9	15 de julio de 1982	4.97	14.87	273.85
10	16 de agosto de 2012	4.89	13.52	273.97
11	3 de mayo de 2005	4.84	9.24	319.87
12	26 de julio de 1989	4.78	9.24	314.19
13	7 de septiembre de 1997	4.75	13.52	279.51
14	12 de agosto de 1982	4.72	9.24	320.29
15	5 de junio de 1998	4.66	9.24	323.96
16	11 de junio de 1997	4.54	9.24	336.99
17	28 de julio de 1988	4.49	11.18	295.94
18	19 de mayo de 1993	4.47	13.52	294.31
19	22 de julio de 2004	4.46	13.52	269.48
20	5 de junio de 1992	4.39	9.24	312.32
21	6 de julio de 2010	4.39	10.16	291.37
22	4 de junio de 1997	4.34	13.52	283.50
23	26 de abril de 1980	4.24	8.40	325.34
24	12 de junio de 1996	4.22	11.18	314.94
25	17 de agosto de 1997	4.20	9.24	336.17
26	15 de agosto de 2009	4.18	12.29	276.11
27	4 de julio de 1996	4.08	8.40	344.15
28	23 de mayo de 2005	4.06	12.29	277.59
29	24 de agosto de 1996	3.98	10.16	311.52
30	23 de junio de 2000	3.97	8.40	341.94
31	24 de mayo de 1994	3.94	12.29	276.25
32	19 de julio de 2001	3.94	10.16	298.69
33	8 de mayo de 1982	3.94	10.16	320.58
34	19 de junio de 2004	3.91	16.36	270.66
35	11 de agosto de 1987	3.91	11.18	294.72
36	25 de julio de 1980	3.90	9.24	331.23

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 43, se observa la lista de los 36 eventos extremos seleccionados en aguas profundas para el tercer cuadrante.

**Tabla 43:** Lista de eventos seleccionados para el tercer cuadrante en aguas profundas.

Dirección III Cuadrante				
Nº Datos	Fecha	Hs [m]	T[s]	Dir[m] [°]
1	3 de julio de 2013	6.12	18.00	241.14
2	21 de junio de 1997	5.90	16.36	242.03
3	31 de octubre de 2003	5.69	10.16	205.72
4	18 de agosto de 2010	5.69	16.36	244.94
5	25 de mayo de 1985	5.38	16.36	237.62
6	18 de junio de 1994	5.37	18.00	237.41
7	2 de agosto de 1981	5.34	16.36	243.00
8	22 de agosto de 1992	5.30	16.36	239.27
9	14 de junio de 2010	5.30	14.87	244.48
10	2 de julio de 2014	5.29	18.00	228.32
11	8 de julio de 2006	5.11	13.52	269.14
12	13 de agosto de 1999	5.11	10.16	199.19
13	29 de marzo de 1990	5.03	18.00	216.47
14	5 de abril de 1989	4.98	18.00	216.28
15	16 de mayo de 1982	4.90	16.36	249.12
16	7 de mayo de 1993	4.88	16.36	227.95
17	27 de mayo de 1986	4.86	14.87	264.85
18	24 de julio de 2010	4.82	14.87	236.63
19	8 de junio de 1982	4.79	16.36	222.13
20	5 de septiembre de 2007	4.78	16.36	234.74
21	22 de septiembre de 1992	4.71	16.36	210.35
22	5 de abril de 2012	4.66	16.36	208.90
23	19 de mayo de 1981	4.64	16.36	227.87
24	16 de octubre de 1986	4.63	16.36	218.23
25	14 de enero de 2002	4.63	14.87	209.10
26	22 de octubre de 2003	4.63	14.87	208.94
27	30 de marzo de 2009	4.62	18.00	220.48
28	21 de junio de 1983	4.62	14.87	238.78
29	20 de julio de 2015	4.62	16.36	215.46
30	6 de julio de 2009	4.62	16.36	238.73
31	8 de junio de 2011	4.61	16.36	234.85
32	24 de junio de 1994	4.60	14.87	219.58
33	20 de octubre de 1992	4.59	16.36	215.56
34	20 de octubre de 2010	4.59	18.00	225.11
35	5 de octubre de 1990	4.59	16.36	214.49
36	4 de julio de 1998	4.58	14.87	225.87

Fuente: Elaboración propia.

## 12.3 TRANSFERENCIA DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS

Los resultados de los coeficientes de agitación de la transferencia de oleaje hacia el Nodo de Control 1 y 2, aplicado a la Batimetría Completa y Batimetría Modificada se exponen desde la Tabla 44 a la Tabla 47.

**Tabla 44:** Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 1, Batimetría Completa.

Tp / Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
6		0.00001	0.00003	0.00009		0.0007	0.0007	0.0002	0.0002
7	0.0002	0.0005	0.0017	0.0059	0.0158	0.0423	0.0462	0.0137	0.0137
8	0.0008	0.0019	0.0069	0.0222	0.0593	0.1589	0.1737	0.0517	
9	0.0017	0.0040	0.0140	0.0428	0.1140	0.3052	0.3339	0.0995	
10	0.0030	0.0069	0.0238	0.0719	0.1921	0.5133	0.5617	0.1675	
11	0.0048	0.0109	0.0373	0.1118	0.2985	0.7962	0.8712	0.2599	
12	0.0057	0.0127	0.0413	0.1059	0.2805	0.7420	0.8143	0.2445	
13	0.0064	0.0139	0.0411	0.0963	0.2627	0.6764	0.7424	0.2250	
14	0.0066	0.0139	0.0388	0.0961	0.2628	0.6570	0.7183	0.2192	
15	0.0062	0.0130	0.0363	0.0972	0.2558	0.6275	0.6828	0.2093	
16	0.0056	0.0117	0.0342	0.0941	0.2356	0.5738	0.6220	0.1909	
17	0.0049	0.0101	0.0302	0.0825	0.2053	0.5029	0.5453	0.1671	
18		0.0088	0.0262	0.0702	0.1783	0.4406	0.4790		
19		0.0080	0.0235	0.0624	0.1604				
20		0.0074	0.0216	0.0573	0.1477				
21		0.0069	0.0201	0.0532	0.1370				
22		0.0064	0.0186	0.0495	0.1273				
23			0.0173	0.0461					

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 45:** Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 1, Batimetría Modificada.

Tp / Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
6		0.00001	0.00003	0.00009		0.0007	0.0007	0.0002	0.0002
7	0.0003	0.0007	0.0021	0.0061	0.0188	0.0438	0.0471	0.0138	0.0029
8	0.0012	0.0026	0.0085	0.0239	0.0704	0.1646	0.1771	0.0518	
9	0.0024	0.0055	0.0177	0.0480	0.1347	0.3160	0.3405	0.0996	
10	0.0044	0.0098	0.0309	0.0816	0.2260	0.5314	0.5729	0.1676	
11	0.0070	0.0156	0.0487	0.1273	0.3501	0.8242	0.8887	0.2600	
12	0.0084	0.0185	0.0565	0.1364	0.3203	0.7672	0.8324	0.2436	
13	0.0105	0.0224	0.0638	0.1318	0.2842	0.6990	0.7611	0.2226	
14	0.0111	0.0230	0.0625	0.1159	0.2718	0.6802	0.7381	0.2156	
15	0.0105	0.0215	0.0571	0.1046	0.2580	0.6512	0.7030	0.2049	
16	0.0094	0.0189	0.0512	0.1046	0.2360	0.5964	0.6410	0.1864	
17	0.008	0.0162	0.0446	0.0918	0.2076	0.5225	0.5617	0.1633	
18		0.0142	0.0391	0.0809	0.1827	0.4574	0.4928		
19		0.0129	0.0354	0.0733	0.1652				
20		0.0119	0.0327	0.0676	0.1520				
21		0.0111	0.0304	0.0627	0.1406				
22		0.0103	0.0282	0.0581	0.1303				
23		0.0096	0.0263	0.0540					

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 46:** Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 2, Batimetría Completa.

Tp / Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
6		0.00001	0.00002	0.00007		0.001	0.00065	0.00021	0.00021
7	0.0002	0.0004	0.0014	0.0048	0.012	0.03324	0.04201	0.013	0.01337
8	0.001	0.0016	0.0055	0.0180	0.045	0.12498	0.15796	0.050	
9	0.00143	0.0033	0.0113	0.0346	0.087	0.24053	0.304	0.097	
10	0.00252	0.0057	0.0193	0.0582	0.147	0.40518	0.511	0.162	
11	0.00399	0.0090	0.0302	0.0904	0.228	0.62906	0.793	0.252	
12	0.0047	0.0104	0.0335	0.0855	0.211	0.59223	0.743	0.236	
13	0.00532	0.0115	0.0338	0.0771	0.198	0.5488	0.679	0.214	
14	0.00555	0.0117	0.0322	0.0759	0.201	0.54018	0.658	0.207	
15	0.00522	0.0110	0.0299	0.0764	0.198	0.5203	0.625	0.196	
16	0.00476	0.0099	0.0278	0.0741	0.184	0.47744	0.570	0.179	
17	0.0041	0.0085	0.0245	0.0651	0.160	0.41723	0.499	0.157	
18		0.0074	0.0213	0.0555	0.138	0.36391	0.438		
19		0.0067	0.0192	0.0494	0.124				
20		0.0062	0.0176	0.0453	0.114				
21		0.0058	0.0164	0.0421	0.106				
22		0.0054	0.0152	0.0391	0.099				
23			0.0141	0.0364					

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 47:** Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 2, Batimetría Modificada.

Tp / Dir	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
6		0.00001	0.00003	0.00008		0.0006	0.0007	0.0002	0.0002
7	0.0003	0.0007	0.0021	0.0054	0.01675	0.03852	0.04489	0.01334	0.00281
8	0.00115	0.0026	0.0082	0.0215	0.06284	0.14455	0.1687	0.05008	
9	0.00239	0.0054	0.0170	0.0438	0.12033	0.2773	0.32424	0.09601	
10	0.00434	0.0098	0.0300	0.0750	0.20185	0.46624	0.54539	0.16127	
11	0.00695	0.0155	0.0473	0.1172	0.31269	0.72306	0.84596	0.24996	
12	0.00837	0.0182	0.0551	0.1299	0.28746	0.67119	0.79069	0.23112	
13	0.01043	0.0222	0.0637	0.1307	0.25409	0.60974	0.72127	0.20736	
14	0.0115	0.0238	0.0642	0.1148	0.24062	0.5926	0.69901	0.19825	
15	0.01125	0.0228	0.0596	0.1030	0.22677	0.56705	0.666	0.18715	
16	0.00987	0.0199	0.0528	0.1030	0.20666	0.51933	0.60794	0.17007	
17	0.00836	0.0169	0.0456	0.0902	0.18216	0.45516	0.53287	0.14951	
18		0.0147	0.0399	0.0795	0.16085	0.3986	0.46745		
19		0.0134	0.0362	0.0722	0.14568				
20		0.0124	0.0334	0.0666	0.13402				
21		0.0115	0.0311	0.0617	0.12396				
22		0.0107	0.0289	0.0573	0.11482				
23		0.01	0.0269	0.0533	0.10647				

Fuente: Elaboración propia.

## 12.4 CLIMA MEDIO DE OLAJE EN EL SITIO DE INTERÉS

Para comprender la condición que presenta el oleaje en el sector de estudio, específicamente en el Nodo de Control 1 y 2 se exponen las siguientes tablas de incidencia (incluyendo para el análisis las dos batimetrías generadas).

### Nodo de Control 1 Batimetría Completa

**Tabla 48:** Incidencia conjunta de Periodo vs Dirección, Batimetría Completa.

Periodo Tp [s]	Dirección [°]						% Ocurrencia
	310-313.25	316.5-319.75	319.75-323	323-326.25	326.25-329.5	329.5-332.75	
5-6	0.02		0.01		0.10	0.34	0.47
7-8	0.14		0.09		3.37	0.76	4.42
9-10	0.12		0.22		5.34		5.72
11-12	0.06		0.37	3.67	27.20		31.30
13-14	0.01	0.09		27.54			27.63
15-16	0.02	0.10	0.64	26.55			27.31
17-18			0.13	2.29			2.43
19-20				0.63			0.63
21-22			0.01	0.07			0.08
23-24				0.02			0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.37	0.19	1.46	60.75	36.02	1.10	100%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 49:** Incidencia conjunta de Altura vs Dirección, Batimetría Completa.

Altura Hs [m]	Dirección [°]						% Ocurrencia
	310-313.25	316.5-319.75	319.75-323	323-326.25	326.25-329.5	329.5-332.75	
< 0.5	0.10		0.65	59.97	35.53	1.10	97.44
0.5-1	0.08	0.03	0.28	0.69	0.45		1.54
1-1.5	0.06	0.05	0.16	0.09	0.04		0.40
1.5-2	0.04	0.05	0.15				0.25
2-2.5	0.05	0.04	0.14				0.23
2.5-3	0.02	0.02	0.05				0.09
3-3.5	0.01		0.03				0.04
5-5.5	0.01						0.01
<b>% Ocurrencia</b>	0.36	0.19	1.46	60.75	36.02	1.10	100%

Fuente: Elaboración propia.

## Nodo de Control 1 Batimetría Modificada

**Tabla 50:** Incidencia conjunta de Altura vs Periodo, Batimetría Modificada.

Altura Hs [m]	Periodo [s]										% Ocurrencia
	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	
0-0.5	0.47	4.33	5.3	29.77	27.25	26.92	2.42	0.63	0.08	0.02	97.18
0.5-1		0.09	0.17	0.91	0.24	0.26	0.01				1.67
1-1.5			0.12	0.24	0.07	0.08					0.51
1.5-2			0.08	0.1	0.03	0.04					0.24
2-2.5			0.04	0.13	0.03	0.02					0.22
2.5-3				0.08	0.01	0.01					0.1
3-3.5				0.04							0.05
5-5.5				0.02							0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.47	4.42	5.72	31.30	27.63	27.31	2.43	0.63	0.08	0.02	100%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 51:** Incidencia conjunta de Periodo vs Dirección, Batimetría Modificada.

