



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR,
PUERTO DE SAN ANTONIO**

Felipe Eladio Concha Muñoz

Marzo 2016

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO

Felipe Eladio Concha Muñoz

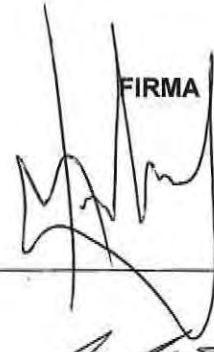
COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Marco Matamala C.
Profesor guía

6.6



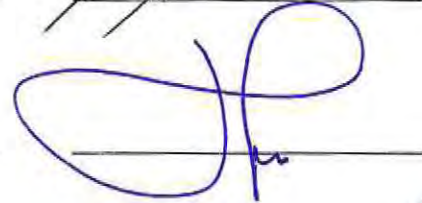
Mauricio Reyes G.
Docente

6.5



Hugo Baesler C.
Docente

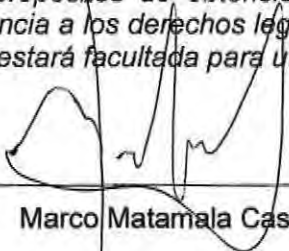
6.5



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 Océánico, 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.



Marco Matamala Castro
Profesor guía



Felipe Concha Muñoz
Alumno memorista

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer a las personas que conocí en el transcurso de la Universidad, especialmente a:

Los docentes de la escuela de Ingeniería Civil Oceánica, por ser parte de mi formación como profesional.

Mis compañeros de Universidad, en especial a Claudio Meza y Reinaldo Barriga, por hacer este trayecto menos difícil de recorrer.

Agradezco a mi profesor guía, Marco Matamala por apoyarme en este proyecto.

A José Aldunate, quien tuvo la disponibilidad de apoyarme, darme consejos y facilitar la información de EPSA.

Ariel Gallardo, por facilitar información, por guiar y orientar en la etapa de la modelación numérica.

Sin embargo, estos logros no los hubiera alcanzado sino tuviera a mi familia, las personas que han estado siempre conmigo, queriendo destacar a:

A mi familia de Cunaco, por darme el cariño y las alegrías.

A mis tías, Laly y Flor porque han hecho que la vida sea lo más sencillo posible. Sin duda son unos de los pilares fundamentales de mi vida.

A mis padres, María y Fernando, por estar siempre conmigo y sentir su amor incondicional. Estoy completamente agradecido por su apoyo en todas las etapas de mi vida.

A mi hermano Alexis, por ser la persona que me guía y me aconseja en la vida. Su apoyo ha sido fundamental en mis decisiones.

A mi sobrino y regalón Maty, por dar la felicidad y una linda armonía dentro del hogar

Finalmente, a unas de las personas más importantes que ha llegado mi vida, mi polola Lissette, que me ha apoyado y acompañado en el fin de este ciclo.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Dedicado:

*A mis tías de Cunaco; a mis tías,
Flor y Gladys; a mis padres, María y
Fernando; a mí hermano Alexis y mi
sobrino Matías. Dedicado especial a
Lisette y a mí bebe que viene en
camino...*

LISTA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	OBJETIVO GENERAL	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3	ALCANCES	3
4	MARCO TEÓRICO	4
4.1	MODELO SWAN	4
4.2	ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA DE ROMPIENTE (MÉTODO DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE, GODA 1985)	6
4.3	CÁLCULO DEL PESO DE LA CORAZA	7
4.3.1	FÓRMULA DE HUDSON (1974)	8
4.3.2	FÓRMULA DE VAN DER MEER (1988)	10
4.4	CAUDAL DE SOBREPASO	12
4.5	OBRAS DE ABRIGO Y DE PROTECCIÓN COSTERA	13
4.5.1	DIQUES EN TALUD	13
4.5.2	DIMENSIONES	16
4.6	DISEÑO PARAPETO	17
4.6.1	DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES GÜNBAK Y GÖKE (1984)	17
5	METODOLOGÍA	19
6	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SECTOR MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO ...	22
6.1	PUERTO DE SAN ANTONIO	22
6.1.1	ZONA DE PROYECTO	23
6.2	ESTUDIOS DE LÍNEA DE BASE	26
6.2.1	BATIMETRÍA	26
6.2.2	VIENTOS	26
6.2.3	MAREAS Y NIVELES	26
6.2.4	EROSIÓN COSTERA	32
6.2.5	MODELO DE PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	33
6.2.6	CLIMA EXTREMO DEL OLEAJE	45
7	DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA	49
7.1	ESTADOS LÍMITES	49
7.1.1	BASES DE DISEÑO	50
7.2	ALTURA DE OLA DE DISEÑO	51

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

7.2.1	PROPAGACIÓN DEL OLEAJE A AGUAS INTERMEDIAS	51
7.2.2	OLEAJE DE DISEÑO AL PIE DE LA OBRA.....	54
7.3	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	55
7.3.1	ESTIMACIÓN PESO DE CORAZA	55
7.3.2	ESTIMACIÓN PESO DE FILTRO Y NÚCLEO	57
7.3.3	ESTIMACIÓN PIE DE PROTECCIÓN.....	58
7.3.4	DIMENSIONAMIENTOS MÍNIMOS DE LOS ELEMENTOS.....	59
7.3.5	ESTIMACIÓN PARAPETO.....	60
7.4	DISEÑO HIDRÁULICO	62
7.4.1	ESTIMACIÓN CAUDAL DE SOBREPASO	62
7.4.2	RUN UP	62
7.5	COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS	64
7.6	RESULTADOS Y ESQUEMA FINAL DE LA PROTECCIÓN COSTERA.....	68
7.6.1	PERFIL TRANSVERSAL.....	70
7.6.2	PERFIL EN PLANTA	72
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
8.1	RECOMENDACIONES GENERALES	75
9	REFERENCIAS.....	76
10	GLOSARIO	78
11	ANEXOS	83
11.1	ANEXO 1	84
11.1.1	PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	84
11.2	ANEXO 2	88
11.2.1	TEORÍA EN EL MODELO DEL TÉRMINO FUENTE.....	88
11.3	ANEXO 3	92
11.3.1	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS.....	92
11.4	ANEXO 4	105
11.4.1	CLIMA EXTREMO.....	105
11.5	ANEXO 5	108
11.5.1	ESTADOS LÍMITES	108
11.6	ANEXO 6.....	110
11.6.1	RECOMENDACIÓN VIDA ÚTIL	110
11.7	ANEXO 7	112
11.7.1	RECOMEDACIÓN RIESGO	112
11.8	ANEXO 8	114

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.8.1 CAUDAL ADMISIBLE.....	114
11.9 ANEXO 9.....	116
11.9.1 ESTUDIO DE CANTERAS.....	116
11.10 ANEXO 10.....	123
11.10.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN.....	123
11.11 ANEXO 11.....	125
11.11.1 DIÁMETRO NOMINALES DE LOS ELEMETOS DE CORAZA.....	125
11.12 ANEXO 12.....	130
11.12.1 ALTERNATIVAS DE PERFILES.....	130
11.13 ANEXO 13.....	132
11.13.1 DISEÑO ESTRUCTURAL CONSIDERANDO $Z_{\text{DISEÑO}^2}$	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 4-1 Valores de la constante de estabilidad de Hudson (k_d).....	10
Tabla 4-2 Coeficiente de capa y porosidad según los elementos del manto.....	16
Tabla 6-1 Contenedores Movilizados. Puerto San Antonio.....	23
Tabla 6-4 Valores máximos y mínimos anuales.....	29
Tabla 6-5 Tabla de corrección para sumar o restar la altura de marea en función de la presión atmosférica.....	30
Tabla 6-8 Grilla batimétrica de propagación.....	35
Tabla 6-14 Estimadores estadísticos para T_m	44
Tabla 6-15 Orden de tormentas seleccionadas por el método POT, dirección NW.....	45
Tabla 6-16 Orden de tormentas seleccionadas por el método POT, dirección SW.....	46
Tabla 7-1 Propagación efectuada por Delft3D-WAVE.....	51
Tabla 7-2 Altura de ola al pie del talud, propagación Goda (1985).....	54
Tabla 7-3 Peso de la coraza con elementos de rocas.....	55
Tabla 7-14 Espesor del manto de escollera.....	59
Tabla 7-20 Factor de rugosidad.....	62
Tabla 7-22 Cálculo del $Ru_{2\%}$	63
Tabla 7-23 Estimación de costos de protección con escollera.....	64
Tabla 7-24 Estimación de costo de protección de Tetrápodos.....	65
Tabla 7-25 Estimación de costo de protección de Dolos.....	66
Tabla 7-26 Estimación de costos de protección de escollera con muro parapeto.....	67
Tabla 7-27 Consideraciones para el diseño final.....	68
Tabla 7-28 Protección de escollera con muro parapeto.....	69
Tabla 11-1 Estimadores estadísticos para H_s , caso A.....	103
Tabla 11-4 Estimadores estadísticos para T_m , caso B.....	104
Tabla 11-5 Orden de tormentas seleccionadas por el método máximo anual, dirección NW.....	106
Tabla 11-6 Orden de tormentas seleccionadas por el método máximo anual, dirección SW.....	107
Tabla 11-7 Determinación vida útil mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo.....	111
Tabla 11-8 Determinación del riesgo máximo admisible para la obra.....	113
Tabla 11-10 Volumen del elemento prefabricado, Tetrápodos.....	127
Tabla 11-12 Volumen del elemento prefabricado, Dolos.....	129
Tabla 11-14 Protección de escollera.....	131
Tabla 11-17 Peso de la coraza de escollera con Hudson (1974).....	133
Tabla 11-20 Peso de la coraza de escollera con Van der Meer (1988).....	134

LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1 Evaluación del coeficiente de Shoaling.....	6
Figura 4-2 Equilibrio de fuerzas de Iribarren en falsa rotura o surgiente.....	8
Figura 4-3 Valores de permeabilidad (P) de Van der Meer para distintas configuraciones de rompeola.....	11
Figura 4-4 Configuración transversal de un dique rompeolas tipo.....	14
Figura 4-5 Esquema de la berma para h_t y h	15
Figura 4-6 Dique en talud para condición de ola rompiente.....	17
Figura 4-7 Diagrama de presiones de Gümbak y Göcke (1984).....	18
Figura 6-1 Distribución de concesiones al interior del Puerto de San Antonio.....	22
Figura 6-2 Imagen satelital de la zona de estudio.....	24
Figura 6-6 Coordenadas de la estación meteorológica.....	28
Figura 6-7 Serie de tiempo de la presión atmosférica.....	29
Figura 6-8 Cálculo del set up del oleaje.....	31
Figura 6-9 Erosión costera.....	33

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Figura 6-10 Batimetría de la zona de estudio.....	34
Figura 6-11 Esquema de grilla de propagación.....	35
Figura 6-13 Rosa de dispersión de oleaje en aguas profundas	37
Figura 6-14 Ubicación del nodo en aguas profundas	37
Figura 6-16 Ubicación y rosa de oleaje del ADCP	39
Figura 6-17 Correlación de H_s	41
Figura 6-18 Serie de tiempo de H_s	42
Figura 6-19 Correlación de T_m	43
Figura 6-21 Comparación de dirección media.....	44
Figura 6-23 Distribución extremal de altura de ola significativa [H_s], dirección SW	48
Figura 7-1 Propagación Delft3D-WAVE, desde la dirección del III cuadrante con $H_s=5.5$ m y $T_m= 13$ s	52
Figura 7-2 Propagación Delft3D-WAVE, desde la dirección del IV cuadrante con $H_s=5.02$ m y $T_m= 12$ s	53
Figura 7-3 Dimensiones parapeto	61
Figura 11-1 Variación de presión atmosférica año 2014.....	85
Figura 11-4 Variación de presión atmosférica año 2011.....	86
Figura 11-7 Variación de presión atmosférica año 2008.....	87
Figura 11-8 Correlación de H_s , caso A.1	93
Figura 11-10 Correlación de H_s , caso A.3.....	94
Figura 11-12 Correlación de T_m , caso B.1.....	95
Figura 11-14 Correlación de T_m , caso B.3.....	96
Figura 11-16 Correlación de H_s , caso B.1	97
Figura 11-18 Correlación de H_s , caso B.3.....	98
Figura 11-20 Correlación de T_m , caso B.1.....	99
Figura 11-22 Correlación de T_m , caso B.3.....	100
Figura 11-24 Serie de tiempo de H_s del caso A	101
Figura 11-26 Serie de tiempo de H_s del caso B	102
Figura 11-28 Esquema para los estados límites último (ELU) y operativo (ELO)	109
Figura 11-29 Criterio de caudal admisible de Franco et al. 1994	115
Figura 11-30 Ubicación de canteras	117
Figura 11-31 Trayecto al puerto de San Antonio.....	118
Figura 11-32 Ubicación de la cantera Román y trayectoria al puerto.....	119
Figura 11-33 Ubicación cantera del Negro.....	121
Figura 11-35 Características generales del elemento Dolo.....	128

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló el diseño de una obra de protección costera, cuyo objetivo es disminuir el caudal de sobrepaso a causa de marejadas. La zona considerada en este proyecto corresponde al Molo Sur del Puerto de San Antonio, ubicado en la quinta región.

La tesis se dividió en dos etapas. Para la primera fase se caracterizaron las condiciones naturales asociados a la zona del proyecto. Para lo anterior, se consideró la condición más desfavorable que podría genera la acción en conjunto de los fenómenos de marea, viento, batimetría, erosión costera y oleaje. Una vez obtenidas las sollicitaciones asociadas a la condición más severa, se dio paso a la segunda etapa, la cual consistió en determinar las dimensiones y pesos mínimos que deben poseer los elementos que conformaron la protección costera.

Para el diseño final se consideró una altura de ola de 3 [m], estimada al pie del talud, y con dirección Nor-Oeste (en adelante NW). Para obtener este valor, en primera instancia se modeló una condición de oleaje en aguas profundas mediante un modelo numérico basado en diferencias finitas (Delft3D-WAVE), el cual permite obtener un valor de oleaje en aguas intermedias. Por último, para obtener la altura asociada a la ola de diseño, se utilizó la propagación empírica de Goda (1988), el cual refleja de mejor manera la condición de oleaje en aguas someras.

Para la estimación del peso de la coraza, se ocupó la ecuación de Hudson (1974) y se utilizó la ecuación determinística (EurOtop, 2007) para obtener el caudal de sobrepaso. Se asumió un nivel de marea de diseño de +2.3 m NRS y se utilizó la ecuación de Gerding (1993) para estimar el peso de la roca de protección contra la socavación.

Finalmente, después de considerar 4 alternativas, se decidió ocupar un enrocado con un peso nominal medio (W_{n50}) de 4.1 tonf, talud 1:2 y un muro parapeto con formulación de Günbak y Göke (1984), solución que cumple con los requisitos técnicos y económicos.

1 INTRODUCCIÓN

Para Chile, limitar con el Océano Pacífico, conlleva grandes ventajas económicas. Se destaca la comercialización con otros continentes, la explotación de recursos naturales e inclusive, en un futuro próximo, la obtención de recursos energéticos no convencionales, como la energía undimotriz o la mareomotriz.