Periodo Tp [s]	Dirección [°]					% Ocurrencia
	317.25-320.25	320.25-323.25	323.25-326.25	326.25-329.25	329.25-332.25	
5-6		0.01			0.44	0.47
7-8		0.09		0.09	4.05	4.42
9-10		0.22		5.34		5.72
11-12	0.17	0.20	21.44	9.44		31.30
13-14	0.09	27.54				27.63
15-16		27.19				27.31
17-18		1.88	0.54			2.43
19-20		0.47	0.15			0.63
21-22		0.05	0.03			0.08
23-24		0.01	0.01			0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.26	57.65	22.17	14.86	4.49	100%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 52:** Incidencia conjunta de Altura vs Dirección, Batimetría Modificada.

Altura Hs [m]	Dirección [°]					% Ocurrencia
	317.25-320.25	320.25-323.25	323.25-326.25	326.25-329.25	329.25-332.25	
< 0.5		56.66	21.57	14.27	4.49	97.18
0.5-1	0.01	0.56	0.50	0.49		1.67
1-1.5	0.05	0.18	0.10	0.10		0.51
1.5-2	0.06	0.11				0.24
2-2.5	0.08	0.07				0.22
2.5-3	0.04	0.04				0.10
3-3.5	0.01	0.02				0.05
5-5.5	0.01					0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.26	57.65	22.17	14.86	4.49	100%

Fuente: Elaboración propia.

Nodo de Control 2 Batimetría Completa

**Tabla 53:** Incidencia conjunta de Altura-Periodo.

Altura Hs [m]	Periodo										% Ocurrencia
	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	
0-0.5	0.469	4.387	5.387	30.278	27.360	27.060	2.422	0.626	0.077	0.015	98.08
0.5-1		0.033	0.137	0.611	0.183	0.168	0.007				1.140
1-1.5			0.137	0.117	0.035	0.044	0.002				0.335
1.5-2			0.047	0.171	0.033	0.029					0.280
2-2.5			0.010	0.076	0.021	0.008					0.114
2.5-3			0.001	0.035							0.036
3-3.5			0.001	0.008	0.001						0.010
3.5-4				0.002							0.002
4-4.5				0.001							0.001
4.5-5				0.001							0.001
<b>% Ocurrencia</b>	0.47	4.42	5.72	31.30	27.63	27.31	2.43	0.63	0.08	0.02	100%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 54:** Incidencia conjunta de Periodo-Dirección.

Periodo Tp [s]	Dirección [°]					% Ocurrencia
	300.75-303.75	306.75-309.75	312.75-315.75	315.75-318.75	318.75-321.75	
5-6	0.00	0.02	0.01	0.00	0.44	0.47
7-8	0.05	0.14	0.09	0.98	3.15	4.42
9-10	0.04	0.12	0.22	5.34		5.72
11-12		0.04	0.20	30.87		31.30
13-14			27.54			27.63
15-16		0.10	27.19			27.31
17-18			2.43			2.43
19-20			0.63			0.63
21-22			0.08			0.08
23-24			0.02			0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.10	0.42	58.38	37.20	3.59	100%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 55:** Incidencia conjunta de Altura-Dirección.

Altura Hs [m]	Dirección [°]					% Ocurrencia
	300.75-303.75	306.75-309.75	312.75-315.75	315.75-318.75	318.75-321.75	
0 -0.5	0.09	0.13	57.67	36.60	3.59	98.08
0.5-1	0.01	0.09	0.41	0.60		1.14
1-1.5		0.09	0.15			0.33
1.5-2		0.06	0.10			0.28
2-2.5		0.02	0.04			0.11
2.5-3		0.02	0.01			0.04
3-3.5		0.01				0.01
3.5-4						0.00
4-4.5						0.00
4.5-5						0.00
<b>% Ocurrencia</b>	0.10	0.42	58.38	37.20	3.59	100%

Fuente: Elaboración propia

Nodo de Control 2 Batimetría Modificada

**Tabla 56:** Incidencia conjunta de Altura-Periodo.

Altura Hs [m]	Periodo										% Ocurrencia
	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	
0-0.5	0.47	4.36	5.34	29.87	27.28	26.99	2.42	0.63	0.08	0.02	97.45
0.5-1		0.06	0.15	0.91	0.23	0.21	0.01				1.56
1-1.5			0.14	0.18	0.06	0.06					0.44
1.5-2			0.07	0.14	0.03	0.03					0.27
2-2.5			0.02	0.12	0.02	0.02					0.18
2.5-3				0.06	0.01						0.07
3-3.5				0.02							0.02
3.5-4											0.00
4-4.5											0.00
4.5-5											0.00
<b>% Ocurrencia</b>	0.47	4.42	5.72	31.29	27.63	27.31	2.43	0.63	0.08	0.02	100%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 57:** Incidencia conjunta de Periodo-Dirección.

Periodo Tp [s]	Dirección					% Ocurrencia
	300.75-303.75	312.75-315.75	315.75-318.75	318.75-321.75	321.75-324.75	
5-6		0.01			0.44	0.47
7-8	0.05	0.09		0.09	4.05	4.42
9-10	0.04	0.22		5.34		5.72
11-12		0.37	20.81	10.06		31.30
13-14		27.12	0.42			27.63
15-16		27.19				27.31
17-18		2.29	0.13			2.43
19-20		0.57	0.06			0.63
21-22		0.07	0.01			0.08
23-24		0.02				0.02
<b>% Ocurrencia</b>	0.10	57.93	21.43	15.49	4.49	100%

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 58:** Incidencia conjunta de Altura-Dirección.

Altura Hs [m]	Dirección					% Ocurrencia
	300.75-303.75	312.75-315.75	315.75-318.75	318.75-321.75	321.75-324.75	
< 0.5	0.10	57.14	21.16	14.46	4.49	97.45
0.5-1	0.01	0.29	0.24	0.92		1.56
1-1.5		0.18	0.03	0.11		0.44
1.5-2		0.17				0.27
2-2.5		0.11				0.18
2.5-3		0.04				0.07
3-3.5		0.01				0.02
3.5-4						0.00
4-4.5						0.00
4.5-5						0.00
<b>% Ocurrencia</b>	0.10	57.93	21.43	15.49	4.49	100%

Fuente: Elaboración propia

## 12.5 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN EL SITIO DE INTERÉS

En el presente Anexo, se muestra parte del proceso que permitió la obtención de los resultados expuestos. En la Tabla 59 y 60, se observa la lista de los 36 eventos extremos seleccionados en el sitio de interés para los Nodos de Control 1 y 2 Batimetría Completa, proveniente de las direcciones incidentes desde el cuarto cuadrante.

**Tabla 59:** Lista de eventos seleccionados en el sitio de interés, Nodo de Control 1, Batimetría Completa.

Nº Datos	Fecha	Hs [m]	T[s]	Dirm [°]
1	24 de julio de 1987	5.118	11.18	312.809
2	8 de agosto de 2015	4.847	11.18	312.809
3	27 de mayo de 2012	4.337	11.18	312.809
4	7 de junio de 2006	3.691	11.18	312.809
5	16 de agosto de 2005	3.676	12.29	320.369
6	12 de junio de 1996	3.674	11.18	312.809
7	28 de julio de 1988	3.572	11.18	321.276
8	16 de julio de 1982	3.541	12.29	320.369
9	26 de julio de 1989	3.427	11.18	321.276
10	12 de julio de 1987	3.403	11.18	312.809
11	2 de julio de 2005	3.327	11.18	312.809
12	25 de mayo de 2002	3.267	11.18	312.809
13	15 de agosto de 2009	3.262	11.18	321.276
14	4 de julio de 1984	3.260	10.16	321.34
15	23 de mayo de 2005	3.127	11.18	321.276
16	11 de agosto de 1987	3.114	11.18	321.276
17	13 de agosto de 1988	3.113	12.29	320.369
18	23 de mayo de 2008	3.037	11.18	321.276
19	23 de mayo de 1994	3.028	11.18	321.276
20	6 de septiembre de 1997	3.013	13.52	318.578
21	19 de julio de 1980	2.971	11.18	321.276
22	28 de junio de 2009	2.941	11.18	321.276
23	19 de mayo de 1993	2.934	13.52	318.578
24	4 de mayo de 2005	2.870	13.52	318.578
25	4 de junio de 1997	2.849	13.52	318.578
26	2 de agosto de 1989	2.835	12.29	312.338
27	21 de abril de 1986	2.824	11.18	321.276
28	9 de mayo de 1982	2.800	11.18	321.276
29	21 de mayo de 2003	2.771	11.18	321.276
30	23 de julio de 1995	2.769	12.29	320.369
31	12 de julio de 2006	2.762	11.18	321.276
32	11 de julio de 1984	2.762	12.29	320.369
33	20 de junio de 2011	2.720	14.87	318.218
34	1 de junio de 1982	2.717	11.18	321.276
35	9 de junio de 1995	2.651	12.29	320.369
36	15 de mayo de 1986	2.631	11.18	321.276

Fuente: Elaboración propia

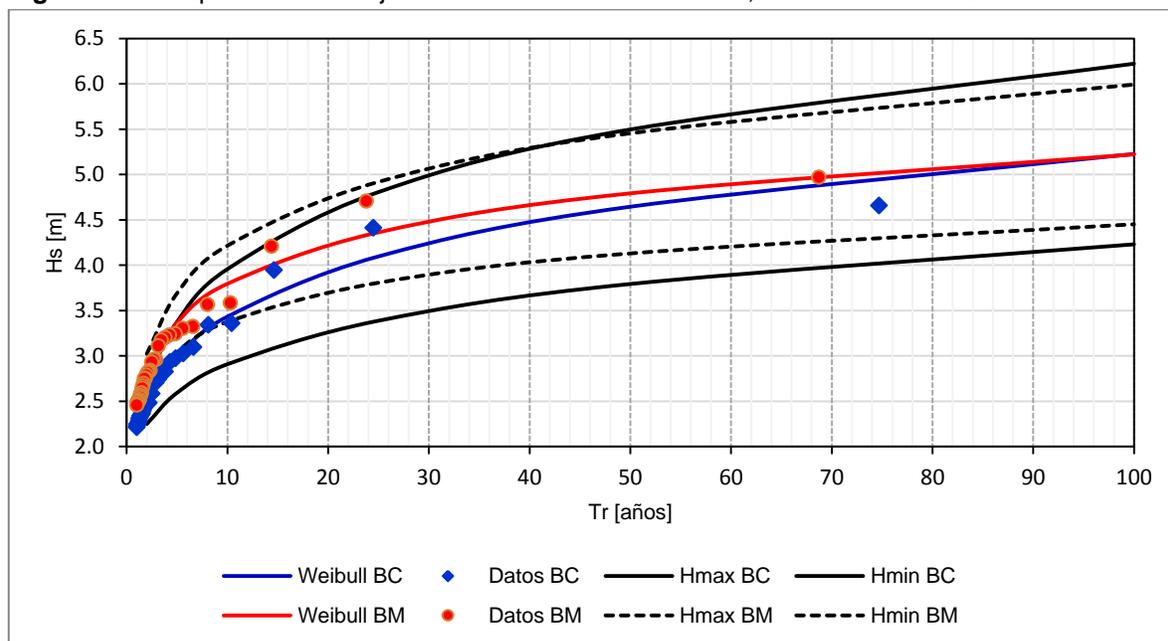
**Tabla 60:** Lista de eventos seleccionados en el sitio de interés, Nodo de Control 2, Batimetría Completa.

N° Datos	Fecha	Hs [m]	T[s]	Dirm [°]
1	24 de julio de 1987	4.658	11.18	307.058
2	8 de agosto de 2015	4.412	11.18	307.058
3	27 de mayo de 2012	3.947	11.18	307.058
4	7 de junio de 2006	3.359	11.18	307.058
5	12 de junio de 1996	3.344	11.18	307.058
6	12 de julio de 1987	3.097	11.18	307.058
7	2 de julio de 2005	3.028	11.18	307.058
8	25 de mayo de 2002	2.974	11.18	307.058
9	16 de agosto de 2005	2.934	12.29	312.315
10	16 de julio de 1982	2.826	12.29	312.315
11	28 de julio de 1988	2.822	11.18	313.422
12	20 de mayo de 2008	2.748	11.18	307.058
13	26 de julio de 1989	2.708	11.18	313.422
14	14 de agosto de 2009	2.707	11.18	307.058
15	2 de agosto de 1989	2.586	12.29	306.265
16	4 de julio de 1984	2.573	10.16	313.506
17	13 de agosto de 1988	2.485	12.29	312.315
18	6 de septiembre de 1997	2.478	13.52	310.133
19	23 de mayo de 2005	2.470	11.18	313.422
20	11 de agosto de 1987	2.460	11.18	313.422
21	3 de junio de 1997	2.435	14.87	304.511
22	19 de mayo de 1993	2.412	13.52	310.133
23	23 de mayo de 1994	2.392	11.18	313.422
24	23 de agosto de 1996	2.363	12.29	306.265
25	4 de mayo de 2005	2.360	13.52	310.133
26	19 de julio de 1980	2.348	11.18	313.422
27	3 de agosto de 1980	2.338	13.52	304.783
28	28 de junio de 2009	2.324	11.18	313.422
29	23 de junio de 2000	2.311	12.29	306.265
30	5 de mayo de 1992	2.286	12.29	306.265
31	8 de julio de 1986	2.271	12.29	306.265
32	20 de junio de 2011	2.255	14.87	309.669
33	5 de junio de 1998	2.252	10.16	307.112
34	1 de septiembre de 2014	2.250	12.29	306.265
35	21 de abril de 1986	2.231	11.18	313.422
36	9 de mayo de 1982	2.212	11.18	313.422

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 56 se muestra la distribución de las alturas de ola extremas proyectadas en función a los periodos de retorno teóricos calculados, mientras en la Tabla 61, se observa una comparación de los valores estimados de altura de ola significativa para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Finalmente la Tabla 62 expone la comparación de los resultados para las dos metodologías empleadas en la obtención de alturas de ola en el Nodo de Control 2.

**Figura 56:** Comparación de oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 2.



**Tabla 61:** Comparación de valores de oleaje en el sitio de interés, Nodo de Control 2.

Tr [años]	Batimetría Completa			Batimetría Modificada		
	Hs [m]	Hs min [m]	Hs máx [m]	Hs [m]	Hs min [m]	Hs máx [m]
2	2.49	2.25	2.73	2.80	2.57	3.02
5	2.98	2.59	3.38	3.37	3.04	3.69
10	3.43	2.91	3.96	3.80	3.37	4.22
25	<b>4.10</b>	3.39	4.81	<b>4.36</b>	3.81	4.92
50	<b>4.64</b>	3.79	5.50	<b>4.79</b>	4.13	5.45
100	5.23	4.23	6.22	5.22	4.45	5.99

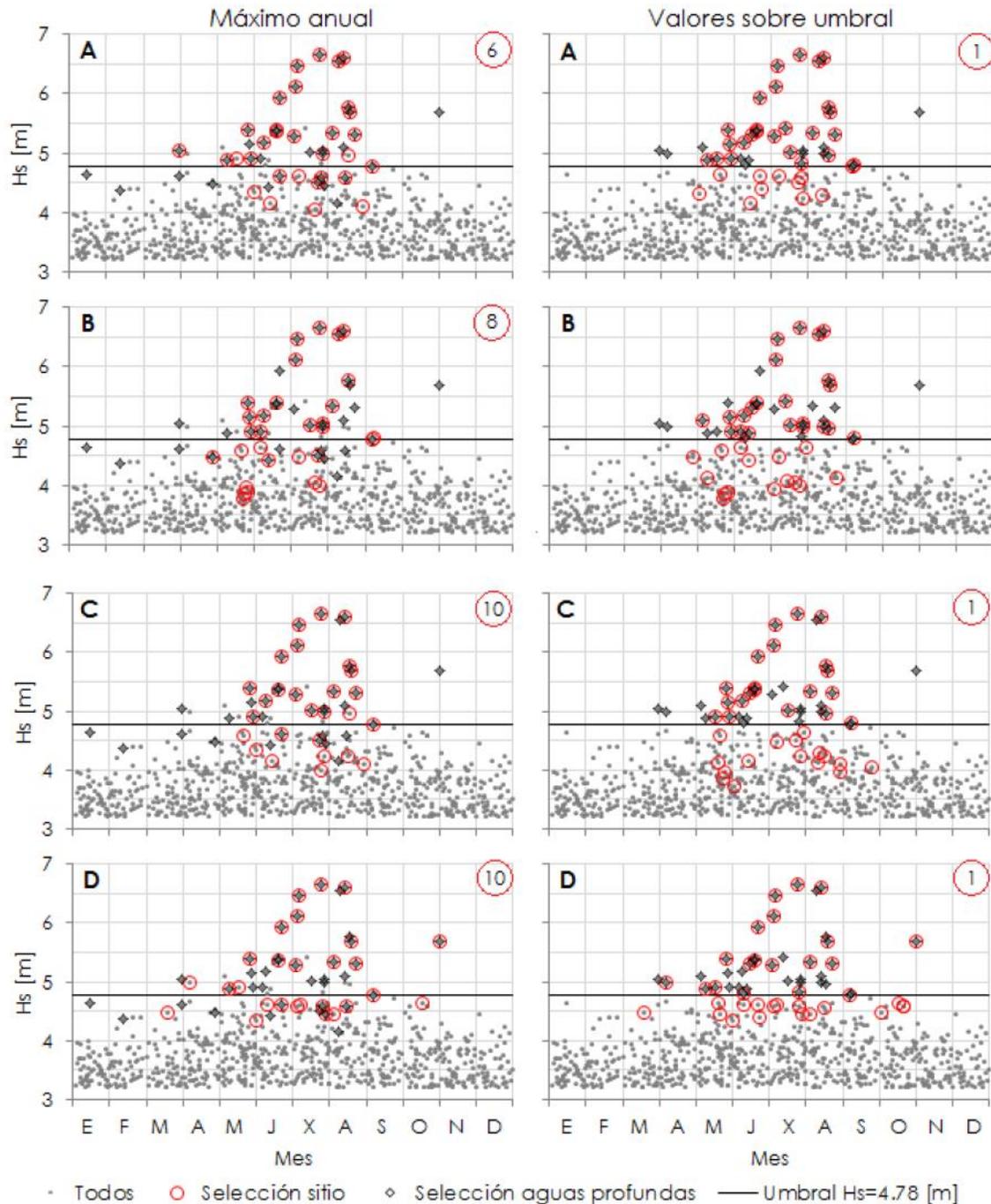
**Tabla 62:** Comparación alturas de diseño en aguas profundas y sitio de interés, Nodo de Control 2.

Tr [años]	Alturas Hs [m] Transferencia IV cuadrante		Alturas Hs [m] Extremo sitio de interés	
	Batimetría completa	Batimetría modificada	Batimetría completa	Batimetría modificada
25	4.92	5.25	4.10	4.36
50	5.23	5.58	4.64	4.79

Fuente: Elaboración propia.

## 12.6 EVALUACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE OBRAS, SEGÚN MOLINA (2016)

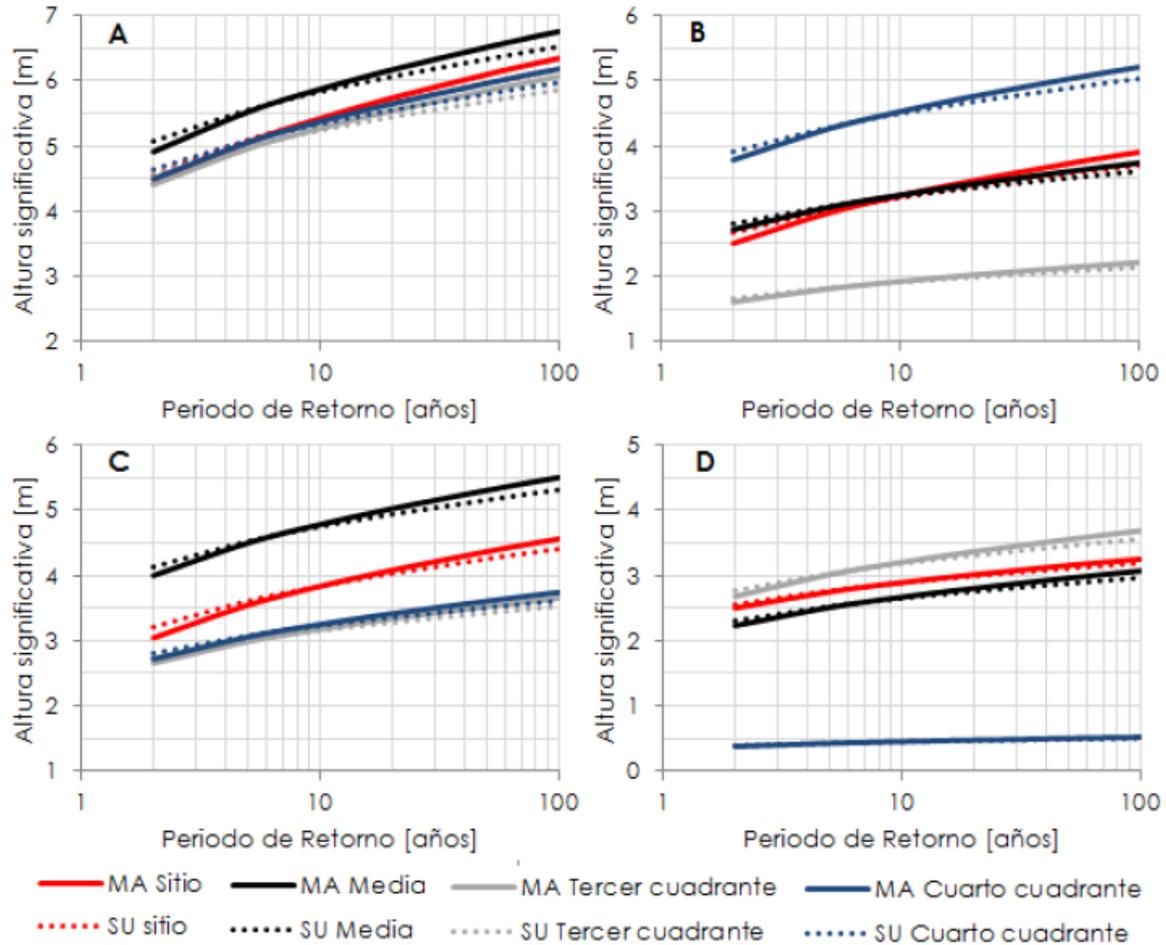
**Figura 57:** Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en cada sitio. Valor círculo indica eventos extremos que no lo son en aguas profundas.



Fuente: Molina (2016).

Del análisis comparativo expuesto en la Figura 57, se desprende que existen diferencias en los eventos que son considerados como extremos en aguas profundas respecto de la evaluación en el sitio. Esto da a entender que un evento en aguas profundas no necesariamente lo es en el sitio de estudio (Molina, 2016).

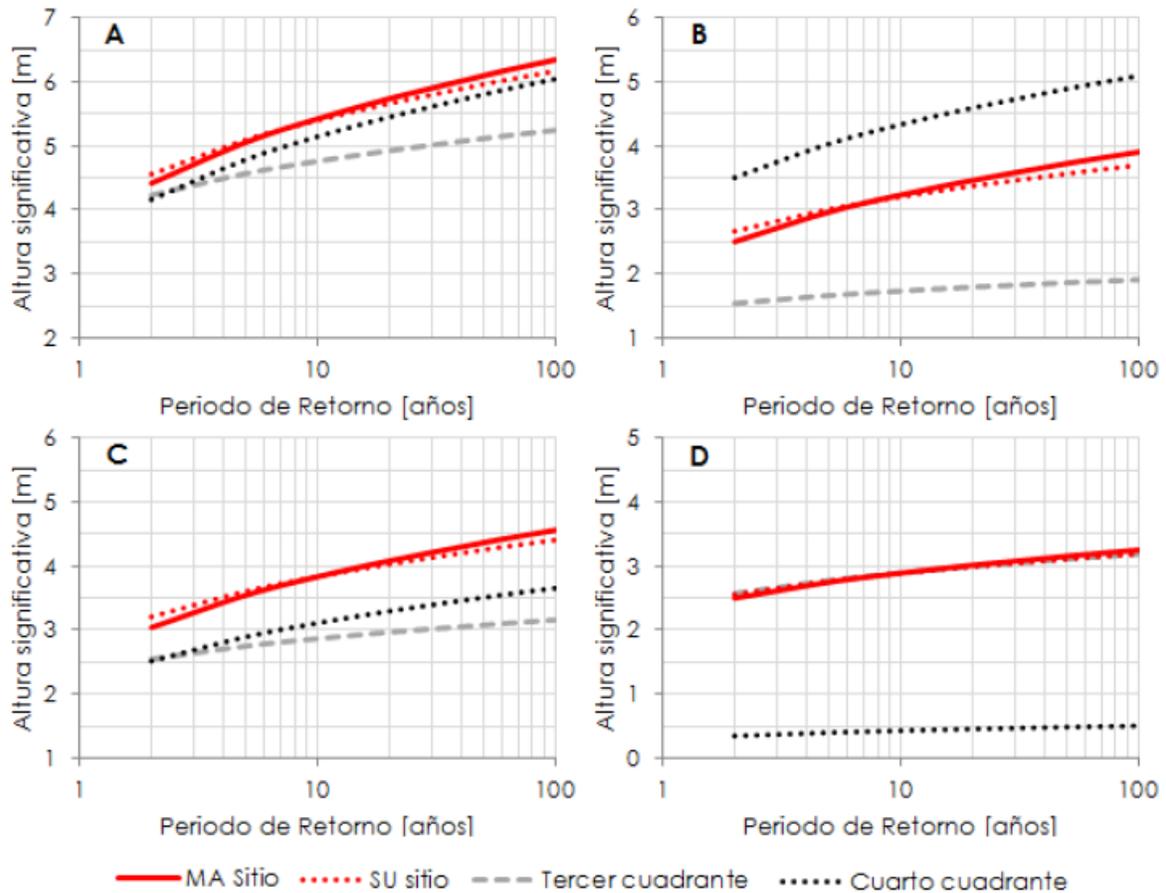
**Figura 58:** Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio (rojo) y propagación al sitio de las alturas estimadas en aguas profundas por parámetros medios (negro), tercer (gris) y cuarto cuadrante (azul) tanto por selección de máximos anuales (línea continua) como de valores sobre umbral (línea punteada).



Fuente: Molina (2016).

Los resultados presentados en la Figura 58, muestran que el efecto de la selección de eventos extremos por método de máximo anual y valores sobre el umbral provoca en todos los casos que los valores obtenidos por el primero son superiores en periodo de retorno mayores, siendo el método de máximo anuales, desde ese punto de vista, conservador respecto a valores obre el umbral (Molina, 2016).