La principal obra para aumentar el desarrollo comercial y económico del país, son los puertos. La ciudad de San Antonio cuenta con unos de los puertos multifuncionales de Chile y que en el año 2015 movió más de 1,170,184 [TEU's], argumento más que válido para consagrar al puerto uno de los más importantes del país.

Para mantener los estándares de calidad y crecimiento, el puerto de San Antonio debe resguardar sus instalaciones y disminuir al mínimo los efectos naturales, provocados principalmente por el oleaje. Estos efectos son mitigados por obras de abrigo o de protección costera, que producen la desestabilización del oleaje producto a fenómenos de rotura o reflexión.

En este documento, se desarrollará un diseño de protección costera en la localidad del Molo Sur del puerto de San Antonio, con el fin de disminuir el caudal de sobrepaso producto de marejadas y que los vehículos con carga muerta, puedan transitar el mayor del tiempo por la explanada.

Se utilizará un software de propagación de oleaje de libre disposición y datos gratuitos de: oleaje, marea y batimetría. El estudio se dividirá en dos etapas, para la primera etapa se conocerán las características oceanográficas de la zona de proyecto y en la segunda etapa, se realizarán los diseños estableciendo alternativas de protección del manto principal. Finalmente, se decidirá por el cumplimiento de los requisitos técnicos y económicos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una protección costera en el Molo Sur de San Antonio, Quinta Región

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener el diseño hidráulico considerando la marea meteorológica y astronómica, para la condición de tránsito seguro de vehículos.
- Calcular el diseño estructural, considerando en la coraza la ecuación de Van der Meer (1988) y en la protección del pie del talud, Gerding (1993)
- Realizar análisis de sensibilidad empleando diferentes configuraciones estructurales y recomendar la alternativa que cumpla la condición técnica y económica.
- Estimar el monto de la obra
- Elaborar plano transversal y en planta del diseño

3 ALCANCES

La ubicación del proyecto se realizará en el molo Sur del Puerto de San Antonio, quinta región. Se encontrará específicamente entre las coordenadas UTM 256,686 [m] y 6,279,512 [m] y las coordenadas 256,554 [m] y 6,279,046 [m] (zona horaria = 19 y datum = WGS84), abarcando una longitud aproximada de 530 m. El proyecto consiste en proteger la explanada adyacente del oleaje, lugar por donde circulan los camiones con cargas. La forma de mitigar estos fenómenos es construir una obra costera de tipología dique en talud, cuya metodología se apoyará en la experiencia de proyectos desarrollados por empresas marítimas y su diseño se desarrollará de acuerdo a manuales y recomendaciones existentes (Shore Protection Manual, 1984; Coastal Engineering Manual, 2006; British Standard, 1991; entre otras). Por otra parte, y a demás, por estar en contacto con oleaje en rompiente, lugar donde se producen los mayores movimientos de sedimentos, se evaluará la necesidad de utilizar un modelo matemático para representar la erosión en la zona de estudio y realizar una protección contra la socavación del pie del rompeola.

4 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla la investigación teórica que respalda los valores que se obtienen de la tesis.

4.1 MODELO SWAN

Generalmente los parámetros de oleaje son conocidos en aguas profundas o en mar abierto, por lo que es necesario transferir esa información a la zona de interés a través de modelos matemáticos.

Los modelos que describen el comportamiento de la propagación de oleaje desde aguas profundas a aguas someras son desarrollados a través de la ecuación de balance de energía de oleaje (Holthuijsen, 2007), dada por:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} \cdot E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} \cdot E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} \cdot E(f, \theta; x, y, t)}{\partial \theta} = S(f, \theta; x, y, t) \quad \text{Ecuación 1}$$

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

$C_{g,x}$ y $C_{g,y}$: celeridad del oleaje en la dirección x e y .

C_{θ} : corresponde a la velocidad de propagación en el espacio espectral de frecuencia.

$S(f, \theta; x, y, t)$: término fuente de energía.

Sin embargo, el modelo Delft3D-WAVE, desarrolla las ecuaciones del modelo de oleaje SWAN (Simulating WAVes Nearshore). SWAN¹, es un modelo de tercera generación, de libre disposición, elaborado por The Delft University of Technology (The Netherlands) que desarrolla la ecuación de balance de acción de la ola. Esta ecuación es idéntica a la ecuación de balance de energía (Ecuación 1), pero en vez de ocupar la densidad de energía, $E(\sigma, \theta)$, se sustituye por la densidad de acción, $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$. Por otro lado, cuando las corrientes ambientales están presentes, la ecuación de balance de energía necesita ser modificada para incluir los efectos de transferencia de energía entre las olas y las corrientes. La ecuación queda de la siguiente forma (Hasselmann et al. 1973):

¹ SWAN ocupa la versión SWAN 40.11 o también llamado SWAN III

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

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

Ecuación 2

Donde el primer término de la parte izquierda representa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción, el segundo y tercer término representan la propagación de la densidad de acción en el espacio geográfico (con velocidades de propagación C_x y C_y). El cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a la variación de la batimetría y las corrientes. El quinto término es debido a la refracción en consecuencia a la profundidad y las corrientes (con velocidad de propagación C_{θ} en el θ -espacio). Las expresiones de estas velocidades de propagación son tomadas de la teoría lineal (Whitman, 1974).

Los procesos de propagación representada en SWAN son:

- Propagación recti-lineal en el espacio.
- Transformación de olas por cambio de profundidad o corriente (shoaling o refracción).
- Bloqueos o reflexión de olas por corrientes.
- Transmisión, bloqueo o reflexión por obstáculo.

El término $S(\sigma, \theta; x, y, t) = S$, es el término fuente de energía y puede ser representado como la superposición de diferentes términos energéticos, como:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

Ecuación 3

S_{in} : término debido a la transferencia de energía del viento a las olas.

S_{ds} : término debido al fenómeno descrestamiento (white-capping), interacción de las olas con el fondo marino y cuando se encuentra en aguas muy someras, existe rotura del oleaje debido a la profundidad.

S_{nl} : representa las interacciones no lineales entre las olas.

4.2 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLAJE EN LA ZONA DE ROMPIENTE (MÉTODO DE PROPAGACIÓN DE OLAJE, GODA 1985)

Luego que el oleaje sea transformado por la propagación desde aguas profundas a aguas someras, entra a la zona de rompiente de la playa, lugar que aumenta la dinámica del oleaje y la incertidumbre de sus valores crece. Sin embargo, una buena aproximación para conocer la altura en esta zona, es el método de propagación elaborado por Y. Goda (1985).

La siguiente expresión matemática realiza una aproximación para conocer la altura de olaje en la zona de rompiente, para la condición de H_1

$$H_1 = \begin{cases} K_s \cdot H'_0 & \text{si } \frac{h}{L_0} \geq 0.2 \\ \min[(\beta_0 \cdot H'_0 + \beta_1 \cdot h), \beta_{m\acute{a}x} \cdot H'_0, K_s \cdot H'_0] & \text{si } \frac{h}{L_0} < 0.2 \end{cases} \quad \text{Ecuación 4}$$

Con K_s , siendo el coeficiente de shoaling (asomeramiento), que se determina mediante una aproximación empírica numérica elaborada por Shuto (1974) y su análisis se observa en la Figura 4-1.

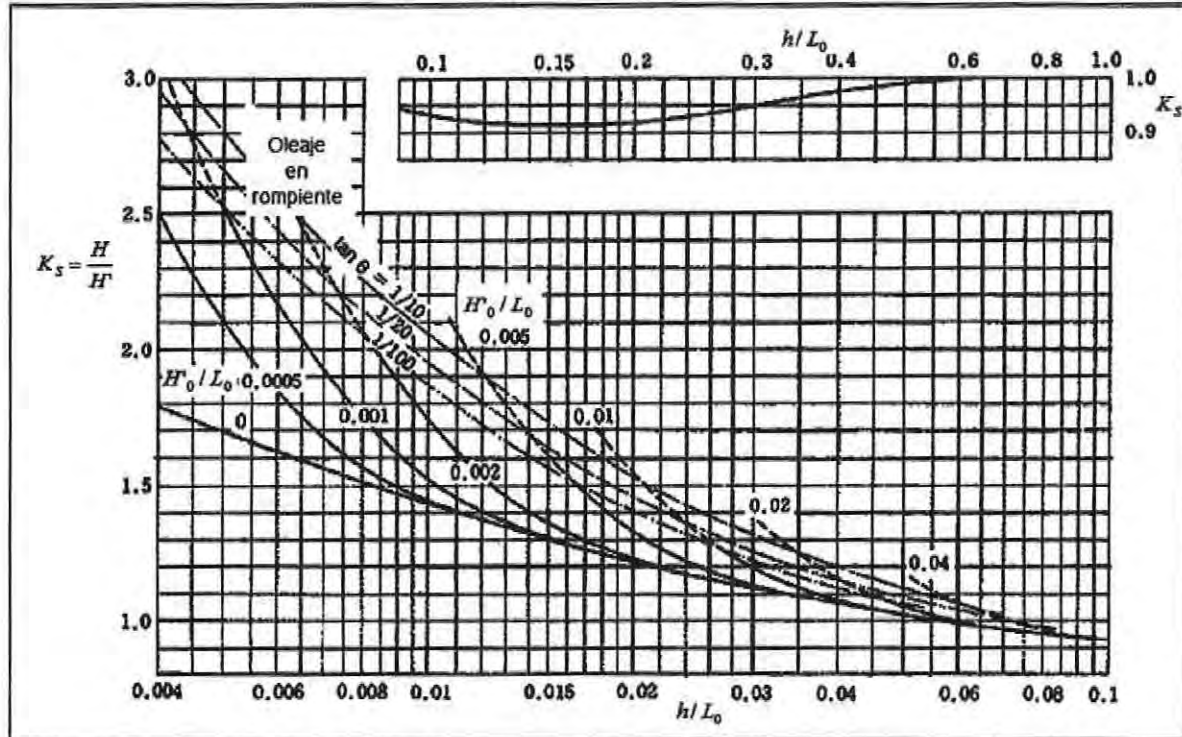


Figura 4-1 Evaluación del coeficiente de Shoaling

Fuente 1 (OCDI, 2002)

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Sus parámetros son:

h : profundidad al pie de la obra, [m].

L_0 : longitud de la onda en aguas profundas, [m].

H'_0 : altura equivalente en aguas profundas, [m].

$\tan \theta$: pendiente de fondo [°].

Los valores correspondientes a beta (β), son los coeficientes para la estimación de la altura y se calculan de acuerdo a las siguientes formulaciones:

$$\beta_0 = 0.028 \cdot \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{-0.38} \cdot e^{(20 \cdot \tan \theta)} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\beta_1 = 0.52 \cdot e^{(4.2 \cdot \tan \theta)} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\beta_{\text{máx}} = \text{máx} \left[0.92, 0.32 \cdot \left(\frac{H'_0}{L_0} \right)^{-0.29} \cdot e^{(2.4 \cdot \tan \theta)} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Supuestos generales:

1. Espectro de oleaje incidente del tipo Bretschneider-Mitsuyasu.
2. La distribución de la altura de la onda incidente es de tipo Rayleigh.
3. Las ondas se propagan en una playa lisa y absorbente (sin reflexión) con contornos rectos y paralelos.
4. El asomeramiento de oleaje irregular puede ser aproximado por el asomeramiento de ola monocromática.

Se debe considerar que:

1. El espectro Bretschneider-Mitsuyasu, es un espectro de banda estrecha. Por lo tanto, esta aplicación no debe utilizarse con espectro de bandas anchas o multiples peaks.
2. Esta aplicación no debe utilizarse en batimetrías complejas y los contornos deben ser aproximadamente paralelos a la costa.

Además, se llevaron las siguientes limitaciones:

1. El periodo peak no debe exceder los 16 [s].
2. La menor profundidad de interés que se puede representar es de 10 [pies] o 3.03 [m].

4.3 CÁLCULO DEL PESO DE LA CORAZA

La capa exterior de un rompeola son los elementos que conforman la coraza o el manto principal y es la capa que se encuentra directamente en contacto con el oleaje. Estos elementos pueden estar compuestos por materiales de canteras como son las rocas o de

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

elementos artificiales (de hormigón). Sin embargo, para conocer el peso de la coraza, se seleccionaron dos métodos que han sido aceptadas por la comunidad científica. Esta es la ecuación determinística de Hudson (1974) y la fórmula de Van der Meer (1988).

4.3.1 FÓRMULA DE HUDSON (1974)

La ecuación de Hudson comienza teóricamente con la expresión formulada por Iribarren, con el siguiente esquema de equilibrio de fuerzas, como aparece en la Figura 4-2:

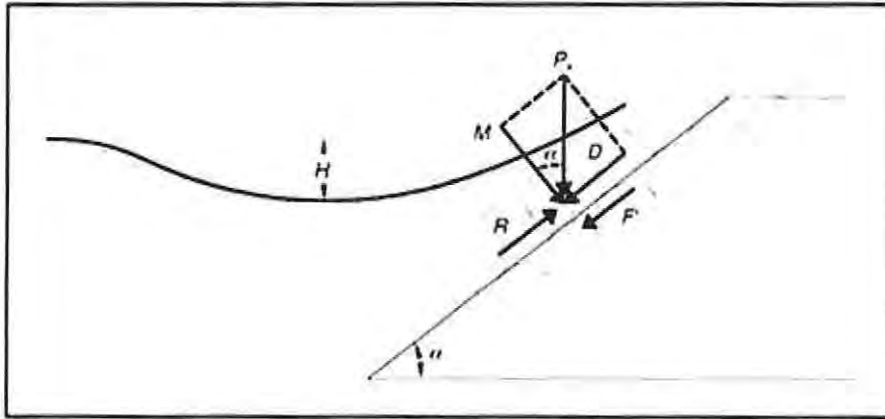


Figura 4-2 Equilibrio de fuerzas de Iribarren en falsa rotura o surgiente
Fuente 2 (Del Villar & García, 2008)

Donde:

P_s : peso del elemento.

M : componente perpendicular del peso en el talud.

R : resistencia al deslizamiento.

D : componente paralela del peso en el talud.

F' : fuerza de arrastre.

La condición de equilibrio de fuerzas anteriores en proyección sobre el talud del dique, da lugar a la siguiente expresión para el peso (masa) de cada elemento:

$$P = \frac{N \cdot \rho_r \cdot f^3 \cdot H^3}{\Delta^3 \cdot (f \cdot \cos(\alpha) - \sin(\alpha))^3}$$

Ecuación 8

Con:

H : altura de la ola en el momento de la rotura, [m].

ρ_s : densidad del elemento.

ρ_a : densidad del fluido.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

ρ_r : densidad relativa del elemento $\left(\frac{\rho_s}{\rho_a}\right)$.

Δ : densidad sumergida relativa del elemento $\left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}\right)$.

f : coeficiente de fricción de la primera capa de elementos sobre la segunda.

α : ángulo del paramento del dique con la horizontal.

N' : coeficiente general de proporcionalidad, a determinar experimentalmente. Tiene dimensión de densidad y se le denomina coeficiente de estabilidad.

La ecuación anterior con $f = 1$ es conocida como la fórmula de Iribarren.

Sin embargo, Hudson sensibilizó experimentalmente los coeficientes f y N' y determinó agrupar ambos términos en un solo coeficiente denominado, coeficiente de estabilidad, K_d (ver Tabla 4-1). Este parámetro se encuentra en función de la parte de la estructura (tronco o cabezo del dique), tipo de elementos, forma de colocación, número de capas, talud, naturaleza del oleaje (roto o no roto), porcentaje de averías (calculado siempre a riesgo de iniciación de averías²), sobre la base de ensayos con características de:

1. Oleaje incidente, regular, monocromático, no rebasable y perpendicular al dique.
2. Taludes ensayados con: $\cot \alpha = 1.25; 1.2; 2; 2.5; 3; 4$ y 5 .
3. Rango de profundidades relativas (profundidad/longitud de onda): de 0.1 a 0.5 .

Por lo tanto la ecuación de Hudson queda de la siguiente forma:

$$\frac{H}{\Delta \cdot D_{n50}} = (K_d \cdot \cot(\alpha))^{\frac{1}{3}} \quad \text{ó} \quad M_{50} = \frac{\rho_s \cdot H^3}{K_d \cdot \Delta^3 \cdot \cot(\alpha)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

D_{n50} : diámetro medio de la roca [m].

M_{50} : masa media de la roca [t].

α : ángulo de la pendiente [°].

K_d : coeficiente de estabilidad.

² Inicio de avería, se define como la condición en la cual el 5% de las piezas del manto principal han sido desplazadas una longitud equivalente al diámetro nominal D_{n50} .

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 4-1 Valores de la constante de estabilidad de Hudson (k_d)

Elementos	Número de capas	Colocación	Tronco del dique		Talud
			Rota	No rota	
Roca lisa redondeada			1.2	2.4	
Roca rugosa angular	2	Random	2.0	4.0	2.0
Dolos			8.0	16.0	
Tetrápodos			7.0	8.0	

Fuente 3 (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

4.3.2 FÓRMULA DE VAN DER MEER (1988)

Basados en los primeros trabajos de Thomson y Shutler (1975) y en una serie muy amplia de ensayo con oleaje irregular, Van der Meer incorpora a la estructura básica dos parámetros nuevos. Siendo el primero, el factor de permeabilidad y el otro el número de olas del temporal. Por lo tanto, Van der Meer propone una serie de expresiones en un rango muy amplio de elementos (escollera, cubos, tetrápodos y acrópodos), composición del dique (núcleo, filtro y manto), permeabilidad teórica en función de la misma, amplias condiciones de clima marítimo representado por la altura de ola, el periodo y la duración del temporal, formas de rotura (voluta o plunging y oscilación o surging), número de Iribarren y taludes. Todo ello, le ha conseguido a una serie de expresiones totalmente aceptadas en la actualidad por la comunidad internacional. Definiendo al parámetro adimensional de Iribarren como:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Con:

$\tan \alpha$: pendiente del fondo marino.

H : altura de ola [m].

L : longitud de ola [m].

Y las siguientes dos expresiones para el cálculo del peso de escollera en aguas someras

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta \cdot D_{n50}} = 8.70 \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.20} \cdot \xi^{-0.50} \quad \text{olas en plunging} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta \cdot D_{n50}} = 1.40 \cdot P^{-0.13} \cdot \sqrt{\cot \alpha} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.20} \cdot \xi^p \quad \text{olas en surging} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

D_{n50} : diámetro medio de la roca [m].

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

N : número de olas ($1000 < N < 7500$).

P : factor de permeabilidad (valores para tres casos particulares: 0.1; 0.5; 0.6). Ver configuración en la Figura 4-3.

S : nivel de averías ($2 < S < 12$).

$H_{2\%}$: $(1.1-1.4) \cdot H_s$ [m].

T_m : periodo medio del oleaje [s].

L : longitud de onda media [m].

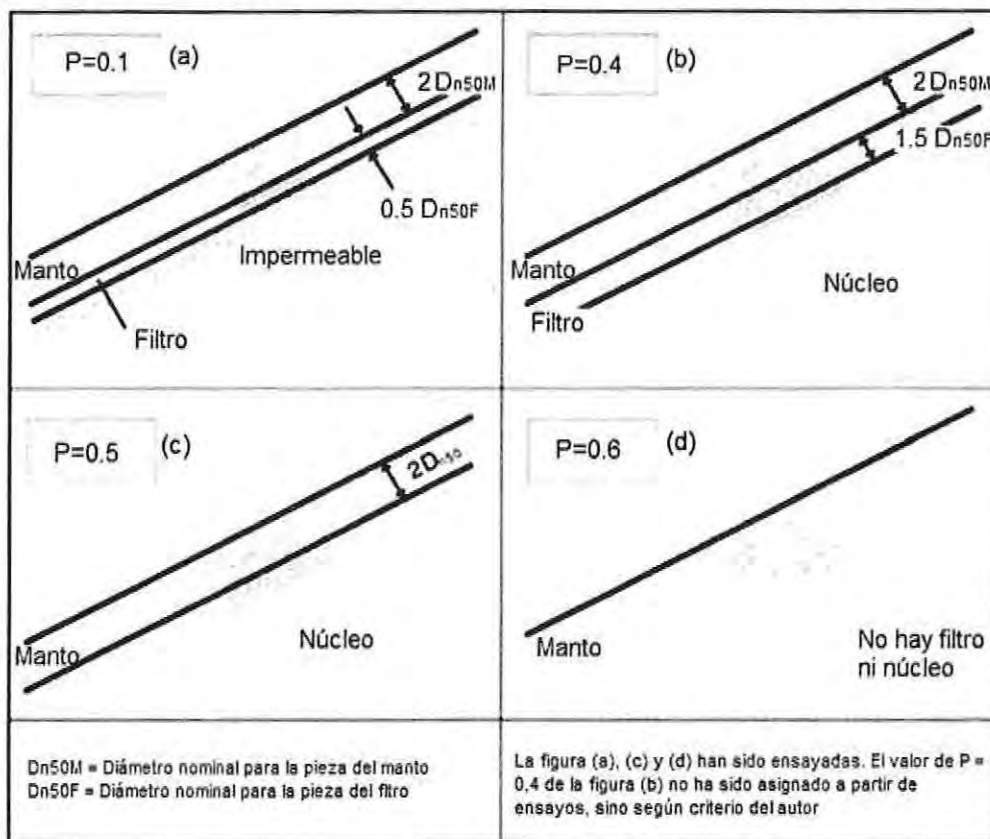


Figura 4-3 Valores de permeabilidad (P) de Van der Meer para distintas configuraciones de rompeola

Fuente 4 (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

Y la Ecuación 13, para el cálculo del peso de los elementos Tetrápodos, en aguas someras

$$\frac{H_{2\%}}{\Delta \cdot D_n} = 1.4 \cdot \left(3.75 \cdot \frac{N_{od}^{0.5}}{N^{0.25}} + 0.85 \right) \cdot S_{om}^{-0.2}$$

Ecuación 13

Donde:

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

D_n : diámetro del elemento de hormigón.

N_{od} : números de unidades desplazadas.

N : número de olas.

4.4 CAUDAL DE SOBREPASO

El principal objetivo de un rompeola es disminuir al máximo el caudal de sobrepaso originado por el oleaje y mantener al mínimo la cota de coronamiento de la estructura. Sin embargo, esto depende principalmente del propósito funcional que será creado el rompeola. Teniendo en cuenta lo anterior, el caudal de sobrepaso es calculado por la formulación determinística publicada recientemente (EurOtop, 2007), cuya Ecuación 14 es la siguiente:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} = 0.2 \exp\left(-2.3 \cdot \frac{R_c}{H_s \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta}\right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

q : caudal de sobrepaso [l/s por m].

g : gravedad [m/s²].

H_s : altura significativa de la ola [m].

R_c : francobordo de la estructura [m].

γ_f : parámetro de rugosidad.

γ_β : parámetro de incidencia.

4.5 OBRAS DE ABRIGO Y DE PROTECCIÓN COSTERA

La función de las obras de abrigo es generar un área abrigada para las operaciones de naves dentro de la dársena. También se da la utilidad en la creación de playas artificiales, para prevenir la pérdida del material, a causa del transporte longitudinal de sedimento.

Las tipologías más comunes que satisfacen estos requerimientos son los rompeolas en talud, de pared vertical, de cajones de hormigón, gaviones de tablestacas, flotantes, entre otras. Una de las diferencias que caracterizan las tipologías anteriores, es su forma de mitigar el movimiento ondulatorio de la ola, pudiendo ser por rompimiento o por reflexión.

Para el caso de prevenir la erosión y socavación en explanadas o proteger construcciones del sobrepaso del oleaje, es necesario realizar obras de protección costeras. Dentro de este grupo de tipologías se encuentran las tablestacas, los muros gravitacionales, los revestimientos, los de taludes, entre otras.

Una forma de clasificar las obras, se encuentra en el documento de referencia del grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (UNICAN, 2000). La primera categorización es de acuerdo al efecto de la estructura en el oleaje: clasificación energético – funcional. Aquí se encuentran cuatro tipos de estructuras, las reflejantes, disipativas, transmitidas y las mixtas. La segunda, corresponde a la deformación de la estructura de protección, que consta de dos tipos, la estructura de protección flexible y la de protección rígida. El tercer en categorizar, es la posición de la estructura con respecto a la línea de costa. Los tres tipos de obras dependerán de: formar la línea de costa, como los muros y diques de contención. Obras que facilitan discontinuidades en la línea de costa, como los espigones. O Finalmente, la modificación de la línea de costa, dentro de este grupo, se encuentra los diques conectados y los exentos. Y finalizando la clasificación, se encontrarán dependiendo de la metodología de cálculo.

4.5.1 DIQUES EN TALUD

Los diques en talud son los clásicos rompeolas (breakwater), que permiten la rotura del oleaje mediante la desestabilización del movimiento orbital ondulatorio. Esto se logra disponiendo un talud inclinado convenientemente protegido, capaz de soportar las acciones incidentes y determinando la función de las mismas y del rebase máximo para mantener un comportamiento estructural e hidráulico admisible. (Negro & Varela, 2008)

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Una estructura tipo, se encuentra en la Figura 4-4

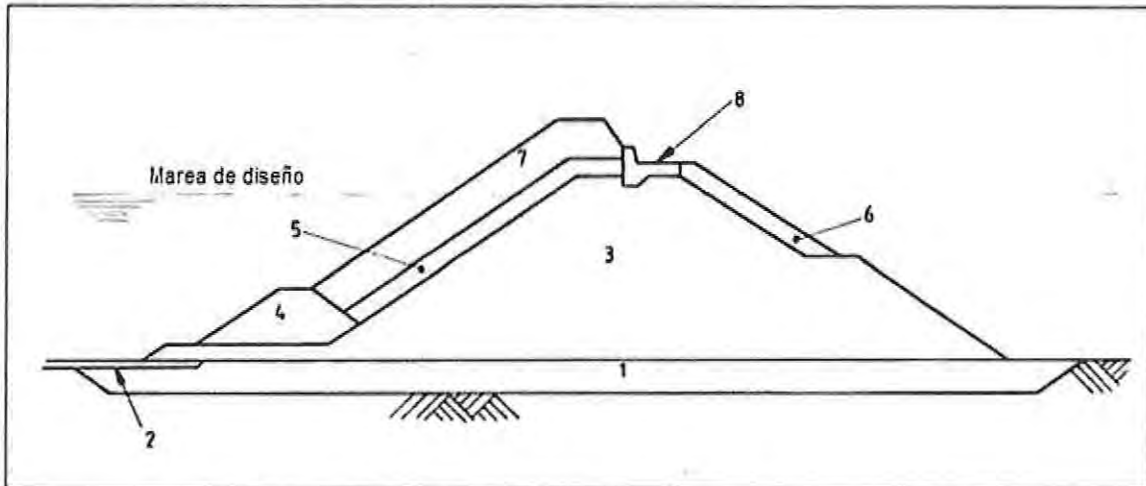


Figura 4-4 Configuración transversal de un dique rompeolas tipo
Fuente 5 (British Standard, 1991)

Leyenda

1. Fundación mejorada (en caso de que sea necesario).
2. Protección socavación.
3. Núcleo.
4. Berma de apoyo del manto principal.
5. Filtros (o manto secundario).
6. Manto posterior.
7. Manto principal (o coraza).
8. Espaldón (o parapeto).

▪ Diseño de las componentes del dique en talud

Una recomendación para calcular las otras componentes del dique en talud, además del manto principal, se encuentra en el Diseño de Rompeolas (Negro y Varela, 2008), que relaciona al diámetro nominal medio (D_{n50}) y la permeabilidad teórica (P), en las siguientes condiciones:

Si $P = 0.10$ permeabilidad teórica para manto, filtro y núcleo impermeable:

$$\frac{D_{n50\text{manto}}}{D_{n50\text{filtro}}} = 4.5$$

Ecuación 15

Si $P = 0.40$ permeabilidad teórica para manto, filtro y núcleo todo uno:

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

$$\frac{D_{n50manto}}{D_{n50filtro}} = 2.0$$

Ecuación 16

$$\frac{D_{n50filtro}}{D_{n50núcleo}} = 4.0$$

Ecuación 17

Si $P = 0.50$ permeabilidad teórica para manto y núcleo todo uno:

$$\frac{D_{n50manto}}{D_{n50núcleo}} = 3.2$$

Ecuación 18

Si $P = 0.6$ permeabilidad teórica de acumulación de material granular. No hay manto, ni filtro, ni todo uno. No existe requisito ni condición de diseño; si bien se recomienda un porcentaje de W_{50} , de W_{85} y W_{15} .

▪ **Diseño ple de protección**

Para el cálculo del elemento para el pie de protección, se ocupa la fórmula de Gerding (1993).

La tesis de máster de Gerding defendida en Delft University of Technology (TU Delft) permite analizar el comportamiento de la berma-banqueta como síntesis de tres productos adimensionales, H_0 , h_t/D_{n50} y N_{od} . La fórmula de Gerding es válida para escolleras de densidad de 2.68 t/m^3 , taludes ($\cotg \alpha = 1.50$) de piezas sueltas no rebasables y trenes de 1000 olas activas y es la siguiente:

$$H_0 = \frac{H_s}{\Delta \cdot D_{n50}} = \left(0.24 \cdot \frac{h_t}{D_{n50}} + 1.6 \right) \cdot N_{od}^{0.15} \quad 0.4 < \frac{h_t}{h} < 0.9 \wedge 3.0 < \frac{h_t}{D_{n50}} < 25$$

Ecuación 19

Y con la siguiente Figura 4-5 como esquema que representa h_t y h

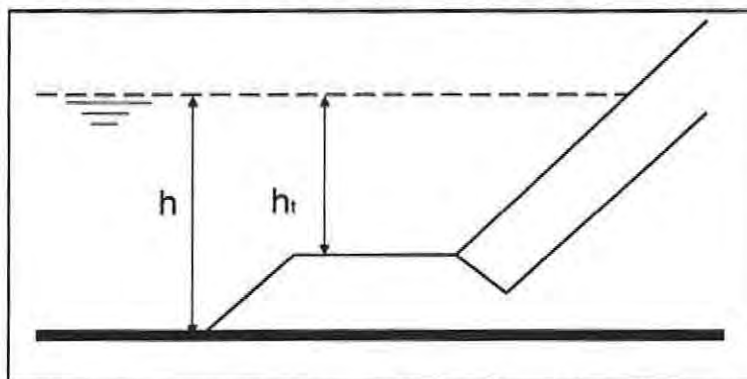


Figura 4-5 Esquema de la berma para h_t y h

Fuente 6 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Los niveles de averías considerados en los trenes de ensayos fueron los siguientes:

N_{od} : 0.00 no hay falla.