**Figura 59:** Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio con selección de máximo anual (rojo continua) y valores sobre el umbral (rojo punteada) y propagación al sitio de de las alturas estimadas en aguas profundas divididas por dirección de incidencia tercer cuadrante (gris segmentada) y cuarto cuadrante (negra punteada).



Fuente: **Molina (2016)**.

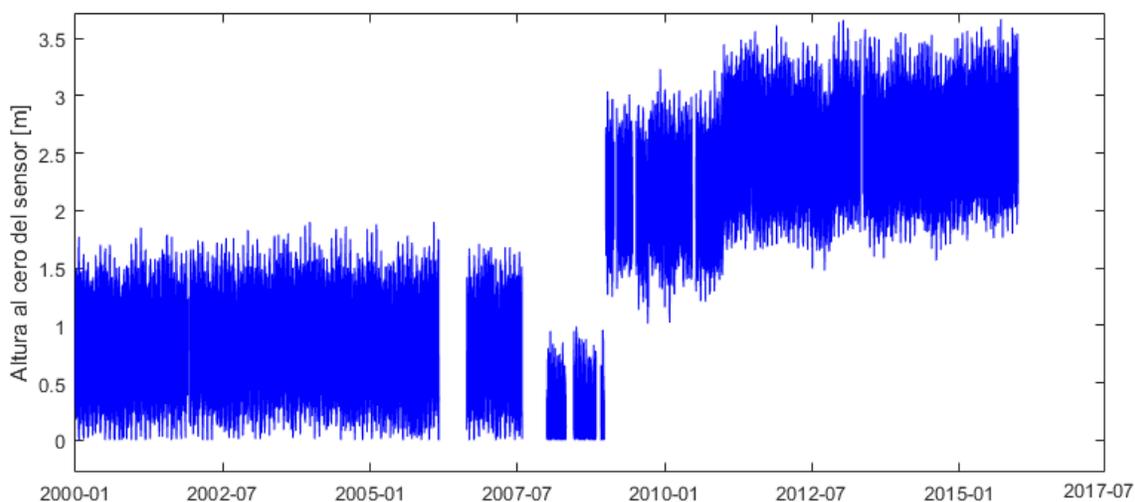
El análisis de la Figura 59, muestra la estimación del periodo de retorno a partir de la discretización por cuadrante, donde se observa la evaluación en los sitios después de la propagación. Los valores obtenidos son variables dependiendo del sitio analizado, destacando valores menores a los resultantes de la evaluación en el sitio, salvo en casos donde el sitio se encuentra completamente expuesto al cuadrante desde el cual proviene la aproximación (Molina, 2016).

## 13 ANEXO D - ANÁLISIS DE MAREA Y NIVELES

### 13.1 CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

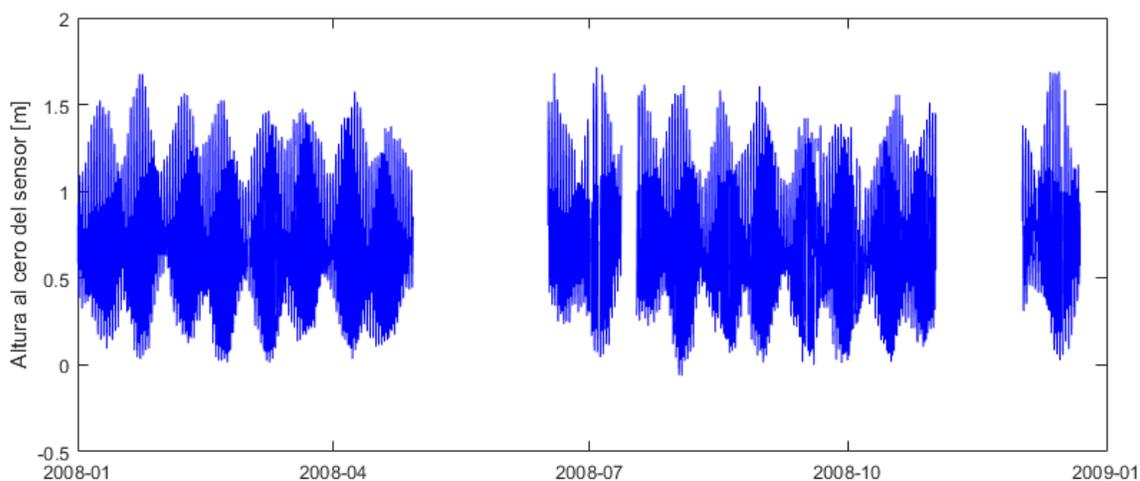
En la Figura 60 se aprecia la serie del nivel del mar para Valparaíso durante los 16 años de estudio, mientras la Figura 61 expone un ejemplo donde se aprecian conjuntos de datos faltantes (“*offset*”) en los registros del año 2008 de aproximadamente 47 días (29 de abril a 16 de junio), además de una ausencia de datos para el mes de noviembre cercana a los 30 días.

**Figura 60:** Serie del nivel del mar registrada para Valparaíso entre el año 2000 a 2015.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 61:** Serie del nivel del mar registrada para Valparaíso año 2008.



Fuente: Elaboración propia.

## 13.2 ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE MAREAS

De la Tabla 63 a la Tabla 68 se presentan los parámetros característicos que describen el régimen mareal en la bahía de Valparaíso para los años 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015.

**Tabla 63:** Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2010.

<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>
Máxima pleamar	1.95
Media pleamares máximas	1.54
Media pleamares	1.38
Nivel medio del mar	0.91
Media bajamares	0.43
Media bajamares mínimas	0.39
Mínima bajamar	0.08

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 64:** Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2011.

<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>
Máxima pleamar	1.92
Media pleamares máximas	1.54
Media pleamares	1.38
Nivel medio del mar	0.91
Media bajamares	0.43
Media bajamares mínimas	0.39
Mínima bajamar	0.11

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 65:** Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2012.

<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>
Máxima pleamar	1.95
Media pleamares máximas	1.53
Media pleamares	1.38
Nivel medio del mar	0.91
Media bajamares	0.43
Media bajamares mínimas	0.39
Mínima bajamar	0.08

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 66:** Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2013.

<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>
Máxima pleamar	1.95
Media pleamares máximas	1.53
Media pleamares	1.39
Nivel medio del mar	0.91
Media bajamares	0.42
Media bajamares mínimas	0.38
Mínima bajamar	0.07

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 67:** Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2014.

<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>
Máxima pleamar	1.90
Media pleamares máximas	1.53
Media pleamares	1.39
Nivel medio del mar	0.91
Media bajamares	0.42
Media bajamares mínimas	0.38
Mínima bajamar	0.08

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 68:** Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2015.

<b>Parámetros Referencia Mareal</b>	<b>m [NRS]</b>
Máxima pleamar	1.92
Media pleamares máximas	1.52
Media pleamares	1.40
Nivel medio del mar	0.91
Media bajamares	0.43
Media bajamares mínimas	0.38
Mínima bajamar	0.12

Fuente: Elaboración propia.

### 13.3 ANÁLISIS ARMÓNICO DE MAREAS

En la Tabla 69 se presentan las constituyentes armónicas anuales representativas de la localidad de Valparaíso, junto a esto, se presenta además los resultados del cálculo del NRS para los 16 años en estudio.

**Tabla 69:** Constituyentes armónicas representativas de la localidad de Valparaíso entre el año 2000 a 2015.

Año	Semidiurna				Diurna			
	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1	Q1
2000	0.432	0.145	0.096	0.045	0.154	0.101	0.048	0.019
2001	0.433	0.145	0.095	0.044	0.155	0.101	0.049	0.017
2002	0.432	0.146	0.092	0.045	0.153	0.099	0.047	0.018
2003	0.432	0.145	0.093	0.044	0.152	0.100	0.048	0.018
2004	0.43	0.144	0.095	0.044	0.151	0.100	0.050	0.020
2005	0.431	0.154	0.096	0.044	0.168	0.100	0.028	0.021
2006	0.43	0.157	0.099	0.045	0.130	0.102	0.061	0.021
2007	0.434	0.146	0.098	0.043	0.153	0.102	0.048	0.021
2008	0.314	0.095	0.064	0.035	0.140	0.092	0.037	0.015
2009	0.431	0.152	0.094	0.038	0.151	0.098	0.043	0.017
2010	0.436	0.153	0.095	0.045	0.143	0.102	0.057	0.016
2011	0.439	0.15	0.094	0.044	0.157	0.103	0.051	0.021
2012	0.44	0.149	0.098	0.044	0.159	0.102	0.049	0.020
2013	0.442	0.152	0.098	0.042	0.160	0.103	0.048	0.020
2014	0.439	0.150	0.098	0.044	0.158	0.104	0.048	0.022
2015	0.434	0.149	0.098	0.045	0.158	0.103	0.049	0.023

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 70:** Nivel de Reducción de Sonda calculado para Valparaíso entre los años 2000 a 2015.

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>NRS [m]</b>	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92	0.95	0.92	0.93	0.71	0.93	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.94
<b>NRS medio</b>	0.92															

Fuente: Elaboración propia.

## 13.4 ANÁLISIS DE LA MAREA METEORÓLOGICA

### 13.4.1 ANÁLISIS DE RESIDUO

La Tabla 71, muestra los 20 eventos utilizados en el estudio extremo de la marea meteorológica.

**Tabla 71:** Lista de eventos seleccionados para el estudio extremo de la marea meteorológica.

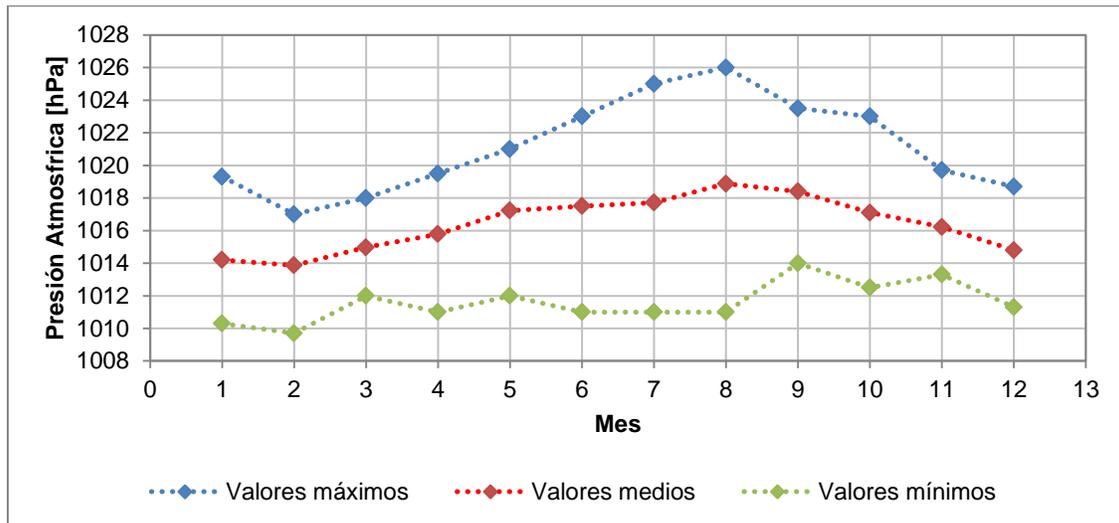
N° Datos	Fecha	Hm [m]
1	11 de febrero de 2009	0.721
2	15 de junio de 2009	0.694
3	9 de agosto de 2010	0.526
4	8 de agosto de 2015	0.474
5	16 de junio de 2008	0.451
6	13 de diciembre de 2008	0.450
7	18 de junio de 2011	0.442
8	14 de julio de 2011	0.409
9	17 de diciembre de 2008	0.408
10	27 de mayo de 2012	0.401
11	1 de julio de 2003	0.394
12	28 de mayo de 2011	0.365
13	1 de agosto de 2012	0.357
14	31 de marzo de 2013	0.357
15	10 de julio de 2011	0.347
16	8 de abril de 2011	0.335
17	6 de mayo de 2014	0.330
18	26 de julio de 2011	0.326
19	21 de enero de 2008	0.319
20	11 de mayo de 2015	0.316

Fuente: Elaboración propia.

### 13.4.2 EFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA

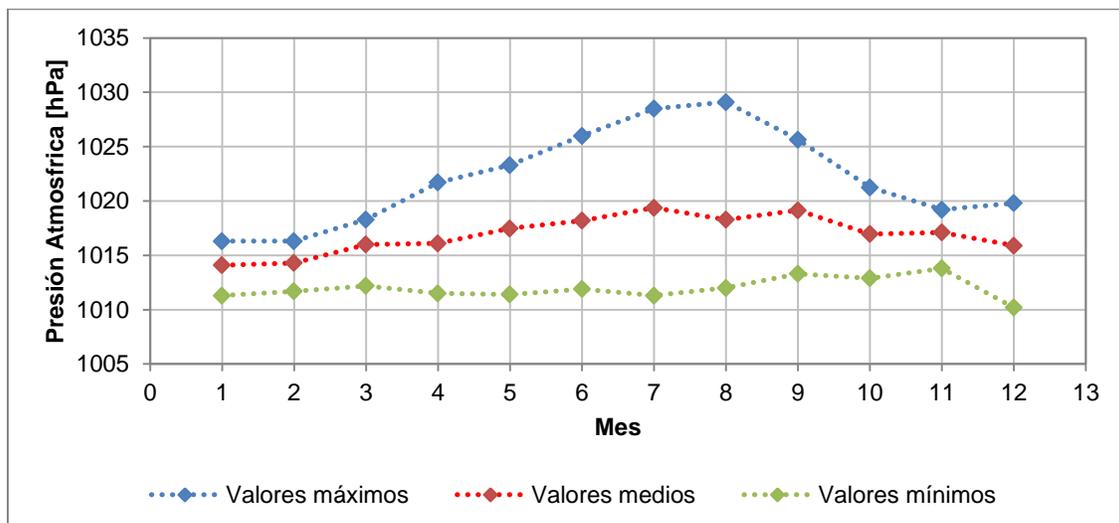
Las siguientes figuras presentan las variaciones anuales de la presión atmosférica en la estación de Rodelillo, Valparaíso.

**Figura 62:** Variación de la presión atmosférica año 2013.



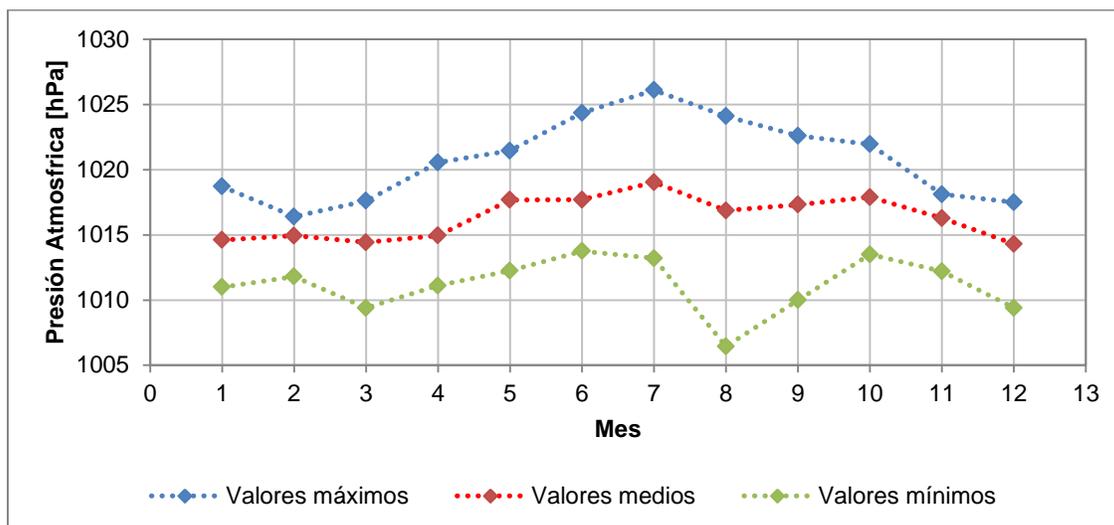
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 63:** Variación de la presión atmosférica año 2014.



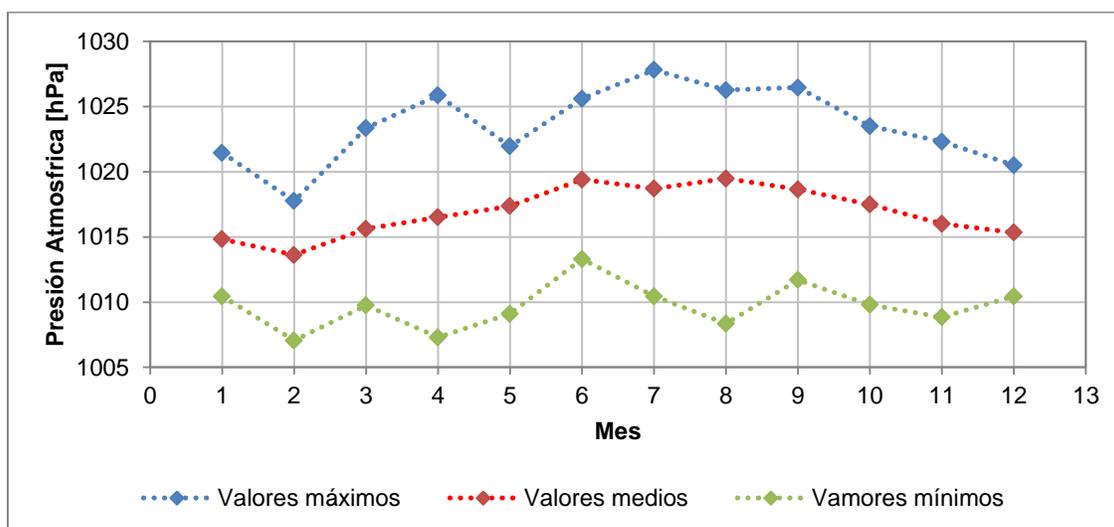
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 64:** Variación de la presión atmosférica año 2015.



Fuente: Elaboración propia.

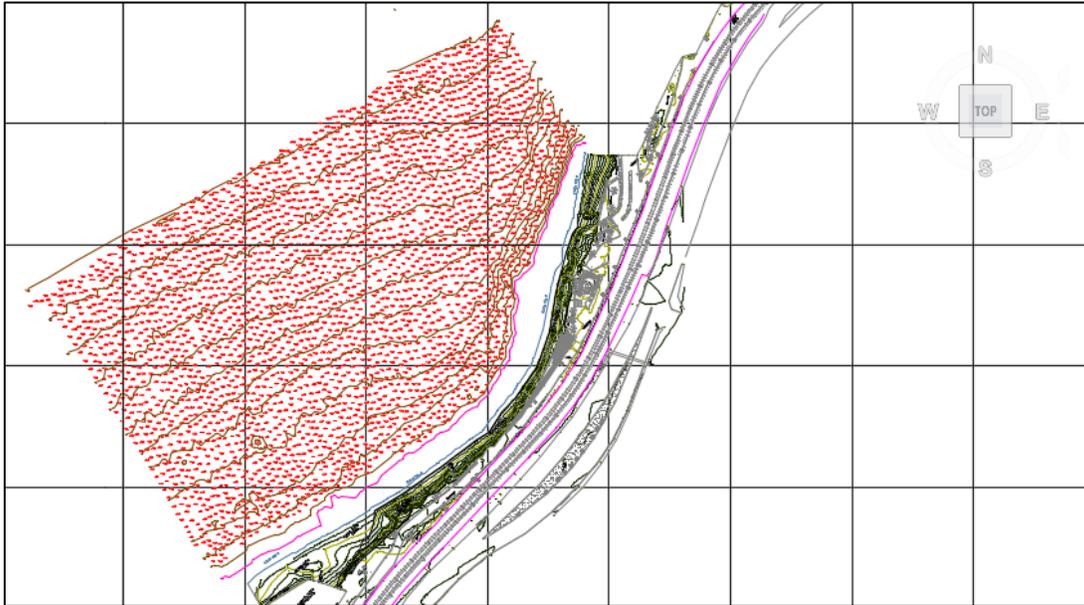
**Figura 65:** Variación de la presión atmosférica año 2016.



Fuente: Elaboración propia.

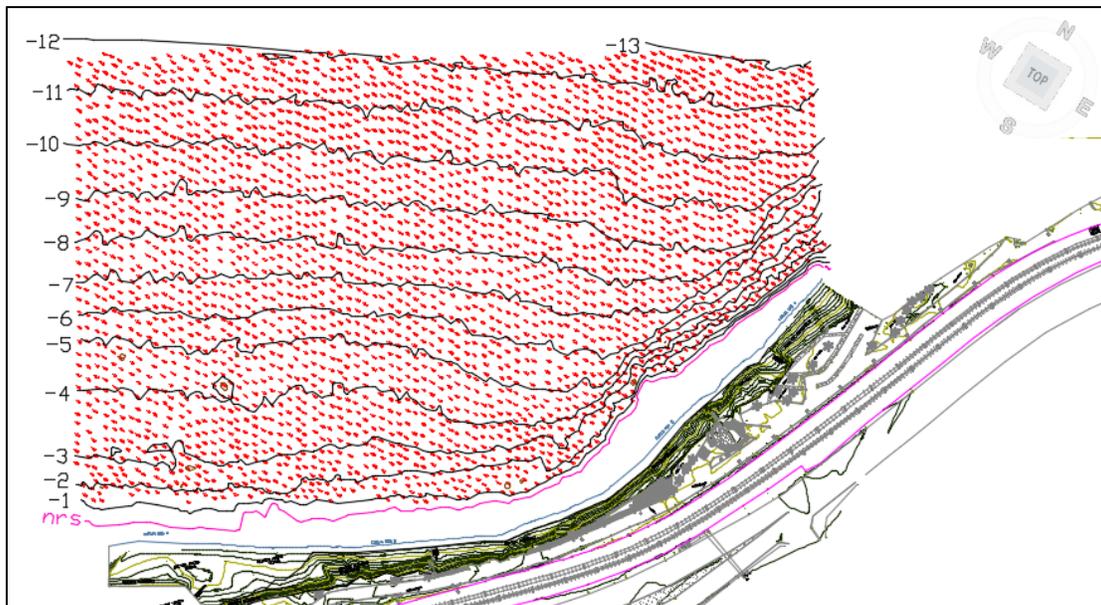
## **14 ANEXO E - ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLAJE EN LA ZONA ROMPIENTE**

**Figura 66:** Plano topo-batimétrico sector Juan de Saavedra.



Fuente: Elaboración propia a partir de (GHD, 2011).

**Figura 67:** Plano topo-batimétrico sector Juan de Saavedra.



Fuente: Elaboración propia a partir de (GHD, 2011).

A continuación, de la Tabla 72 a la Tabla 75 se presentan en detalle los parámetros utilizados en la obtención de los resultados expuestos para la sección altura de oleaje en zona rompiente, mientras desde la Figura 68 a la Figura 74 se muestran comparaciones de alturas de ola en la zona rompiente para los distintos escenarios presentados en la sección 5.6.1 “Criterios de diseño”. Finalmente la Figura 75 muestra el diagrama de shoaling de oleaje no lineal. Aproximación utilizada para conocer la altura de oleaje en la zona rompiente.

**Tabla 72:** Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño convencional de periodo de retorno 25 años.

Parámetros			Periodo de retorno Tr25 años					
<u>Condición aguas profundas</u>			Batimetría Completa			Batimetría Modificada		
Periodo	Tp	[s]	11	11	11	11	11	11
Longitud de onda	L0	[m]	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8
<u>Condición sitio de interés</u>								
Ola de diseño Punto control	H	[m]	4.53	4.53	4.53	4.63	4.63	4.63
Profundidad	d	[m]	20	20	20	20	20	20
Profundidad relativa	h/L0		0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106
Peralte de ola	H'0/L0		0.024	0.024	0.024	0.025	0.025	0.025
Coeficiente Shoaling	Ks		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Ola de diseño GODA aguas profundas	H'0	[m]	4.67	4.67	4.67	4.77	4.77	4.77
<u>Profundidad de diseño</u>								
Cota del fondo, referido al NRS	Z	[m]	-3.00	-2.00	-1.00	-3.00	-2.00	-1.00
Marea astronómica	Z MA	[m]	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
Marea meteorológica total	Z MM	[m]	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
Wave set-up	Wsetup	[m]	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Nivel de diseño	C	[m]	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
Profundidad total	h	[m]	6.44	5.44	4.44	6.44	5.44	4.44
<u>Coeficiente de shoaling teórico (Goda 1985)</u>								
Profundidad relativa	h/L0		0.034	0.029	0.024	0.034	0.029	0.024
Peralte de ola	H'0/L0		0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Pendiente de fondo	tan β		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Coeficiente Shoaling	Ks = H/H'0		1.27	1.42	1.65	1.27	1.42	1.65
<u>Calculo altura de ola significativa</u>								
Coeficientes expresión Goda								
Coeficiente β0	β0		0.134	0.134	0.134	0.133	0.133	0.133
Coeficiente β1	β1		0.615	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
Coeficiente βmax	βmax		1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
	β0 H'0+β1h	[m]	4.59	3.97	3.36	4.60	3.98	3.37
<u>Altura de ola significativa H1/3</u>								
	βmaxH'0	[m]	4.81	4.81	4.81	4.88	4.88	4.88
	Ks H'0	[m]	5.93	6.63	7.71	6.06	6.78	7.88

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 73:** Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño convencional de periodo de retorno 50 años.

Parámetros			Periodo de retorno Tr50 años					
<u>Condición aguas profundas</u>			Batimetría Completa			Batimetría Modificada		
Periodo	Tp	[s]	11	11	11	11	11	11
Longitud de onda	L0	[m]	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8
<u>Condición sitio de interés</u>								
Ola de diseño Punto control	H	[m]	4.94	4.94	4.94	5.04	5.04	5.04
Profundidad	d	[m]	20	20	20	20	20	20
Profundidad relativa	h/L0		0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106
Peralte de ola	H'0/L0		0.026	0.026	0.026	0.027	0.027	0.027
Coeficiente Shoaling	Ks		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Ola de diseño GODA aguas profundas	H'0	[m]	5.09	5.09	5.09	5.20	5.20	5.20
<u>Profundidad de diseño</u>								
Cota del fondo, referido al NRS	Z	[m]	-3.00	-2.00	-1.00	-3.00	-2.00	-1.00
Marea astronómica	Z MA	[m]	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
Marea meteorológica total	Z MM	[m]	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
Wave set-up	Wsetup	[m]	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
Nivel de diseño	C	[m]	4.19	4.19	4.19	4.19	4.19	4.19
Profundidad total	h	[m]	7.19	6.19	5.19	7.19	6.19	5.19
<u>Coeficiente de shoaling teórico (Goda 1985)</u>								
Profundidad relativa	h/L0		0.038	0.033	0.027	0.038	0.033	0.027
Peralte de ola	H'0/L0		0.027	0.027	0.027	0.028	0.028	0.028
Pendiente de fondo	tan β		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Coeficiente Shoaling	Ks = H/H'0		1.28	1.43	1.65	1.28	1.43	1.65
<u>Calculo altura de ola significativa</u>								
Coeficientes expresión Goda								
Coeficiente β0	β0		0.130	0.130	0.130	0.129	0.129	0.129
Coeficiente β1	β1		0.615	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
Coeficiente βmax	βmax		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	β0 H'0+β1h	[m]	5.08	4.47	3.85	5.09	4.48	3.86
<u>Altura de ola significativa H1/3</u>								
	βmaxH'0	[m]	5.11	5.11	5.11	5.19	5.19	5.19
	Ks H'0	[m]	6.52	7.28	8.40	6.65	7.43	8.57

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 74:** Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño probabilístico de periodo de retorno 25 años.