N_{od} : 0.50 daño aceptable entre 0 y 5% de piezas.

N_{od} : 2.00 daño moderado, avería entre 5 y 10% de las piezas.

N_{od} : 4.00 colapso, avería superior al 20% de las piezas.

4.5.2 DIMENSIONES

Para conocer las dimensiones de los elementos de un dique en talud, se emplea el concepto de espesor de capa, cuya fórmula es:

$$e = n \cdot K_{\Delta} \cdot \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\gamma}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

n : número de capas que componen el manto o filtro.

K_{Δ} : coeficiente de capa, ver Tabla 4-2.

W_{50} : peso medio de las unidades del manto [t].

γ : peso específico de las unidades del manto [t/m^3].

Tabla 4-2 Coeficiente de capa y porosidad según los elementos del manto

Unidad del Manto	Número de piezas	Colocación	Coeficiente de Capa K_{Δ}	Porosidad
Escollera Lisa			1.02	0.38
Escollera rugosa	2	Random	1.00	0.37
Dolo			0.94	0.56
Tetrápodo			1.04	0.5

Fuente 7 (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

Para un rompeola de tres capas (manto, filtro y núcleo), queda representada su sección a través de la Figura 4-6

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

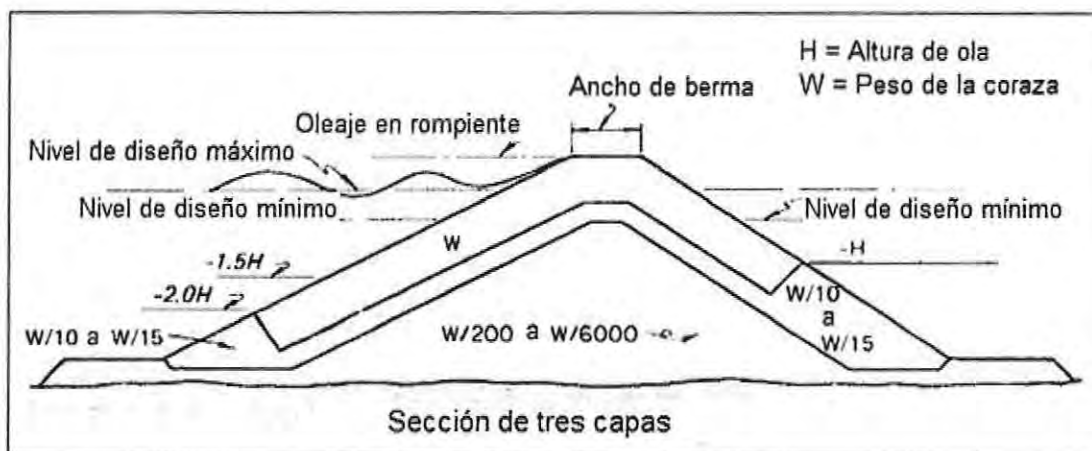


Figura 4-6 Dique en talud para condición de ola rompiente

Fuente 8 (USACE, Shore Protection Manual, 1984)

4.6 DISEÑO PARAPETO

Una forma alternativa para disminuir el volumen del material de escollera y dependiendo de la obra, proporcionar camino de acceso para peatones, vehículos, instalación de tuberías, entre otras funciones, se conoce la formulación de Gumbak y Göke (1984) con el fin de dimensionar el espaldón (parapeto).

4.6.1 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES GÜNBAK Y GÖKE (1984)

El diagrama asume que la vena líquida alcanza el valor del remonte, R_u , formando un triángulo cuyo vértice $\beta = 15^\circ$ resulta de la prolongación de la línea teórica del talud y el ángulo anterior.

Previamente se hace necesaria la estimación del remonte, recomendando sus autores el siguiente modelo predictivo:

$$R_u = \begin{cases} 0.4 \cdot \xi \cdot H & \xi < 2.5 \\ H & \xi > 2.5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$P_m = \frac{\gamma_w \cdot (\sqrt{g \cdot y})^2}{2 \cdot g} = \frac{\gamma_w}{2} \cdot y \quad \text{Ecuación 22}$$

$$P_h = \gamma_w \cdot (y + s) \quad \text{Ecuación 23}$$

$$y = \frac{(R_u - A_c)}{\sin \alpha} \cdot \frac{\sin \beta}{\cos(\alpha - \beta)} \quad \text{Ecuación 24}$$

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

$$P_b = P_h + 0.5 \cdot P_m$$

Ecuación 25

Donde la distribución de presiones se observa de la Figura 4-7

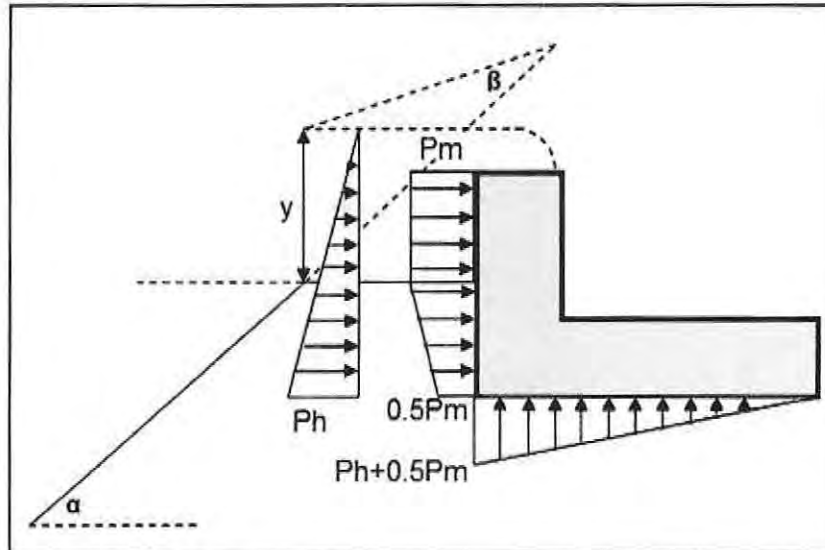


Figura 4-7 Diagrama de presiones de Gumbak y Göcke (1984)

Fuente 9 (Negro & Varela, 2008)

5 METODOLOGÍA

El siguiente diagrama se detalla las actividades que se realizarán para diseñar la protección costera y presentar sus alternativas estructurales.

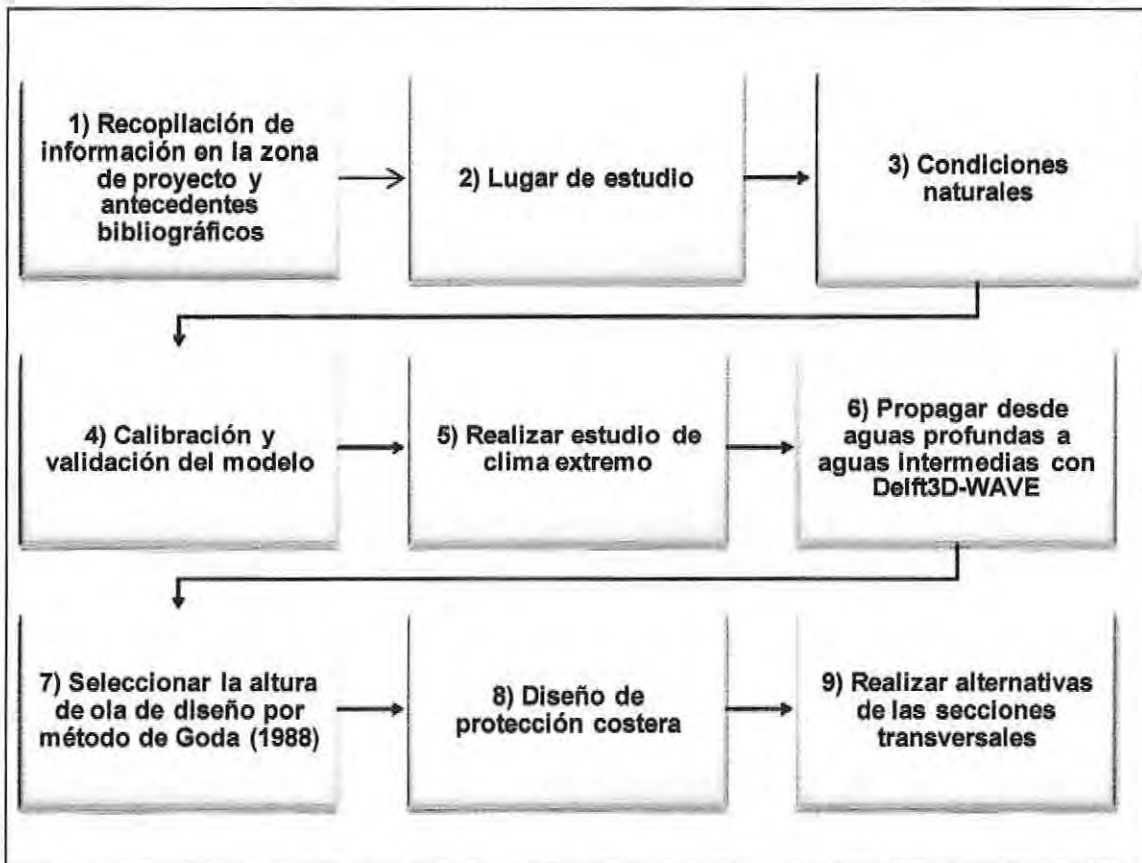


Figura 5-1 Diagrama de la metodología de estudio

Fuente 10 Elaboración propia

- 1) Hay que visitar la zona de proyecto, recopilar información y antecedentes bibliográficos.
- 2) Lugar de estudio: se escoge la zona sur del puerto de San Antonio, ya que en este lugar es afectado por el caudal de sobrepaso en épocas de temporal. Es necesario diseñar una obra de protección costera.
- 3) Condiciones naturales: se recopilan antecedentes naturales de la zona de estudio, como:
 - a) Batimetría: variable que transforma el oleaje en la propagación desde aguas profundas a aguas someras. La información batimétrica se obtiene de un modelo

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

- global GEBCO³ en aguas profundas y para la zona de estudio, se ocupa la información de las cartas náuticas digitales del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA pub. 3000, 2008).
- b) Viento: Fenómeno que puede aumentar el nivel medio del mar o también producir oleaje local (sea).
 - c) Marea y niveles de diseño: para los niveles de marea, se utilizan los niveles no armónicos de marea (SHOA pub. 3202, 1999). Se incluyen los efectos meteorológicos de presión atmosférica y su correlación de valores (SHOA pub. 3009, 2014). En el caso de que haya rotura, el desarrollo del wave set-up se hace de acuerdo a la Figura 6-8 (OCDI, 2002). Se selecciona un nivel de diseño considerando los efectos astronómicos, meteorológicos y de oleaje (Beyá & Winckler, 2012).
 - d) Oleaje: los datos de olas en aguas profundas es provenientes del modelo de hindcasting WAM que es forzado con valores del re análisis de ERA – Interim desarrollado por el Centro Europeo para el pronóstico del tiempo en el mediano plazo (ECMWF por sus siglas en inglés). La altura de ola es el valor principal para conocer el diseño de la protección costera.
 - e) Erosión costera: por estar en una zona de rompiente, se ocupa el modelo Petra, para obtener una primera aproximación de la erosión costera al corto plazo. La información sedimentológica, es obtenida por un estudio elaborado por EPSA.
- 4) Modelo de propagación de oleaje: se ocupa el software matemático gratuito, Delft3D-WAVE, que incorpora al modelo de propagación SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Se simula desde aguas profundas hasta aguas intermedias, comparando los resultados con un perfilador acústico ADCP⁴ (por sus siglas en inglés), facilitada por la Empresa portuaria San Antonio (EPSA), con el fin de de calibrar y validar los datos y el modelo. Se emplean diferentes datos estadísticos para comparar los resultados.
 - 5) Realización estudio de clima extremo: de acuerdo a los dos métodos de selección de datos (Goda, 2000) se ocupa el criterio que exceden un cierto umbral (POT⁵), de acuerdo a las direcciones principales del tercer y cuarto cuadrante, según coordenadas meteorológicas. Con estos datos, se determina la altura significativa en aguas profundas de acuerdo a los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años por medio de distintas distribuciones probabilísticas.
 - 6) Propagación desde aguas profundas a aguas intermedias: conociendo el valor del periodo de retorno de acuerdo a las recomendaciones españolas (ROM 0.2, 1990), se propagar la altura de ola en aguas profundas hasta aguas intermedias simuladas por el software Delft3D-WAVE.
 - 7) Selección de la altura de ola de diseño: como el Delft3D-WAVE simula hasta aguas intermedias, se ocupa la metodología de propagación de Goda (1985), para conocer la

³ http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

⁴ Acoustic Doppler Current Profiler

⁵ Peak Over Threshold

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

altura de ola desde aguas intermedias hasta al pie de la obra y se denomina ola de diseño.

- 8) Diseño de protección costera: se diseña una protección costera en talud, puesto que cumple la condición de permitir la rotura del oleaje y disminuye el caudal de sobrepaso, entre otras ventajas (Negro & Varela, 2008). Para realizar el diseño final, se divide en tres capítulos, diseño estructural, diseño hidráulico y diseño de muro parapeto:
 - a) Diseño Estructural: con el fin de calcular el peso de la coraza o manto principal, se ocuparán las fórmulas de Hudson (1974) y Van der Meer (1988) que son aceptadas científicamente (Negro & Varela, 2008). Para conocer el peso del filtro y núcleo, se desarrolla de acuerdo a la relación de la permeabilidad teórica. Para estimar la protección al pie del talud, se ocupa la fórmula de Gerding (1993)
 - b) Diseño Hidráulico: para conocer la altura de coronamiento de la obra, se estima de acuerdo a la formulación probabilística (EurOtop, 2007). Se complementa con el cálculo del ascenso del oleaje (run up).
 - c) Diseño de muro parapeto: una forma de alternativa a los clásicos rompeolas en talud, es agregar un muro parapeto o espaldón, con el propósito de reducir la cota de coronamiento de la coraza y disminuir la inversión del proyecto. Se utiliza el diagrama de presiones de Gumbak y Göcke (1984)
- 9) Alternativas de secciones transversales: se presentarán alternativas de secciones con manto de escolleras, dolos, tetrápodos y escollera con muro parapeto.