Parámetros			Periodo de retorno Tr25 años					
<u>Condición aguas profundas</u>			Batimetría Completa			Batimetría Modificada		
Periodo	Tp	[s]	11	11	11	11	11	11
Longitud de onda	L0	[m]	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8
<u>Condición sitio de interés</u>								
Ola de diseño Punto control	H	[m]	4.53	4.53	4.53	4.63	4.63	4.63
Profundidad	d	[m]	20	20	20	20	20	20
Profundidad relativa	h/L0		0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106
Peralte de ola	H'0/L0		0.024	0.024	0.024	0.025	0.025	0.025
Coefficiente Shoaling	Ks		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Ola de diseño GODA aguas profundas	H'0	[m]	4.67	4.67	4.67	4.77	4.77	4.77
<u>Profundidad de diseño</u>								
Cota del fondo, referido al NRS	Z	[m]	-3.00	-2.00	-1.00	-3.00	-2.00	-1.00
Marea astronómica	Z MA	[m]	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Marea meteorológica total	Z MM	[m]	-	-	-	-	-	-
Wave set-up	Wsetup	[m]	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22
Nivel de diseño	C	[m]	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14
Profundidad total	h	[m]	5.14	4.14	3.14	5.14	4.14	3.14
<u>Coefficiente de shoaling teórico (Goda 1985)</u>								
Profundidad relativa	h/L0		0.027	0.022	0.017	0.027	0.022	0.017
Peralte de ola	H'0/L0		0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Pendiente de fondo	tan β		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Coefficiente Shoaling	Ks = H/H'0		1.92	1.70	1.48	1.92	1.70	1.48
<u>Calculo altura de ola significativa</u>								
Coefficientes expresión Goda								
Coefficiente β0	β0		0.134	0.134	0.134	0.133	0.133	0.133
Coefficiente β1	β1		0.615	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
Coefficiente βmax	βmax		1.03	1.03	1.03	1.02	1.02	1.02
	β0 H'0+β1h	[m]	3.79	3.17	2.56	3.80	3.18	2.57
<u>Altura de ola significativa H1/3</u>								
	βmaxH'0	[m]	4.81	4.81	4.81	4.88	4.88	4.88
	Ks H'0	[m]	8.97	7.94	6.91	9.16	8.11	7.06

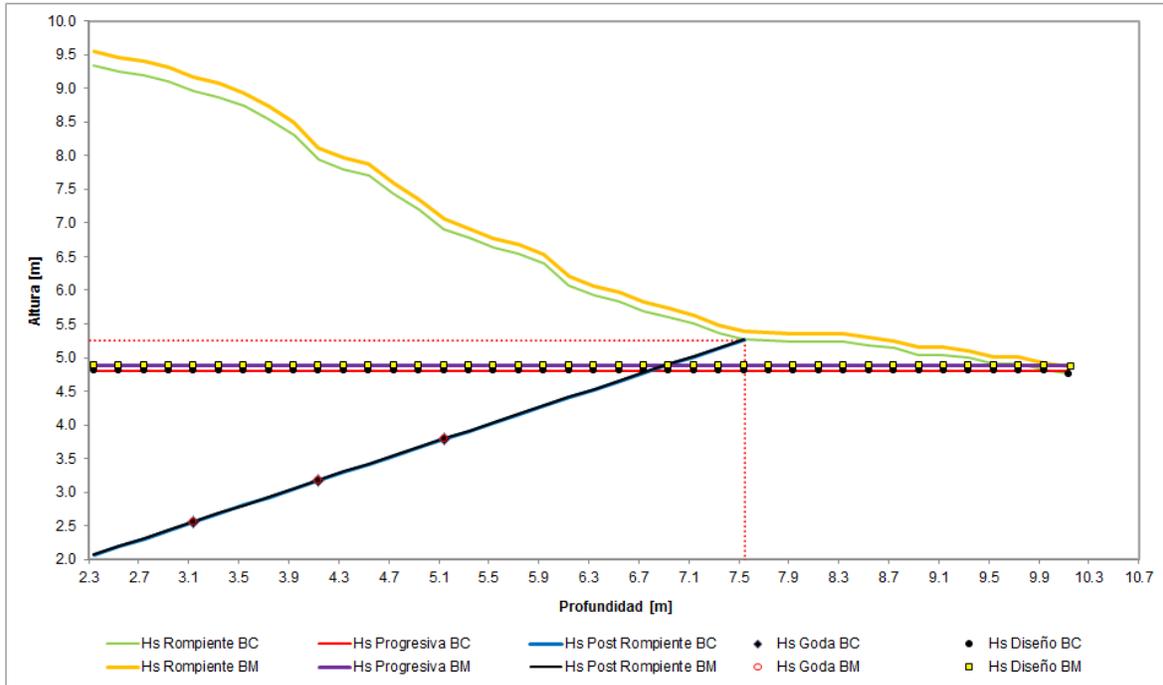
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 75:** Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño probabilístico de periodo de retorno 25 años.

Parámetros			Periodo de retorno Tr50 años					
<u>Condición aguas profundas</u>			Batimetría Completa			Batimetría Modificada		
Periodo	Tp	[s]	11	11	11	11	11	11
Longitud de onda	L0	[m]	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8	188.8
<u>Condición sitio de interés</u>								
Ola de diseño Punto control	H	[m]	4.94	4.94	4.94	5.04	5.04	5.04
Profundidad	d	[m]	20	20	20	20	20	20
Profundidad relativa	h/L0		0.106	0.106	0.106	0.106	0.106	0.106
Peralte de ola	H'0/L0		0.026	0.026	0.026	0.027	0.027	0.027
Coeficiente Shoaling	Ks		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
Ola de diseño GODA aguas profundas	H'0	[m]	5.09	5.09	5.09	5.20	5.20	5.20
<u>Profundidad de diseño</u>								
Cota del fondo, referido al NRS	Z	[m]	-3.00	-2.00	-1.00	-3.00	-2.00	-1.00
Marea astronómica	Z MA	[m]	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Marea meteorológica total	Z MM	[m]	-	-	-	-	-	-
Wave set-up	Wsetup	[m]	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30
Nivel de diseño	C	[m]	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22	2.22
Profundidad total	h	[m]	5.22	4.22	3.22	5.22	4.22	3.22
<u>Coeficiente de shoaling teorico (Goda 1985)</u>								
Profundidad relativa	h/L0		0.028	0.022	0.017	0.028	0.022	0.017
Peralte de ola	H'0/L0		0.027	0.027	0.027	0.028	0.028	0.028
Pendiente de fondo	tan β		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Coeficiente Shoaling	Ks = H/H'0		1.90	1.67	1.45	1.90	1.67	1.45
<u>Calculo altura de ola significativa</u>								
Coeficientes expresión Goda								
Coeficiente β0	β0		0.130	0.130	0.130	0.129	0.129	0.129
Coeficiente β1	β1		0.615	0.615	0.615	0.615	0.615	0.615
Coeficiente βmax	βmax		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	β0 H'0+β1h	[m]	3.87	3.26	2.64	3.88	3.26	2.65
<u>Altura de ola significativa H1/3</u>								
	βmaxH'0	[m]	5.11	5.11	5.11	5.19	5.19	5.19
	Ks H'0	[m]	9.68	8.50	7.38	9.87	8.68	7.53

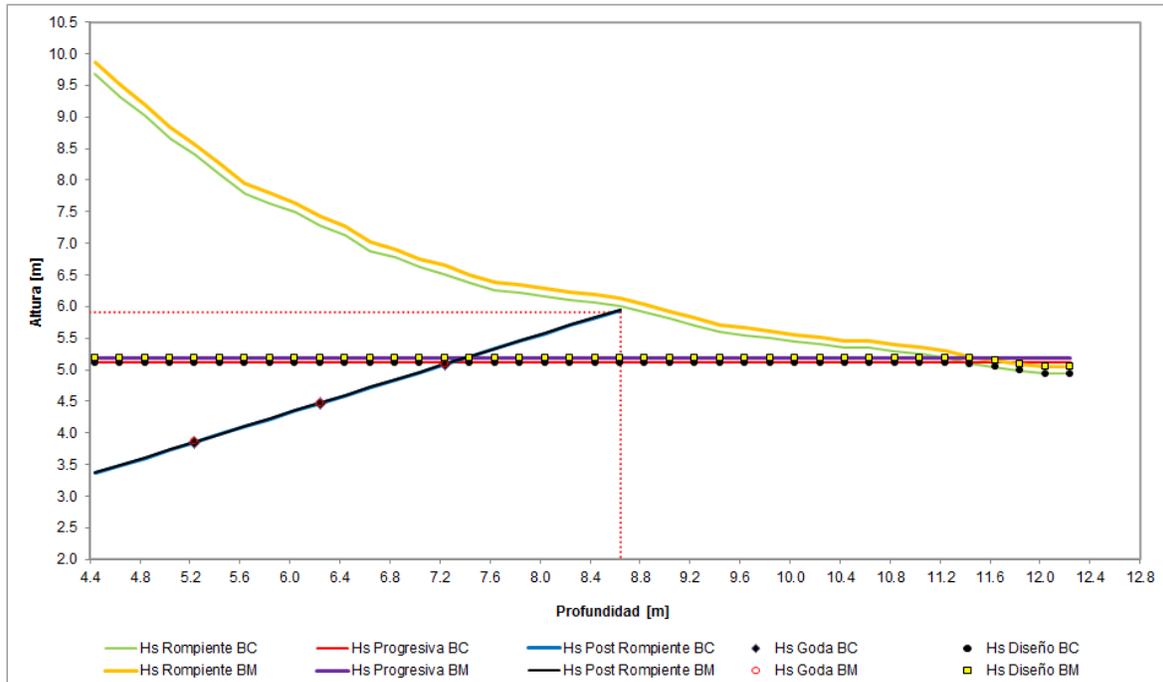
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 68:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño probabilístico.



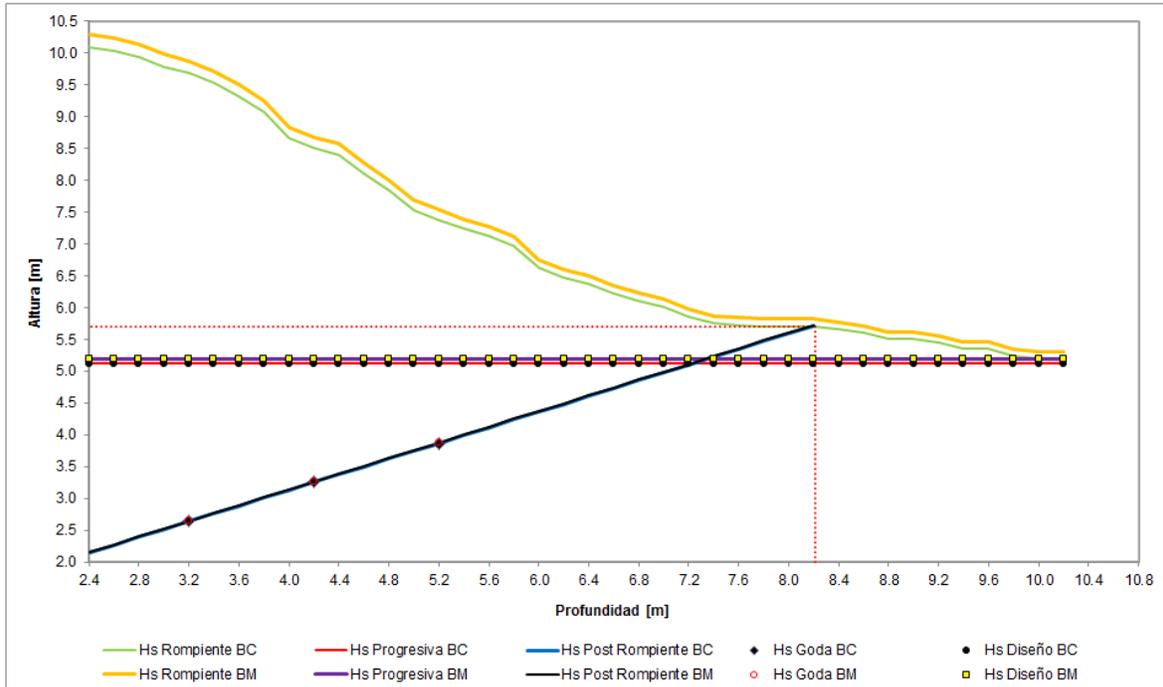
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 69:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional



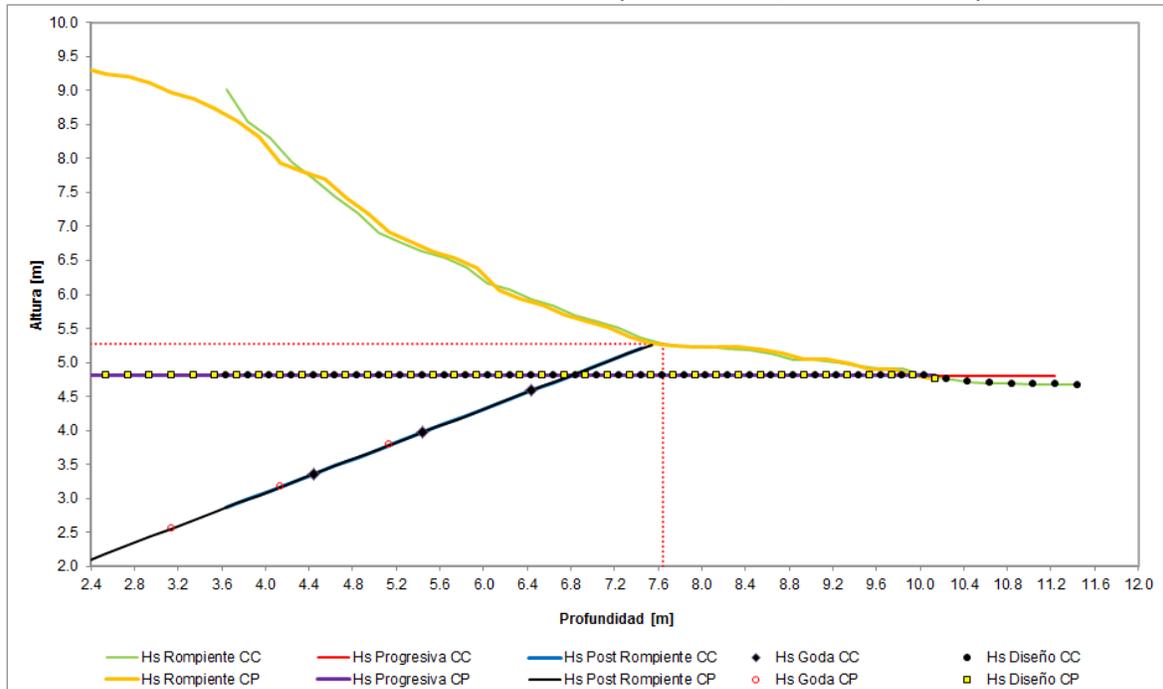
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 70:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño probabilístico



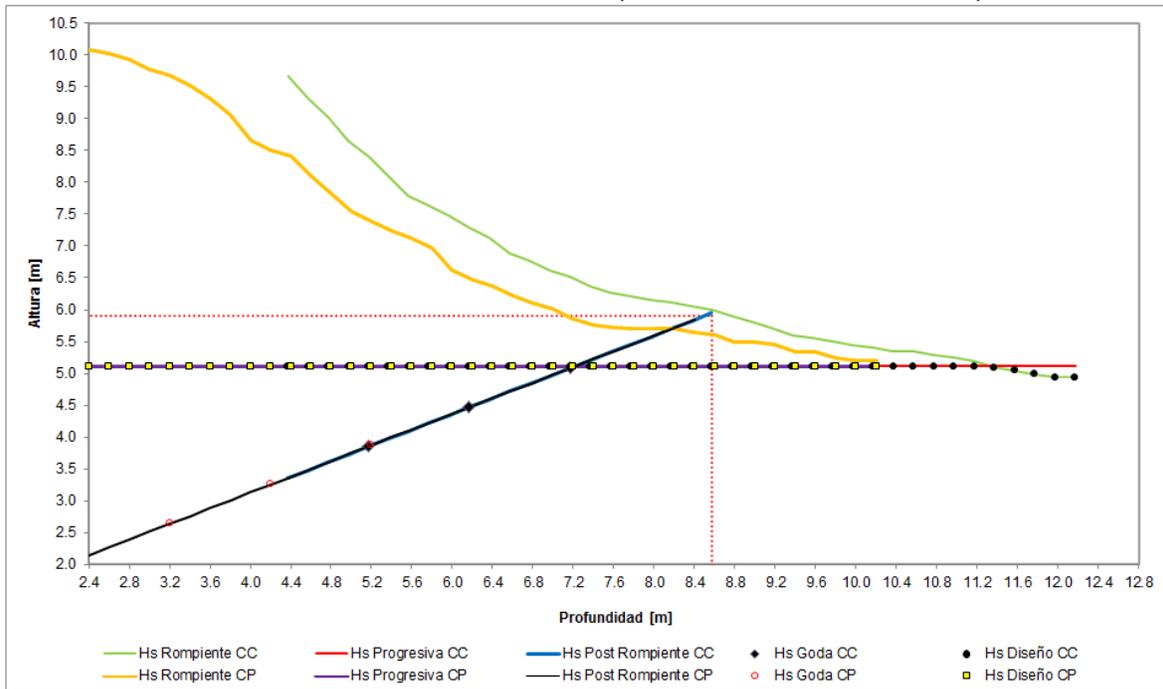
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 71:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Completa.



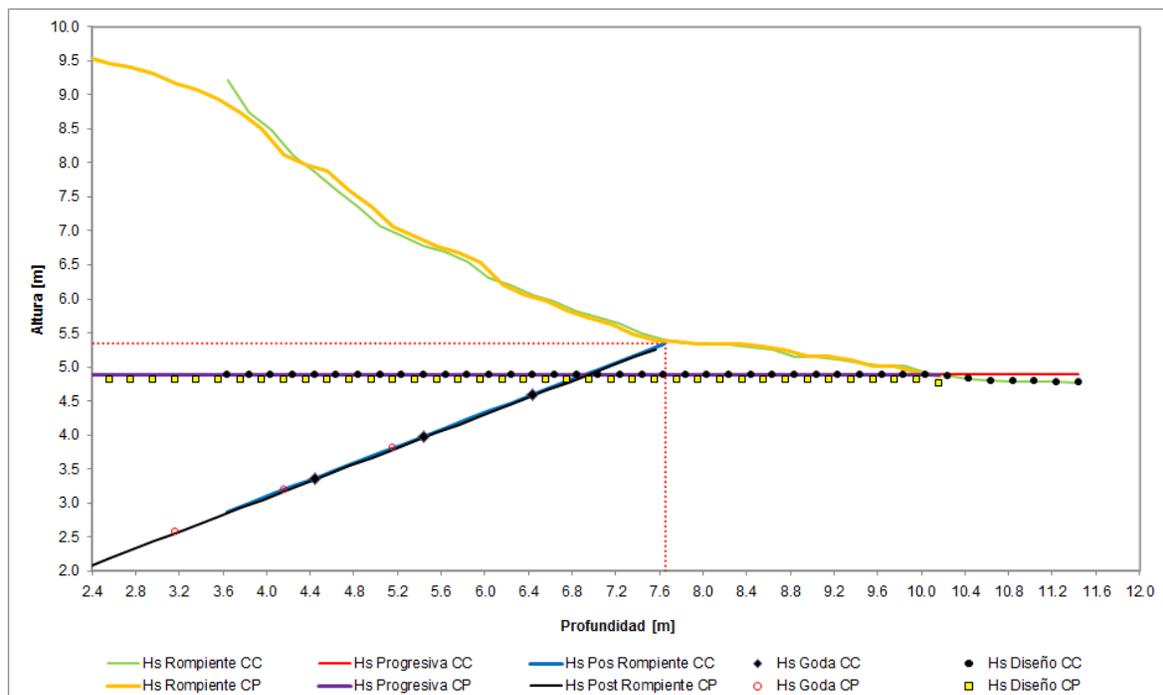
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 72:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Completa.



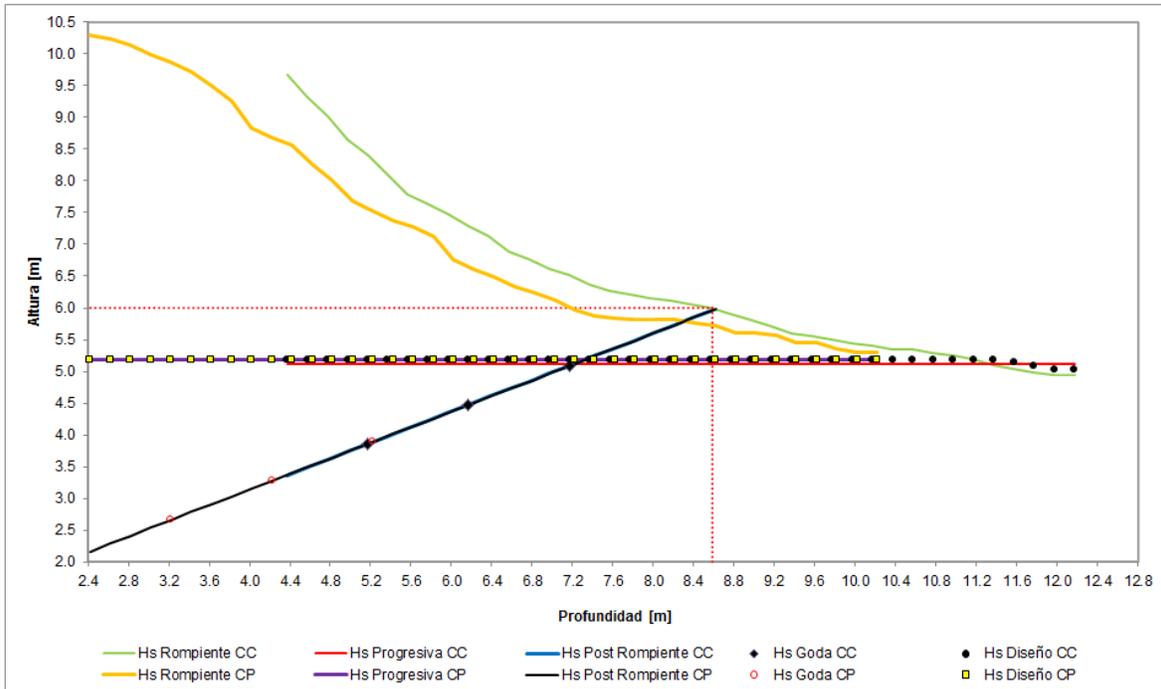
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 73:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Modificada.



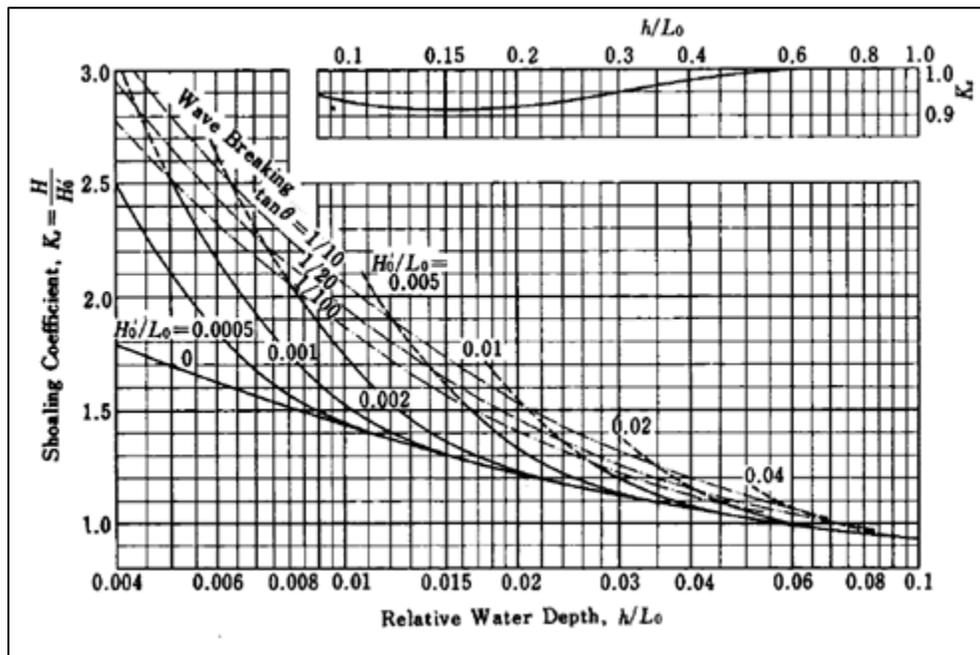
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 74:** Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Modificada.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 75:** Evaluación del coeficiente de shoaling.



Fuente: Elaboración propia.

# 15 ANEXO F - APLICACIÓN CASO PRÁCTICO

## 15.1 DISEÑO DE ESTABILIDAD

La Tabla 76 muestra los resultados el peso y dimensionamiento de la roca de corza mediante la formulación de Van der Meer, utilizando para ello un nivel de diseño probabilístico.

**Tabla 76:** Peso y Dimensiones de los elementos para un nivel de diseño probabilístico.

Parámetros de diseño				Batimetría Completa	Batimetría Modificada	Batimetría Completa	Batimetría Modificada	
Nivel de diseño probabilístico	Periodo peak	Tp	[s]	11.00	11.00	11.00	11.00	
	Periodo medio	Tm	[s]	10.00	10.00	10.00	10.00	
	Longitud de ola media	Lom	[m]	156.00	156.00	156.00	156.00	
	Peralte de ola	Sm		0.031	0.031	0.020	0.021	
	Densidad volumétrica del material	$\rho_s$	[ton/m <sup>3</sup> ]	2.65	2.65	2.65	2.65	
	Densidad volumétrica del agua	$\rho_w$	[ton/m <sup>3</sup> ]	1.025	1.025	1.025	1.025	
	Angulo del talud con respecto a la horizontal	cot ( $\alpha$ )		2	2	2	2	
	Permeabilidad	P		0.40	0.40	0.40	0.40	
	Numero de olas activas	Nz		4909	4909	4909	4909	
	Nivel de daño	S		5	5	5	5	
	Parámetro de Iribarren	em		2.85	2.83	3.51	3.49	
	Parámetro límite de Iribarren	emc		3.77	3.77	3.77	3.77	
	<b><u>Periodo de retorno 25 años</u></b>				<b>Altura progresiva</b>		<b>Altura post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	Hs	[m]	4.81	4.88	3.17	3.20	
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W</b>	<b>[ton]</b>	<b>11.93</b>	<b>12.32</b>	<b>3.41</b>	<b>3.47</b>	
	<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn</b>	<b>[m]</b>	<b>1.651</b>	<b>1.669</b>	<b>1.088</b>	<b>1.095</b>	
	<b><u>Periodo de retorno 50 años</u></b>				<b>Altura progresiva</b>		<b>Altura post rompiente</b>	
	Altura significativa de diseño	Hs	[m]	5.11	5.19	3.25	3.26	
	<b>Peso de la roca</b>	<b>W</b>	<b>[ton]</b>	<b>13.67</b>	<b>14.16</b>	<b>4.94</b>	<b>4.97</b>	
<b>Diámetro medio de la roca</b>	<b>Dn</b>	<b>[m]</b>	<b>1.728</b>	<b>1.748</b>	<b>1.231</b>	<b>1.233</b>		

Fuente: Elaboración propia.