6 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SECTOR MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO

6.1 PUERTO DE SAN ANTONIO

El área de estudio está comprendida dentro del puerto de San Antonio, ubicada en la región de Valparaíso, Chile. Al interior del puerto de San Antonio, existen cuatro terminales (Figura 6-1): Molo Sur, concesionada por San Antonio terminal Internacional (STI), Terminal Norte concesionada al Puerto Panul, Terminal Espigón-Costanera concesionada por Puerto Central (PCE), mas el terminal Policarpo Toro en el Sitio 9 administrado por Empresa Portuaria San Antonio (EPSA).



Figura 6-1 Distribución de concesiones al interior del Puerto de San Antonio

Fuente 11 Google Earth

El puerto mantiene una ventaja estratégica en su ubicación, se encuentra a 100 km de la capital y posee excelentes vías de acceso. Abarca un área de influencia para las regiones Metropolitana, Quinta y Sexta, alcanzando inclusive la Cuarta y Séptima región. El puerto posee diferentes equipos, como grúas Gantry, algunas de ellas post Panamax y maquinarias modernas para la eficiencia del puerto.

La transferencia de carga por el puerto de San Antonio ha experimentado un incremento sostenido durante la última década convirtiéndose en el puerto número uno de Chile. Una cuantificación de contenedores movilizados se detallarán en la Tabla 6-1:

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Tabla 6-1 Contenedores Movilizados. Puerto San Antonio

Año	Miles de toneladas	Miles de unidades	Miles de TEU's
1990	252	20	24
1991	394	27	33
1992	367	28	37
1993	885	66	95
1994	1,326	94	137
1995	2,482	170	249
1996	3,101	209	313
1997	3,742	248	373
1998	3,947	268	415
1999	3,935	238	375
2000	4,604	287	456
2001	4,271	256	414
2002	4,724	272	439
2003	5,5	320	524
2004	6,77	386	640
2005	7,987	466	773
2006	6,748	406	676
2007	6,565	386	651
2008	7,052	416	688
2009	7,011	433	729
2010	8,528	521	871
2011	9,337	553	928
2012	10,638	641	1,069

Fuente 12 Informe plan maestro EPSA (2013)

Por otro lado, al considerar la construcción de un nuevo puerto exterior (Puerto Gran Escala, PGE) para el año 2033 se prevé la siguiente proyección descrita en la Tabla 6-2:

Tabla 6-2 Capacidad potencial de transferencia. Puerto de San Antonio

Año	Capacidades en TEU's
2018	2,300,000
2033	8,237,500

Fuente 13 Informe plan maestro EPSA (2013)

6.1.1 ZONA DE PROYECTO

El área de estudio se encuentra al costado izquierdo del terminal Molo Sur, como se ve en la Figura 6-2. En esta zona se encuentra protegida por playa, sin embargo, luego del terremoto

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

y posterior tsunami del año 2010 y los grandes temporales de los últimos años, se cree que la morfología del lugar ha cambiado y la playa ha ido desapareciendo. En consecuencia, la forma más eficiente de disipar energía naturalmente (UNICAN V. I., 2000) ha desaparecido y ante eventuales tormentas el caudal de sobrepaso ha sido considerable, provocando el cierre de la explanada adyacente por el cual transitan los camiones con cargas.



Figura 6-2 Imagen satelital de la zona de estudio

Fuente 14 Google Earth

En la Figura 6-43 y Figura 6-4 se aprecia que el camino por donde transitan los camiones se encuentra detrás de la playa. También se observan los elementos que conforman el revestimiento de la playa, destacando las rocas, dolos, muros de hormigón y escombros, que han sido arrojados para minimizar el efecto del oleaje sobre la pendiente.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"



Figura 6-3 Fotografía del extremo sur de la zona del proyecto. Fecha 16/11/2013

Fuente 15 Elaboración propia



Figura 6-4 Fotografía de elementos que se encuentra en la zona de estudio. Fecha 16/11/2013

Fuente 16 Elaboración propia

6.2 ESTUDIOS DE LÍNEA DE BASE

6.2.1 BATIMETRÍA

La información se obtiene a través de dos bases de datos de batimetría.

- Batimetría global GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) del Centro de Datos Oceanográficos Británico (BDOC por su siglas en inglés) que tiene una resolución de datos de 0.5 minutos.

Y para la zona cercana a la de estudio, se reemplaza por las cartas náuticas digitales facilitada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA pub. 3000, 2008).

- Carta náutica del SHOA N° 5114, aproximación al puerto de San Antonio, escala 1:10,000.
- Carta náutica del SHOA N° 5115, puerto de San Antonio, escala 1:5,000.

6.2.2 VIENTOS

Para el diseño de defensas costeras, el estudio de viento está determinado a conocer el estudio de viento extremo, la generación de oleaje local (sea) y el aumento de marea meteorológica (wind set-up). La zona en que se encuentra el puerto de San Antonio está afectada por el fenómeno de circulación atmosférica de gran escala. Este fenómeno regula las condiciones climáticas, a través de un centro de altas presiones, el cual permanece estacionario y alcanza hasta la latitud 30 [°] Sur. En invierno el centro se mueve hacia el norte, hasta la latitud 25 [°] Sur. Dado el favorable régimen y su lejanía a los centros de baja presiones que generan temporales, es probable que las condiciones extremas estén dadas por el oleaje de generación distante (swell) y que el efecto del wind set-up sea poco relevante.

De los estudios de vientos (Proconsa Ambiental, 2001), se confirma que los vientos reinantes soplan de las direcciones S, N y SW. Sin embargo se muestra una marcada diferencia estacional. Para el caso de la primavera y verano, el viento reinante proviene de direcciones SW, W y NW, mientras que para el otoño e invierno es mas variable, con direcciones SE, E y NE. En general, del estudio se analiza que el 86% de frecuencia se encuentra bajo la velocidad de 13 nudos (6.63 m/s) alcanzando un valor máximo de 40 nudos (20.4 m/s) de una dirección norte.

6.2.3 MAREAS Y NIVELES

En esta sección se conocerán los niveles asociadas a la marea astronómica (efectos de la luna y el sol) y de la marea meteorológica (efectos asociados al viento y presión atmosférica), para luego conocer los niveles característicos a usarse en el diseño de la ingeniería costera

Marea astronómica

La marea astronómica o también llamada marea de gravedad encontrada en San Antonio, corresponde a un régimen de marea semidiurna, con dos pleamares y dos bajamares en un día (24 horas y 50 minutos). Las componentes de estos rangos de mareas son significativas

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

y se obtuvieron de las tablas de Marea del Servicio Hidrográfico y Oceanográficos de la Armada (SHOA⁶), donde los planos se ven en la Figura 6-5 y Tabla 6-3:

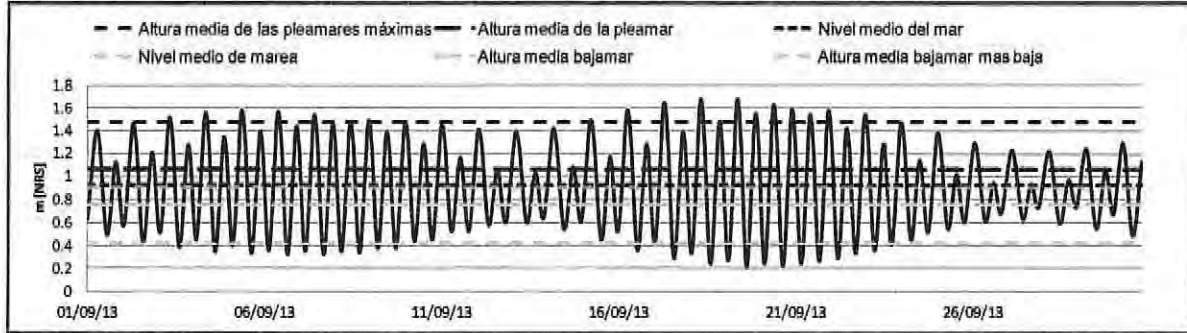


Figura 6-5 Niveles de marea

Fuente 17 Elaboración propia

Tabla 6-3 Caracterización de la marea astronómica

Planos de referencia de la marea	m [NRS]
Nivel medio de marea	+0.9
Altura media de la pleamar	+1.06
Altura media pleamares máximas	+1.47
Altura media bajamar	+0.76
Altura media bajamar mas baja	+0.42
Nivel medio del mar	+0.92

Fuente 18 Elaboración propia

▪ **Marea meteorológica**

Menos significativas que los rangos de marea astronómicas, pero en su ocurrencia conjunta al fenómeno anterior podría causar bastantes daños. Aquí se conocen los efectos producidos por la presión atmosférica y la intensidad del viento.

1) Efecto de la presión atmosférica

Los efectos de la presión atmosférica inducen cambios en el nivel del mar. Cuando la presión aumenta (buen tiempo) el nivel del mar disminuye y viceversa (mal tiempo), este fenómeno se denomina, barómetro invertido⁷.

⁶ <http://www.shoa.cl/mareas/tablademarea.html>

⁷ Para un nivel horizontal, la presión total a una profundidad H es: $P_a + \rho g H = \text{constante}$. Si varía la presión atmosférica en ΔP_a se tendrá que el nivel del mar variará según: $\Delta H = (\Delta P_a) / \rho g$. Si se sabe que $\rho = 1,025 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ y $g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$, por lo tanto, la expresión anterior se tiene que, $\Delta H = -0.993 \text{ [\Delta Pa]}$, donde ΔH se mide en [cm] y ΔP_a en [hPa]. En términos aproximados, un incremento de 1 [hPa] produce un decrecimiento del nivel del mar del orden de 1 [cm].

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Para cuantificar el aumento y la disminución del nivel del mar asociado a la presión atmosférica y por falta de larga data de San Antonio, se analizó una estadística registrada en la estación meteorológica de Santiago⁸, cuya ubicación se encuentra en la coordenada UTM 334,425.67 [m] y 6,305,169.60 [m] (zona horaria = 19 y datum = WGS84), a una distancia aproximadamente de 80 [km] con respecto al área de estudio, como se ve en la Figura 6-6:



Figura 6-6 Coordenadas de la estación meteorológica

Fuente 19 Google Earth

Se registró una serie de datos de siete años, cuyo periodo se encuentra entre el año 2008 al 2014. La Tabla 6-4 muestra los valores máximos y mínimos de acuerdo a cada año y la Figura 6-7 representará gráficamente la serie estadística de datos, mostrando además el valor medio y el nivel donde la marea no tiene variación. La unidad de medida de la presión atmosférica se encuentra en hectopascal⁹ [hPa]:

⁸ Disponible en el sitio www.tutiempo.net/clima/Pudahuel

⁹ Hectopascal: es una unidad de presión que equivale a 100 Pascales ($\text{Pa} = \text{N/m}^2, \text{J/m}^2, \text{kg/ms}^2$)

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Tabla 6-4 Valores máximos y mínimos anuales

Año	Presión atmosférica [hPa]	
	Valor máximo	Valor mínimo
2014	1028	1007.6
2013	1028.8	1006.5
2012	1029.7	1007.4
2011	1028.6	1007
2010	1030.3	1006.5
2009	1024.7	1007.9
2008	1027.4	1007.1

Fuente 20 Elaboración propia

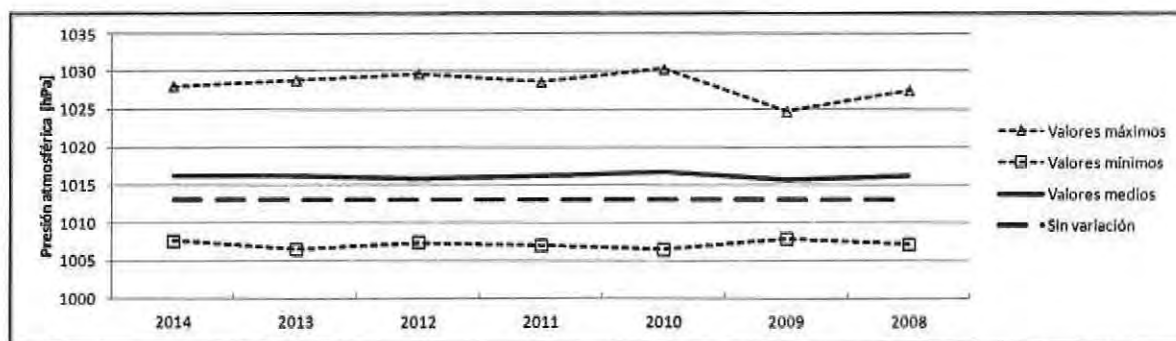


Figura 6-7 Serie de tiempo de la presión atmosférica

Fuente 21 Elaboración propia

De acuerdo a los valores extremos mostrados en la Tabla 6-4 se realiza la corrección (SHOA pub. 3009, 2014) que se visualiza en la Tabla 6-5:

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Tabla 6-5 Tabla de corrección para sumar o restar la altura de marea en función de la presión atmosférica

Presión atmosférica [hPa]	Corrección [m]
963	+0.50
968	+0.45
973	+0.40
978	+0.35
983	+0.30
988	+0.25
993	+0.20
998	+0.15
1003	+0.10
1008	+0.05
1013	0.00
1018	-0.05
1023	-0.10
1028	-0.15
1033	-0.20
1038	-0.25

Fuente 22 (SHOA pub. 3009, 2014)

En conclusión, el valor mínimo de 1006.5 [hPa] tiene aproximadamente un aumento del nivel del mar en 0.05 [m] y el valor máximo de 1030.3 [hPa] disminuye en 0.2 [m].

Para mayores detalles de las variaciones anuales, revisar el ANEXO 1.

2) Efecto del viento (wind set up)

Cuando el viento sopla de manera constante por un tiempo prolongado sobre una bahía, el nivel medio del mar comienza a aumentar, producto del apilamiento de la masa de agua generada por la fuerza del viento¹⁰.

3) Efecto set-up del oleaje

Cuando se produce la rotura del oleaje, también se produce una variación¹¹ el nivel medio del agua por encima del nivel medio de agua en reposo. El responsable de este fenómeno es el tensor de radiación¹², El desarrollo del set up del oleaje se realiza de acuerdo a los estándares japoneses (OCDI, 2002), que muestra la Figura 4-18:

¹⁰ Más información en www.cress.nl, sección Water level.