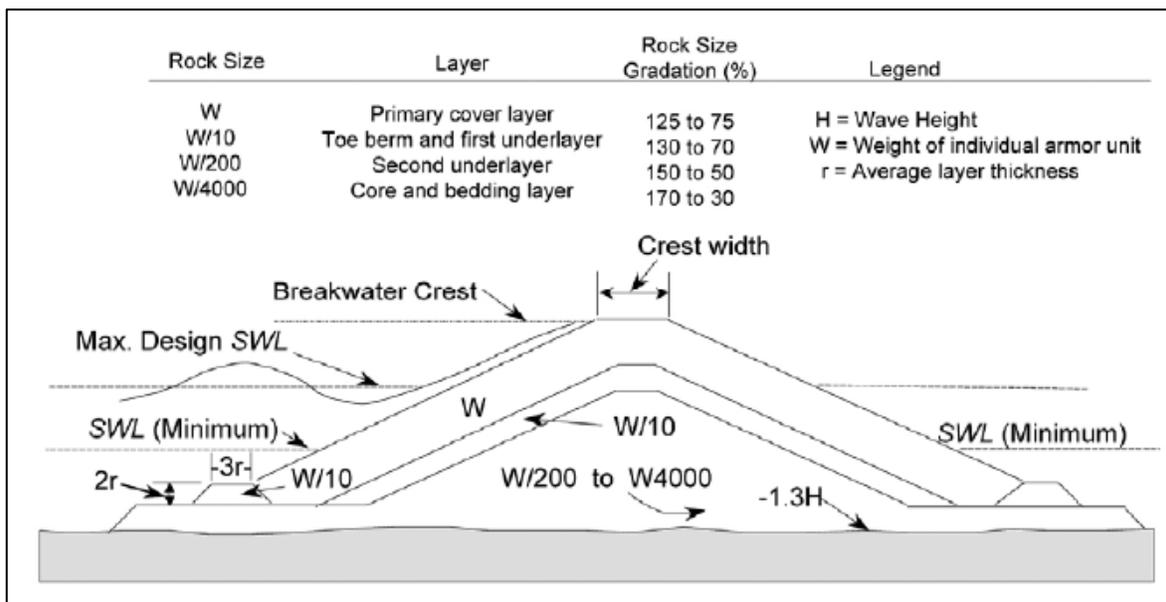


## 16 ANEXO G - EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### 16.1 FILTRO, NÚCLEO Y PIE DE APOYO

Una vez calculados los pesos de los elementos que conforman la coraza se pueden determinar los pesos de los elementos secundarios que componen la defensa costera, para la cual, el "Coastal Engineering Manual" (USACE, 2003), propone las siguientes relaciones.

**Figura 77:** Recomendaciones para la estimación del peso de los elementos de filtro y núcleo.



Fuente: (USACE, 2003).

De la Figura 77 es posible comprender las siguientes relaciones para el peso de los elementos:

#### Filtro

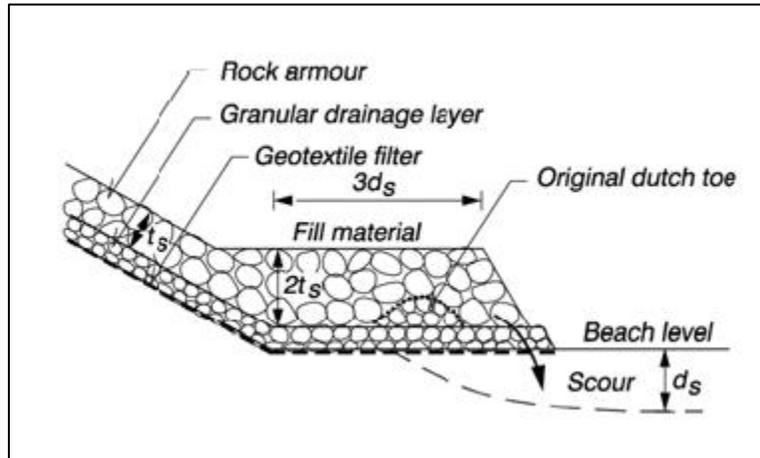
$$W_{filtro} = \frac{W_{coraza}}{10}$$

#### Núcleo

$$W_{núcleo} = \frac{W_{coraza}}{200} \text{ a } \frac{W_{coraza}}{4000}$$

En cuanto al pie de apoyo, su diseño se define a partir de la Figura 78 como la prolongación de 4 rocas de coraza en doble capa.

**Figura 78:** Recomendación para la estimación del pie de apoyo de la estructura.

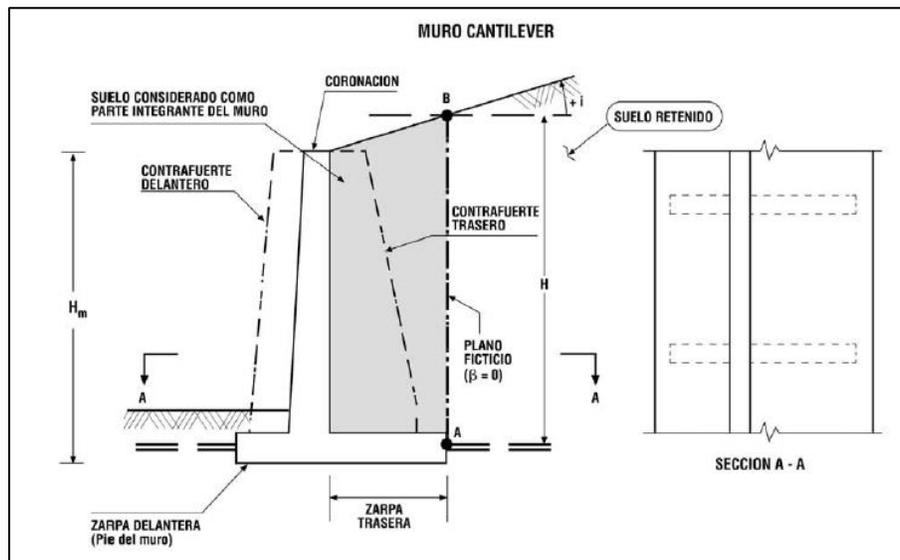


Fuente: (USACE, 2003).

## 16.2 MURO DE CONTENCIÓN

El diseño del muro de contención se lleva a cabo según lo expuesto en el “Manual de Carreteras”, volumen N°3 “Instrucciones y Criterios de Diseño”, fundamentado en base a criterios de la norma AASHTO. Se selecciona como muro de contención el tipo “cantilever” (Figura 79), debido principalmente a la satisfacción estructural que presentan estas configuraciones.

**Figura 79:** Tipología de muro de contención considerado.



Fuente: (MOP; DGOP; Dirección de vialidad de Chile, 2013).



El muro diseñado debe ser capaz de contener las fuerzas y los empujes descritos, y para lo cual es necesario cumplir las siguientes condiciones:

$$\text{Deslizamiento } FSED = \frac{\sum \text{FUERZAS HORIZONTALES RESISTENTES}}{\sum \text{FUERZAS HORIZONTALES SOLICITANTES}} \geq 1.5$$

$$\text{Volcamiento } FSEV = \frac{\sum \text{MOMENTOS VOLCANTES RESISTENTE}}{\sum \text{MOMENTOS VOLCANTES SOLICITANTES}} \geq 1.5$$

Finalmente, a modo de ejemplo, se presentan los resultados del diseño del muro de contención para la configuración que representa el caso del escenario de periodo de retorno 50 años con Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico.

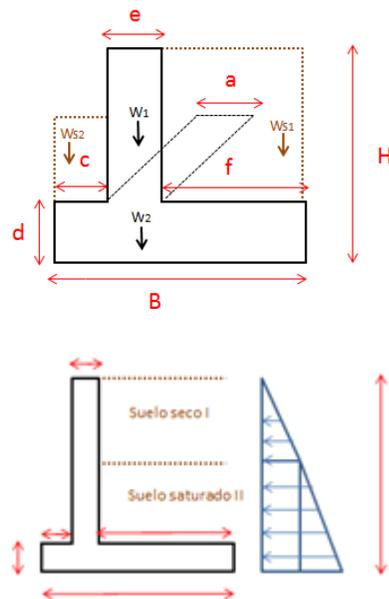
### DIMENSIONAMIENTO MURO DE CONTENCIÓN

CASO: Escenario Tr 50 años, BC, CP

<u>Parámetros</u>			
Densidad volumétrica del Hormigón	$\gamma_h$	2.65	[ton/m <sup>3</sup> ]
Densidad volumétrica del suelo	$\gamma_s$	2.1	[ton/m <sup>3</sup> ]
Densidad volumétrica del agua	$\gamma_w$	1.0	[ton/m <sup>3</sup> ]
Angulo fricción interna	$\phi$	35	[°]
Altura relleno ws1	s1	2.3	[m]
Altura relleno ws2	s2	2.5	[m]

<u>Dimensiones Muro</u>		
a	1	[m]
B	2.8	[m]
c	0.5	[m]
d	1	[m]
e	1	[m]
f	1.3	[m]
H	3.3	[m]

<u>Peso propio del Muro</u>		
W1	7.42	[ton]
W2	6.06	[ton]
<b>Wmuro</b>	<b>13.48</b>	<b>[ton]</b>



<b>Peso Relleno</b>		
Ws1	6.25	[ton]
Ws2	2.62	[ton]
<b>Wrelleno</b>	8.88	[ton]

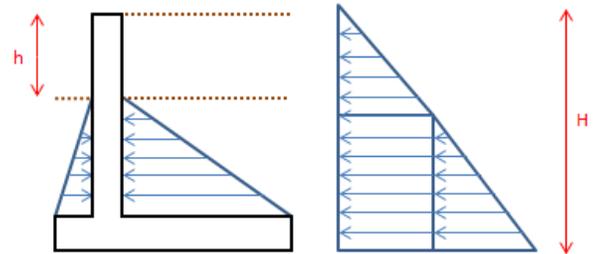
<b>Parámetros de Relleno</b>			
Altura suelo seco	$\bar{h}$ h1	0.8	[m]
Altura suelo saturado	h1	2.5	[m]
Coefficiente de empuje activo	Ka	0.27	

<b>Empuje Suelo</b>			
Tramo I			
Componente empuje activo	$\sigma_a$	0.45	[ton/m <sup>2</sup> ]
Empuje Activo I	Ea1	0.98	[ton]
Empuje Activo II	Ea2	1.12	[ton]
Empuje Activo III	Ea3	0.56	[ton]
<b>Empuje Activo Total</b>	EaT	2.67	[ton]
Tramo II			
Densidad volumétrica agua saturada	$\gamma_b$	1.1	[ton/m <sup>3</sup> ]
Componente vertical empuje activo	$\sigma_v$	4.4	[ton/m <sup>2</sup> ]
Componente horizontal de empuje activo	$\sigma_H$	1.19	[ton/m <sup>2</sup> ]

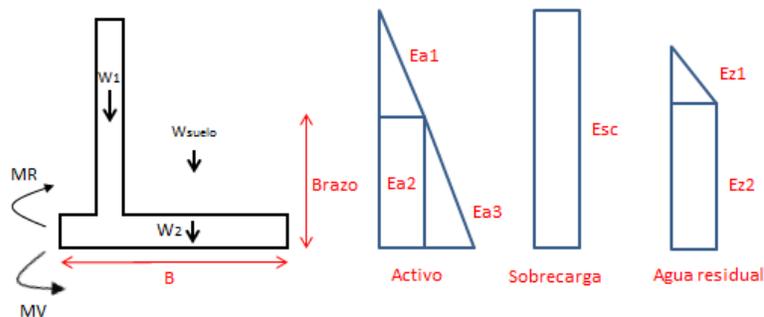
<b>Empuje por Sobrecarga</b>		
Componente de sobrecarga	0.271	[ton/m]
Sobrecarga	1.0	[ton/m <sup>2</sup> ]
Empuje por Sobrecarga	0.89	[ton]

<b>Fuerza de Roce</b>		
Coefficiente de roce	$\mu$	0.5
Normal	N	22.37 [ton]
<b>Roce</b>	Fr	11.18 [ton]

<b>Empuje de Marea (agua residual)</b>			
Marea	Z	2.14	[m]
Componente empuje de marea	$\sigma_W$	2.14	[ton/m <sup>2</sup> ]
Empuje de marea 1	Ez1	2.29	[ton]
Empuje de marea 2	Ez2	4.58	[ton]
<b>Empuje de marea total</b>	EzT	6.87	[ton]



### Condición Estática



<b>Condición Estática</b>			
Deslizamiento	FSED	3.14	<b>Cumple</b>
Volcamiento	FSEV	2.03	<b>Cumple</b>



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE  
OBRAS MARÍTIMAS CONDICIONADAS POR LA ACCIÓN  
DEL OLEAJE, UNA APLICACIÓN A DEFENSAS  
COSTERAS.**

**NELSON ANDRÉS MOLINA VARGAS**

MAYO 2021