¹¹ Disminución en el punto de la rompiente o set-down y un incremento desde la rompiente hasta el pie de la playa o set-up)

¹² Se define como exceso de flujo de momentum debido a la presencia del oleaje.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

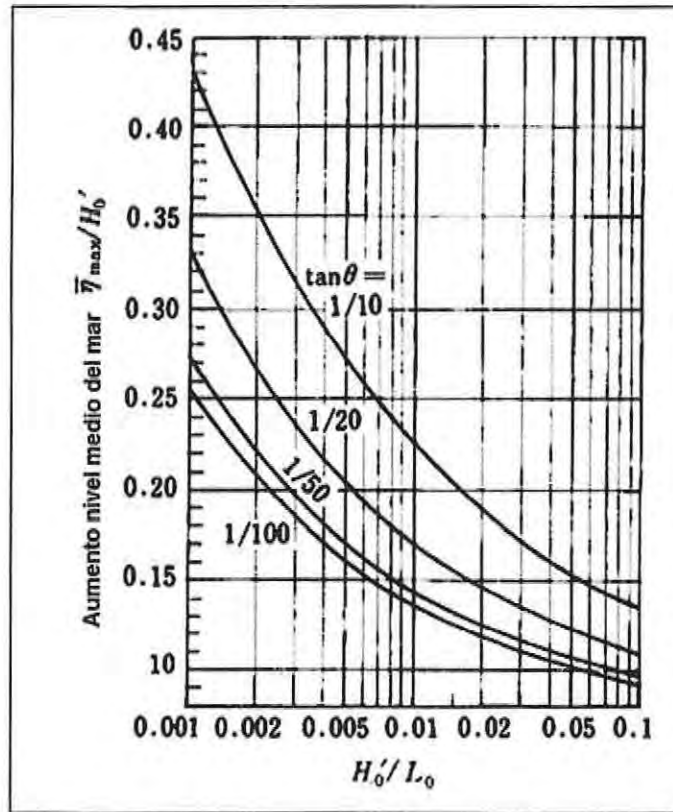


Figura 6-8 Cálculo del set up del oleaje

Fuente 23 (OCDI, 2002)

Los resultados se encuentran en la siguiente Tabla 6-6:

Tabla 6-6 Valor del wave set up

Direcciones	T_r [años]	H'_0 [m]	T_s [s]	Wave set up [m]
III	30	3.22	15	0.45
		3.01	17	0.45
		3.27	12	0.40
	5	2.92	15	0.42
		2.73	17	0.41
		3.00	12	0.38
IV	30	4.78	12	0.57
		5.32	13	0.64
		4.19	9	0.46
	5	4.49	10	0.49
		4.79	13	0.57
		3.91	9	0.43

Fuente 24 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

El cálculo del set up se encuentra en función de H'_0 (altura equivalente en aguas profundas), T_s (periodo significativo) y $\tan\theta$ (pendiente del fondo). Los valores están aproximadamente entre 0.4 y 0.65 [m].

▪ Nivel de diseño

El nivel de diseño se establece de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Z_{\text{diseño}} = Z_{\text{ast}} + Z_{\text{met}} + S_{\text{viento}} + S_{\text{oleaje}}$$

Donde:

$Z_{\text{diseño}}$: nivel de diseño.

Z_{ast} : marea astronómica.

Z_{met} : marea meteorológica debido a la variación de la presión atmosférica.

S_{viento} : marea meteorológica debido a la fricción del viento.

S_{oleaje} : set-up debido al oleaje en rompiente.

Los niveles de diseños quedarán resumidos en la Tabla 6-7:

Tabla 6-7 Niveles de diseños

Componentes	$Z_{\text{diseño1}}$ [m]	$Z_{\text{diseño2}}$ [m]	$Z_{\text{diseño3}}$ [m]
Marea astronómica	+1.47	+1.06	+0.20
Presión atmosférica	+0.10	+0.10	-0.20
Wind set up	+0.05	+0.05	0.00
Wave set up	+0.65	+0.65	0.00
Nivel de diseño	+2.3 [m] NRS	+1.9 [m] NRS	0.00 [m] NRS

Fuente 25 Elaboración propia

La diferencia entre el $Z_{\text{diseño 1}}$ y el $Z_{\text{diseño 2}}$, se refleja en el nivel de la marea astronómica, puesto que en el primero se ocupó la altura media de las pleamares máximas, mientras que en la segunda se ocupó la altura media de la pleamar. Estos dos niveles de diseños se usarán para conocer la altura de ola al pie del rompeolas y así calcular el peso de la coraza y el caudal de sobrepaso. Por otro lado, el $Z_{\text{diseño 3}}$, se usará para calcular el peso de la protección al pie del talud.

6.2.4 EROSIÓN COSTERA

Se ocupa la herramienta numérica denominado PETRA (PERfil TRANsversal) para conocer la respuesta del perfil de playa ante un evento de temporal en términos de retroceso de la línea de costa y de la forma final del perfil.

Para conocer la evolución morfológica a corto plazo, se complementa con el análisis sedimentológico facilitado por EPSA. Las características sedimentológicas en la zona de estudio, son muestras de la zona de playa y del fondo marino. De este análisis se desprende que en San Antonio, según la clasificación ASTM, posee un 99.97% de arena fina y un D_{n50} de 0.22 [mm].

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Los resultados del modelo PETRA se muestran en la siguiente Figura 6-9, donde se utiliza un temporal, con una altura de ola con periodo de retorno de 30 años y una duración de 12 [h].

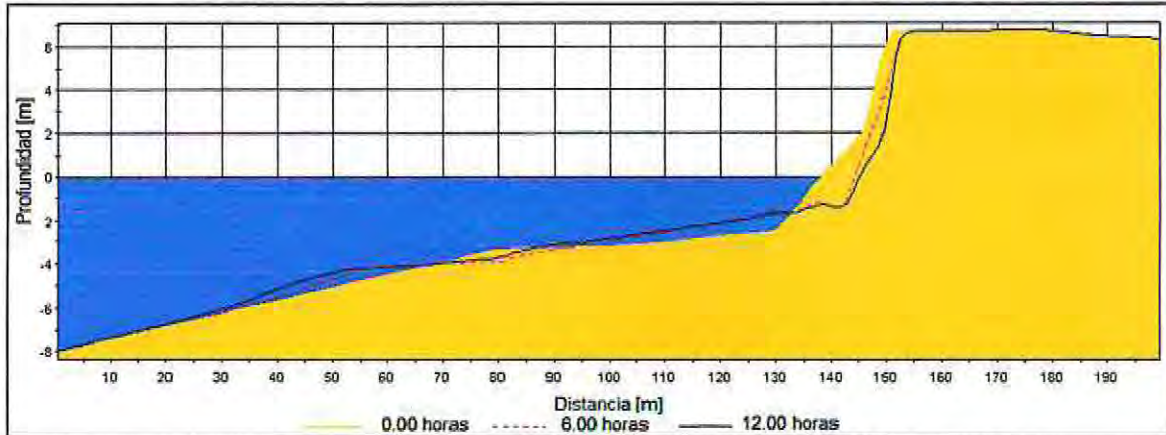


Figura 6-9 Erosión costera

Fuente 26 Elaboración propia

Como se aprecia de la Figura 6-9, la nueva configuración al finalizar el temporal (después de 12 [h]) se comporta como un perfil reflejante¹³ y que las mayores erosiones se produce a la distancia de 140 [m], lugar donde se encontrará el dique en talud.

6.2.5 MODELO DE PROPAGACIÓN DEL OLAJE

Como se describe en el capítulo 5, se contempla la construcción de un modelo de propagación desde aguas profundas a aguas intermedias de acuerdo a los proceso de transformación del oleaje, con el fin de conocer la altura de ola en el punto de la zona de proyecto.

▪ Dominio físico de estudio y clima de oleaje en aguas profundas

De acuerdo a la información obtenida del modelo global de batimetría, GEBCO y de las Cartas Náuticas del SHOA, se conocerá el dominio físico y batimétrico en la zona de estudio, presentado en la Figura 6-10.

¹³ Una pendiente semi vertical, según (UNICAN V. I., 2000)

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

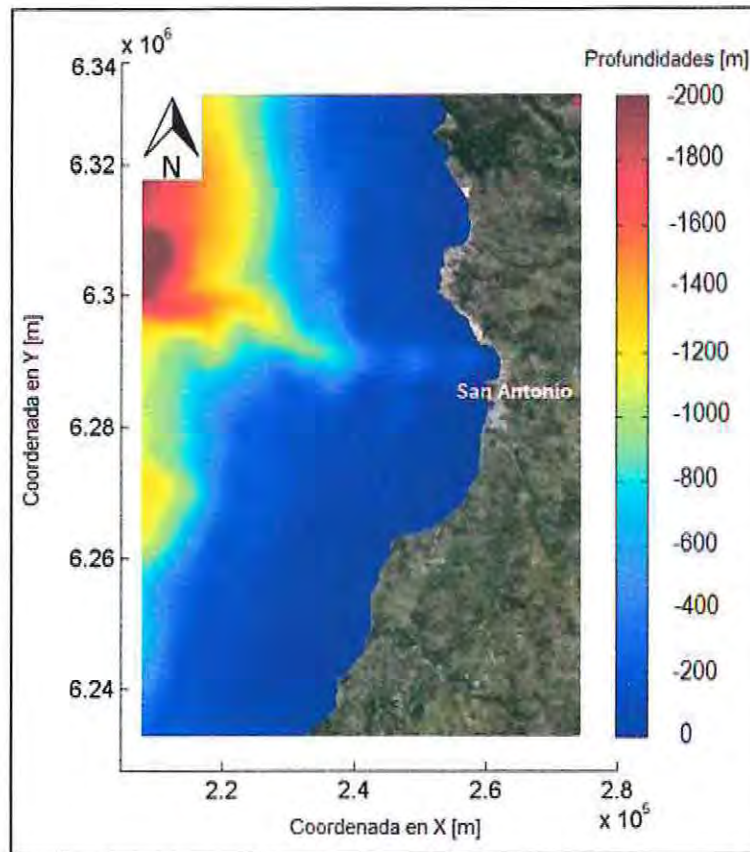


Figura 6-10 Batimetría de la zona de estudio

Fuente 27 Elaboración propia

De la Figura 6-10 se observa que las profundidades son mayores a 500 [m], dado que a esta profundidad, el oleaje posee un comportamiento de aguas profundas¹⁴. La grilla batimétrica que se utiliza para realizar la propagación es de característica rectangular, especificada en la Tabla 6-8:

¹⁴ Según la teoría lineal del oleaje (TLO) para que está posea un comportamiento en aguas profundas, debe cumplir con la relación de $d/L_o > 0.5$, siendo d la profundidad en el océano y L_o la longitud de la ola en aguas profundas. Esta longitud se aproxima como $L_o \approx \frac{gT^2}{2\pi} \approx 1.56 \cdot T^2$. Sabiendo que el periodo máximo ($T_{\text{máx}}$) es cercano a 24 [s] en Chile, la condición de profundidad quedará como $d > 449$ [m].

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Tabla 6-8 Grilla batimétrica de propagación

Malla	Origen malla [UTM]		Espaciamiento [m]		Número de grilla	
	x	y	x	y	x	y
Gruesa	205,000	6,228,300	500	500	130	200
Intermedia	240,000	6,263,300	100	100	190	300
Fina	251,000	6,276,800	25	25	280	320

Fuente 28 Elaboración propia

Donde la representación espacial de las grillas se visualizan en la Figura 6-11. Mostrando la grilla gruesa de color rojo, la amarilla a la intermedia y la grilla fina de color verde.

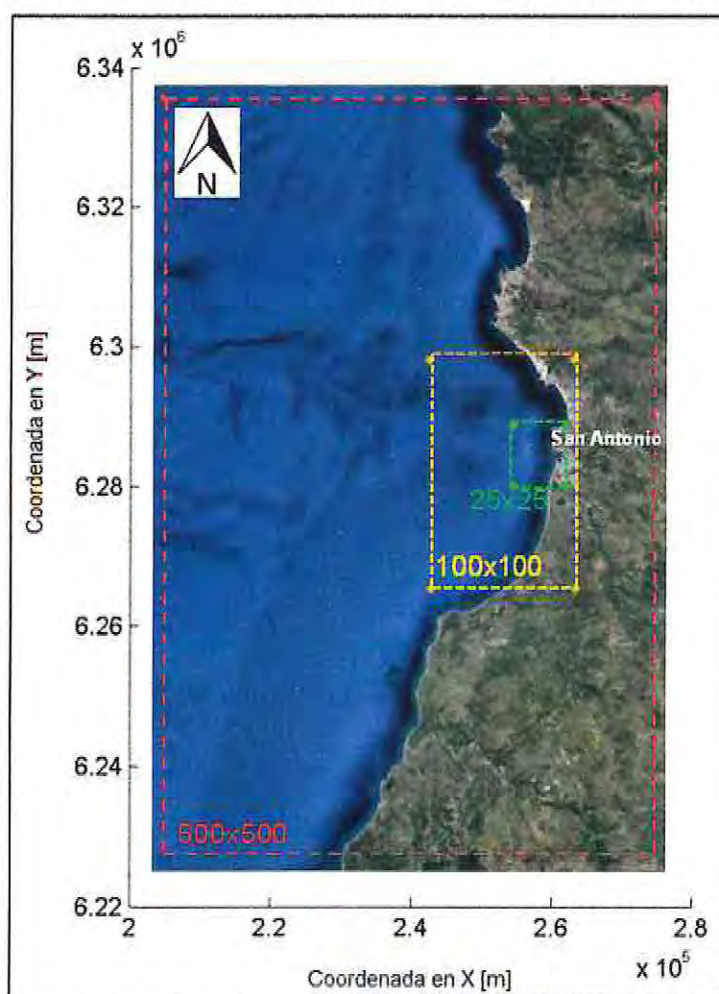


Figura 6-11 Esquema de grilla de propagación

Fuente 29 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

El estudio de clima de oleaje en aguas profundas fue desarrollado con datos obtenidos del modelo hindcasting WAM que es forzado con valores del re análisis de ERA – Interim desarrollado por el Centro Europeo para el pronóstico del tiempo en el mediano plazo (ECMWF por su siglas en inglés). El nodo de extracción se localizó en las coordenadas 637,710.55 [m] y 6,181,381.59 [m] (zona horaria = 18 y datum = WGS84) con una extensión de 35 años, comenzando el 1 de Enero de 1979 y finalizando el 31 de Mayo del 2014. Posee un total de 51,741 datos, separados por estados de mar de cada 6 [h]. La información que se encuentra en los parámetros de resumen son: altura significativa (H_s), período medio del oleaje (T_m) y dirección media de la energía del oleaje respecto al norte geográfico, con sistema de coordenadas meteorológicas. El clima marítimo en aguas profundas, es caracterizado en la siguiente Figura:

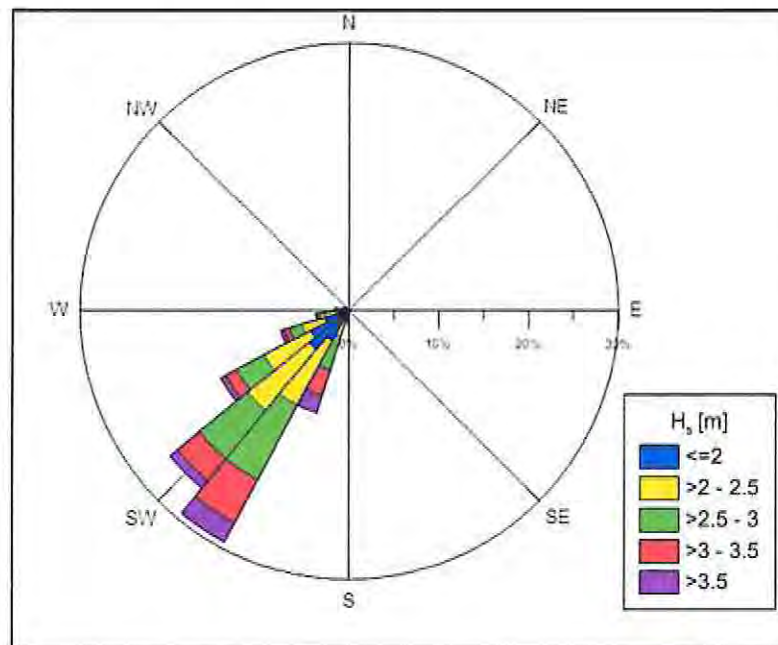


Figura 6-12 Rosa de oleaje en aguas profundas

Fuente 30 Elaboración propia

Se aprecia que el oleaje reinante proviene de la dirección del III cuadrante y las alturas significativas (H_s) más recurrentes se encuentran dentro del rango de 2 a 3 [m]. Como complemento, se utiliza la Figura 6-14 y en ella se observa que existe un bajo porcentaje de oleaje proveniente de la dirección del IV.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

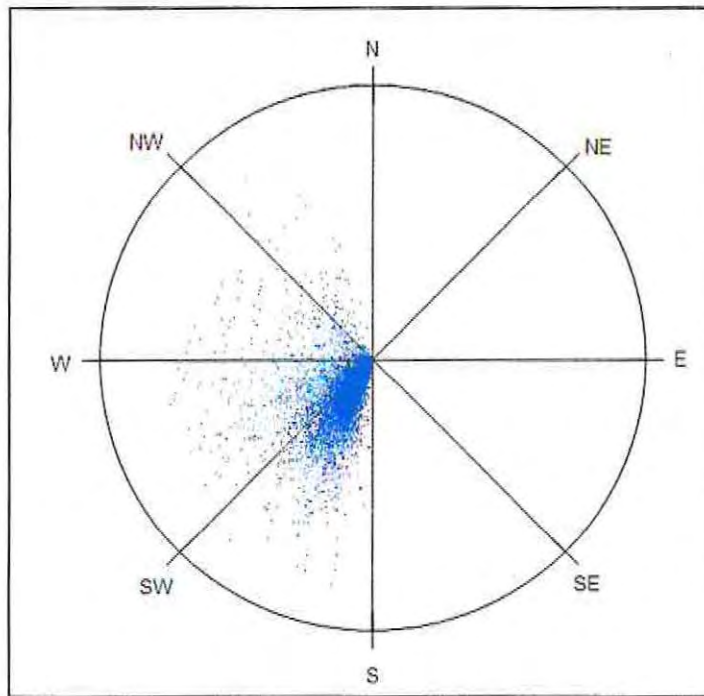


Figura 6-13 Rosa de dispersión de oleaje en aguas profundas

Fuente 31 Elaboración propia

En la Figura 6-14, se aprecia la distancia aproximada de los datos de aguas profundas hasta la zona de proyecto.



Figura 6-14 Ubicación del nodo en aguas profundas

Fuente 32 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Los datos de ERA en aguas profundas que corresponden al nodo de San Antonio, se encuentra descrito en la Tabla 6-9:

Tabla 6-9 Ubicación geográfica del nodo de San Antonio

Nodo San Antonio					
Latitud	Longitud	Coordenadas		Zona horaria	Datum
		Este	Norte		
34.5	73.5	637,710.55	6,181,381.59	18	WGS84

Fuente 33 Elaboración propia

▪ Clima de oleaje medido in situ

Con el fin de validar los resultados obtenidos de la propagación del modelo Delft 3D-WAVE, se necesitó una medición in situ de oleaje que fue facilitada por la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA), mediante un instrumento tipo ADCP. La información muestra el periodo de mediciones desde el 18 de Octubre al 18 de Noviembre del 2011. Se muestran estados de mar cada 3 [h] y presenta altura significativa (H_s), periodo medio (T_m) y dirección media (MWD¹⁵). En Figura 6-15, se observa la rosa de oleaje y en la Figura 6-16, se encuentra la ubicación del ADCP, mientras que en la Tabla 6-10, se tiene la ubicación geográfica del instrumento.

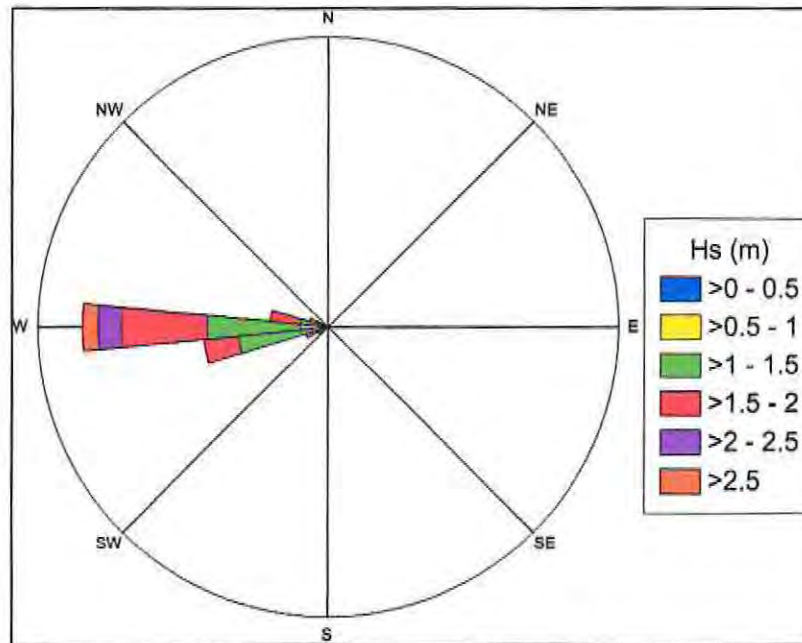


Figura 6-15 Rosa de oleaje ADCP

Fuente 34 Elaboración propia

¹⁵ Mean Wave Direction

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

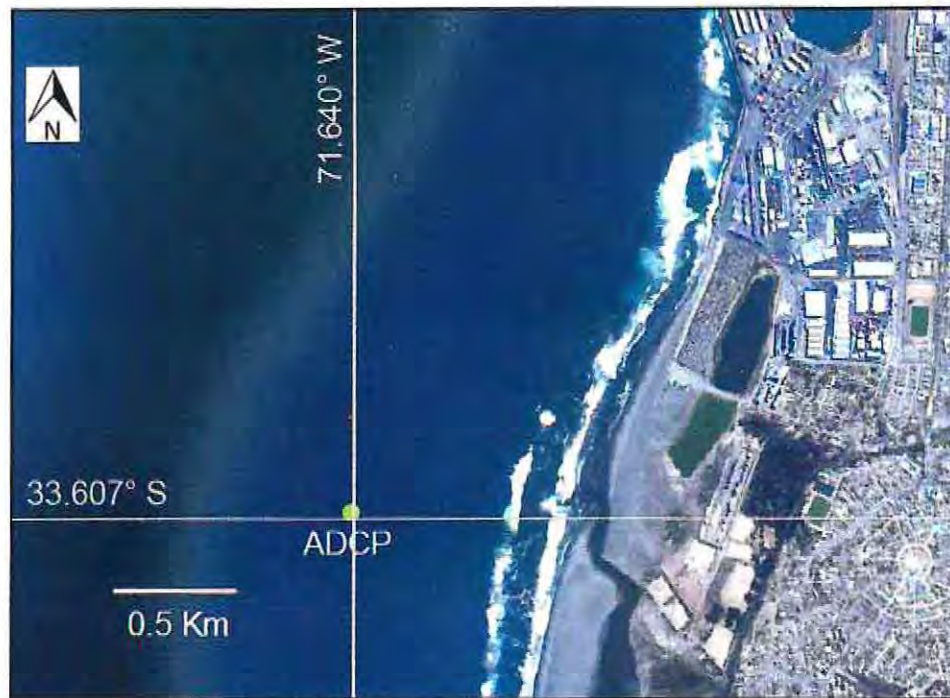


Figura 6-16 Ubicación y rosa de oleaje del ADCP

Fuente 35 Elaboración propia

Tabla 6-10 Ubicación geográfica del instrumento ADCP

ADCP					
Latitud	Longitud	Coordenadas		Zona horaria	Datum
		Este	Norte		
33.607	71.64	255,051.00	6,278,293.00	19	WGS84

Fuente 36 Elaboración propia

De la rosa de oleaje, Figura 6-15, se observa que la dirección reinante proviene de la dirección Oeste (W) y que las alturas de olas de mayor recurrencia se encuentran entre los intervalos 1 a 2 [m].

▪ **Calibración y validación del modelo**

Con la grilla de cálculo y la batimetría definida, se efectuaron diferentes casos de modelación con DELFT3D-WAVE. El modelo simuló en el modo estacionario. Los espectros de entrada se definieron con los parámetros de H_s , T_m y Dir_m , considerando un espectro JONSWAP con parámetro gama de 3.3. El espectro se discretizó en 36 componentes direccionales y en 24 componentes de frecuencias. Los casos a propagar no consideran la transferencia de energía debido al viento (S_{in}), la interacción no lineal, trídicas (S_{nl}) y la difracción. Para los términos disipativos se consideran los modelos de: Komen et al. 1984 para el descrestamiento ($S_{ds,w}$) y la rotura de oleaje debido a la profundidad ($S_{ds,br}$) se considera al modelo de Battjes & Janssen 1978 (las ecuaciones de los términos mencionados se encuentran en el ANEXO 2). Se usa una función de distribución direccional del tipo $\cos^m(\theta -$

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

θ_{mean}) con m considerado por defecto. En la Tabla 6-11 y Tabla 6-12 se muestran los casos A y B, donde el caso A corresponde a un nivel sin marea y el caso B con un nivel medio de marea. Se hizo variar sólo el parámetro de fricción de fondo ($S_{ds,b}$).

Tabla 6-11 Casos A

Casos	Nivel de marea [m]	Sds.b
A.1	0	JONSWAP C _{fondo} =0.067
A.2	0	JONSWAP C _{fondo} =0.038
A.3	0	Madsen et al. C _{fondo} =0.050
A.4	0	Collins C _{fondo} =0.015

Fuente 37 Elaboración propia

Tabla 6-12 Casos B

Casos	Nivel de marea [m]	Sds.b
B.1	0.9	JONSWAP C _{fondo} =0.067
B.2	0.9	JONSWAP C _{fondo} =0.038
B.3	0.9	Madsen et al. C _{fondo} =0.050
B.4	0.9	Collins C _{fondo} =0.015

Fuente 38 Elaboración propia

Los casos simulados en Delft3D-WAVE fueron representados a través de figuras de correlaciones, series de tiempo y estimadores estadísticos. Los resultados de la simulación se observan en el ANEXO 3.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

A continuación se representarán los valores obtenidos del caso B.2, por tener resultados con mayor precisión a los valores del ADCP.

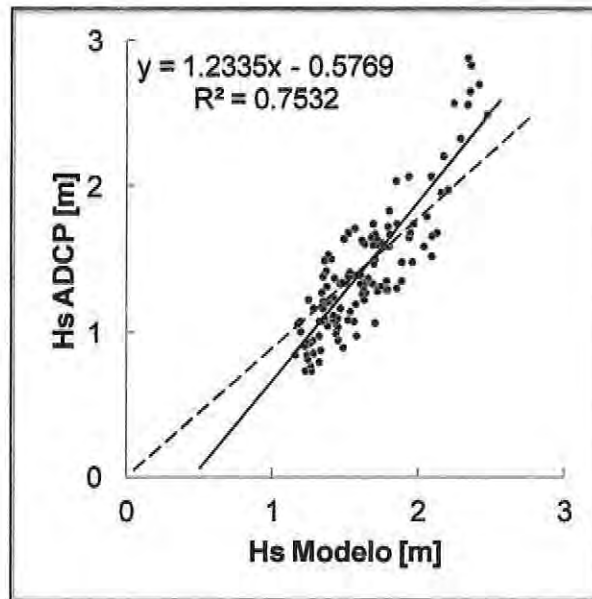


Figura 6-17 Correlación de H_s

Fuente 39 Elaboración propia

En la Figura 6-17, se aprecia una dispersión entre los datos de H_s observados (ADCP) respecto de los simulados con Delft3D-WAVE, cuyo coeficiente de determinación (R^2) es de 0.75 (ó 75%) y demuestra un alto grado de relación lineal de ambas variables. La tendencia se ayuda por la representación gráfica a través del método de los mínimos cuadrados.

En la Figura 6-18, se muestra la serie de tiempo del ADCP y del Caso B.2 simulado.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

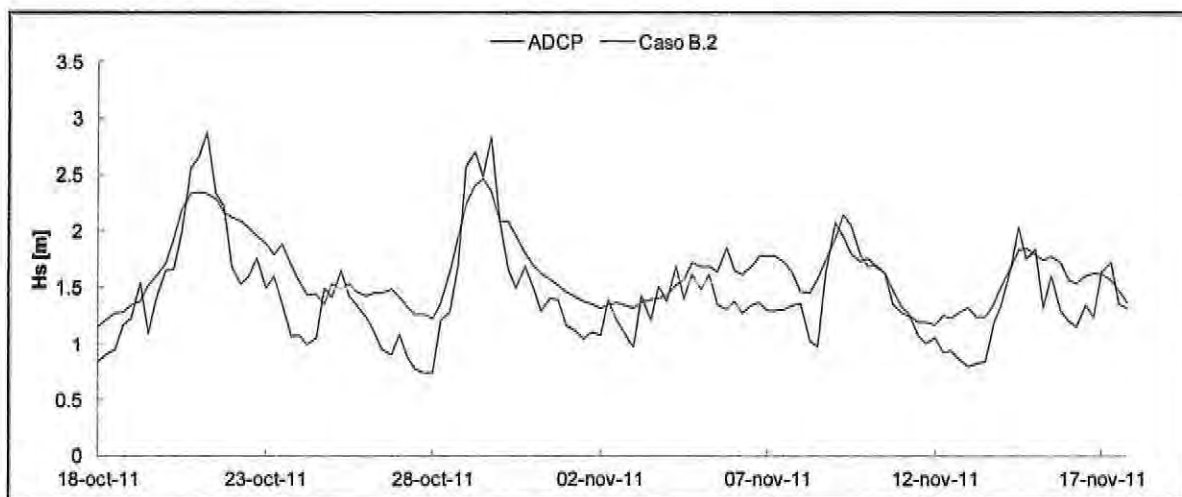


Figura 6-18 Serie de tiempo de H_s

Fuente 40 Elaboración propia

La caracterización del modelo en la serie de tiempo (Figura 6-18), tiende a sobreestimar los valores de altura de olas medias, mientras que en los valores mayores, subestimaría el fenómeno. Aun así, este caso, es el que mejor representa los fenómenos extremos.

Finalmente, en la Tabla 6-13 se resumen los estimadores estadísticos de correlación, el coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación (R^2) y los coeficientes estadísticos que permiten medir la precisión de la simulación, el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y el sesgo (BIAS).

Tabla 6-13 Estimadores estadísticos para H_s

Estimadores	Caso [H_s]
	B.2
RMSE	0.30
R	0.87
BIAS	0.20
R^2	0.75

Fuente 41 Elaboración propia

Se visualiza que la diferencia promedio entre los valores pronosticados y observados es medianamente baja (RMSE = 0.30 m). Por otro lado, existe un alto grado de correlación positiva de los datos ($R = 0.86$). Finalmente, se aprecia que el BIAS tiene un valor levemente mayor a cero (0.2 m), por lo tanto, la simulación tiende a sobrestimar los valores observados.

Para los resultados simulados que representan al periodo medio, estos tienen un mayor grado de incertidumbre. En la Figura 6-19 se aprecia la dispersión de los datos simulados con los datos observados (ADCP).

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

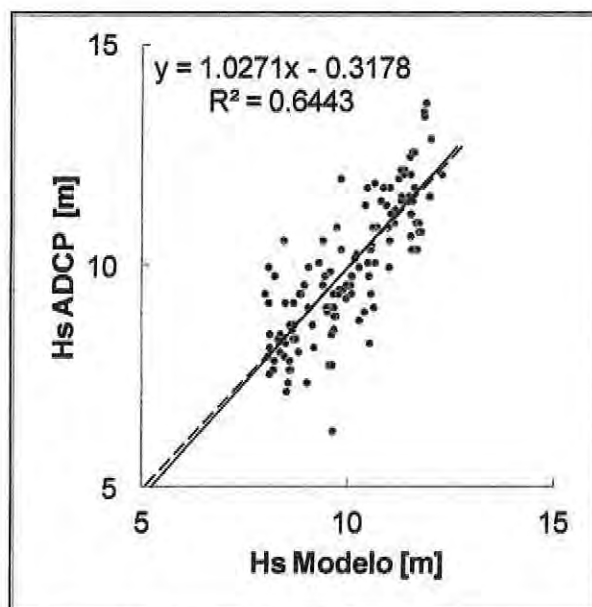


Figura 6-19 Correlación de T_m

Fuente 42 Elaboración propia

En comparación a la altura significativa, el coeficiente de determinación (R^2) de la Figura 6-19, disminuye, demostrando un grado de relación lineal moderado.

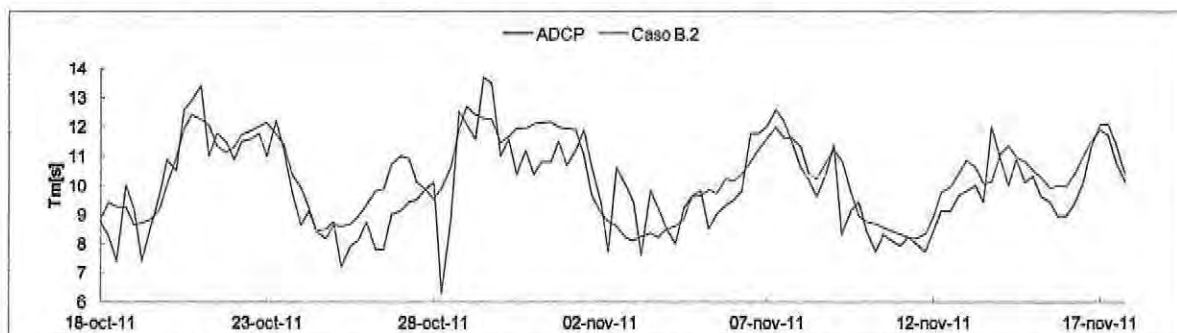


Figura 6-20 Serie de tiempo de T_m

Fuente 43 Elaboración propia

Para el caso de la serie de tiempo, la Figura 6-20, mantiene la misma tendencia que los valores observados. Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 6-14, el valor del RMSE es muy alto.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 6-14 Estimadores estadísticos para T_m

Estimadores	Caso [T_m]
	B.2
RMSE	0.98
R	0.80
BIAS	0.33
R^2	0.64

Fuente 44 Elaboración propia

En la Figura 6-21, se compara las direcciones del ADCP y los valores obtenidos del modelo.

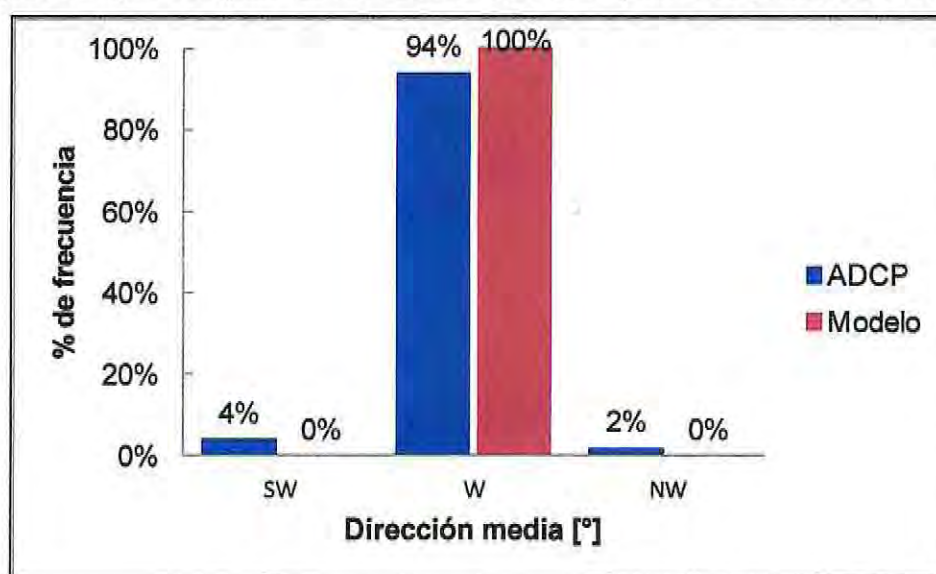


Figura 6-21 Comparación de dirección media

Fuente 45 Elaboración propia

Se observa que el modelo llega el 100% de las veces en forma perpendicular a la costa, dirección Oeste (W). Y existe un error del 6% con respecto a los valores del ADCP.

6.2.6 CLIMA EXTREMO DEL OLEAJE

En el estudio de clima extremo, se seleccionaron los datos de acuerdo al criterio sobre un umbral (Peak Over Threshold, POT). Se adopta este criterio por ser mayor al método de máximos anuales (ver ANEXO 4), por lo tanto, es considerado un método conservador. Los registros satisfacen las condiciones de independencia, con un rango mínimo de tres días entre cada tormenta, la de homogeneidad y de estacionalidad. Los 21 datos se discretizaron por direcciones principales del III y IV cuadrante, correspondiente a las direcciones NW y SW, respectivamente.

En la Tabla 6-15 y Tabla 6-16 se observan las listas de tormentas en aguas profundas de acuerdo a cada dirección.

Tabla 6-15 Orden de tormentas seleccionadas por el método POT, dirección NW

Dirección Nor-Oeste [NW]				
Orden	Fecha	Hs [m]	Tm [s]	Dirm [°]
1	27 de mayo de 2012	5.08	9.53	319.31
2	3 de mayo de 2005	4.80	9.70	315.79
3	20 de junio de 2011	4.73	9.85	303.52
4	3 de junio de 1997	4.72	9.10	318.55
5	7 de junio de 2006	4.50	9.59	305.28
6	6 de septiembre de 1997	4.44	10.48	294.38
7	28 de mayo de 1999	4.35	10.34	293.8
8	20 de junio de 1997	4.23	8.85	294.07
9	12 de junio de 1996	4.23	9.32	319.8
10	23 de agosto de 1996	4.19	8.74	321.33
11	19 de mayo de 1993	4.17	10.44	293.8
12	30 de julio de 2001	4.11	8.19	328.64
13	26 de mayo de 2002	4.07	9.81	301.61
14	2 de septiembre de 2001	4.03	11.54	207.18
15	13 de junio de 2000	3.97	8.65	300.77
16	16 de agosto de 1997	3.97	8.45	336.49
17	13 de junio de 2010	3.96	9.01	303.57
18	6 de julio de 2010	3.94	7.88	324.71
19	14 de agosto de 2009	3.93	8.76	303.28
20	5 de junio de 1992	3.93	8.88	313.31
21	23 de mayo de 2008	3.91	9.67	295.66

Fuente 46 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 6-16 Orden de tormentas seleccionadas por el método POT, dirección SW

Dirección Sur-Oeste [SW]				
Orden	Fecha	Hs [m]	Tm [s]	Dirm [°]
1	13 de agosto de 2012	5.54	14.82	218.29
2	24 de julio de 2010	5.30	14.40	233.24
3	20 de octubre de 1992	5.29	11.80	210.21
4	18 de agosto de 2010	5.25	15.43	242.89
5	3 de julio de 2013	5.16	15.31	242.67
6	5 de septiembre de 2007	5.13	14.75	233.61
7	21 de junio de 1997	5.13	13.36	242.72
8	18 de mayo de 2005	5.03	14.50	227.12
9	21 de junio de 1998	5.02	13.22	215.47
10	18 de marzo de 2004	5.01	11.79	214.78
11	22 de septiembre de 1992	4.98	11.57	205.82
12	18 de junio de 1994	4.97	15.16	236.49
13	10 de septiembre de 2001	4.86	10.44	203.18
14	10 de octubre de 2002	4.85	13.82	227.36
15	11 de mayo de 2005	4.80	14.08	229.94
16	19 de septiembre de 2004	4.80	12.08	211.25
17	10 de septiembre de 2005	4.78	10.08	204.5
18	14 de agosto de 2007	4.76	14.06	231.57
19	24 de abril de 2001	4.76	12.04	204.54
20	26 de marzo de 2011	4.76	11.68	209.75
21	8 de junio de 2011	4.75	14.76	235.31

Fuente 47 Elaboración propia

Las distribuciones que se ocuparon para realizar el estudio fueron: Weibull y Gumbel, con probabilidad de ploteo de Goda, y Gringorten, respectivamente. Se ocupa el método de ajuste asociado a mínimos cuadrados.

Del análisis estadístico que se realizó se obtuvo que la función de distribución de probabilidad de no excedencia que mejor se ajusta es la correspondiente a distribución Weibull con parámetro de forma de $K= 1.4$ con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98 para la dirección NW y $R^2 = 0.97$ para la dirección SW.

En la Figura 6-22 se muestra la distribución del análisis de probabilidad para la dirección NW y la Tabla 6-17 entrega las estimaciones de la altura de ola significativa (H_s) para distintos periodos de retorno (T_r) en años, mostrando además las altura máxima ($H_{m\acute{a}x}$) y altura mínima ($H_{m\acute{i}n}$) de acuerdo al 95% de la banda de confianza.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

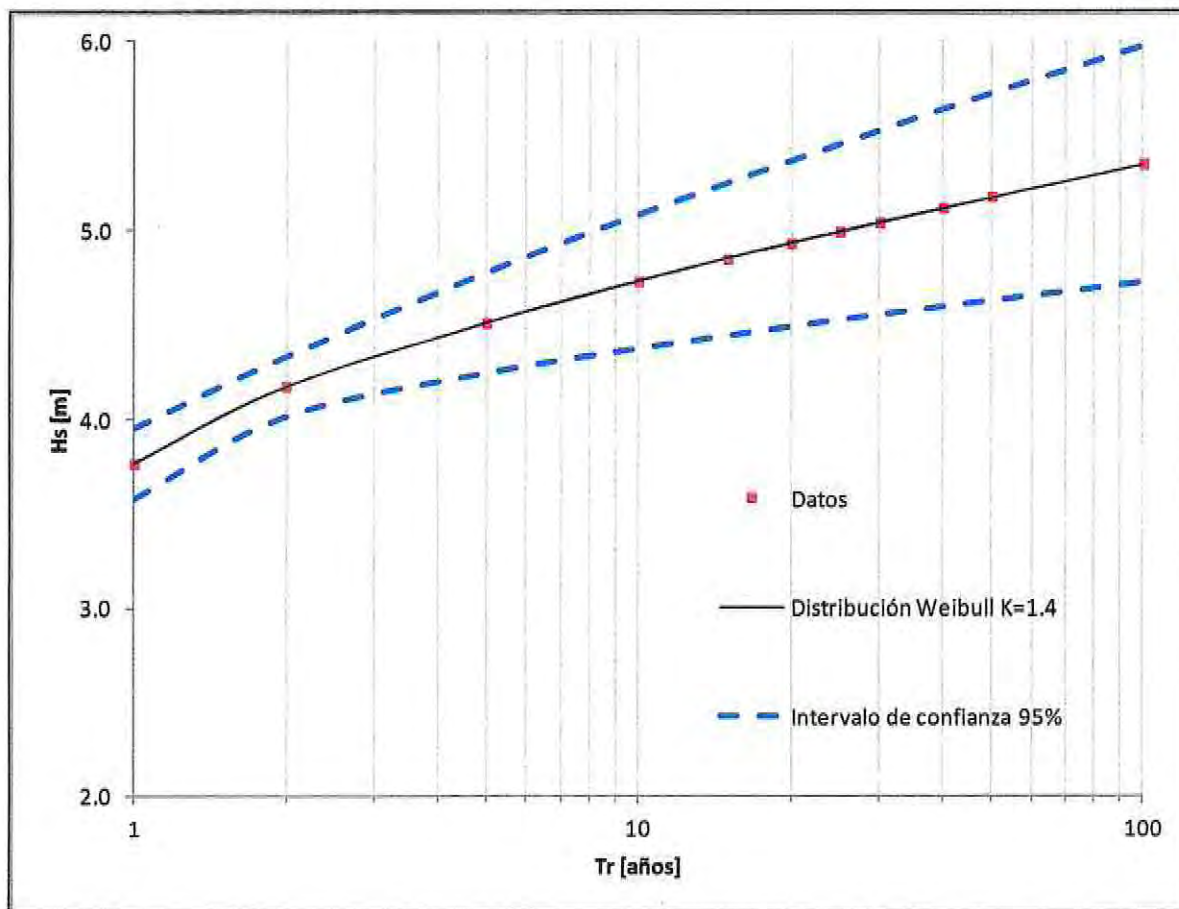


Figura 6-22 Distribución extremal de altura de ola significativa [Hs], dirección NW

Fuente 48 Elaboración propia

Tabla 6-17 Oleaje extremo NW para distintos periodos de retorno (Tr)

T_r [años]	H_s [m]	$H_{m\acute{a}x}$ [m]	$H_{m\acute{i}n}$ [m]
5	4.51	4.8	4.2
10	4.73	5.1	4.4
25	4.99	5.5	4.5
50	5.17	5.7	4.6
100	5.35	6.0	4.7

Fuente 49 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Para la dirección SW que se muestra en la Figura 6-23, se describe la distribución del análisis de probabilidad y en la Tabla 6-18 entrega las estimaciones de la altura de ola significativa (H_s) para distintos periodos de retorno (T_r) en años, mostrando además las altura máxima ($H_{m\acute{a}x}$) y altura mínima ($H_{m n}$) de acuerdo al 95% de la banda de confianza.

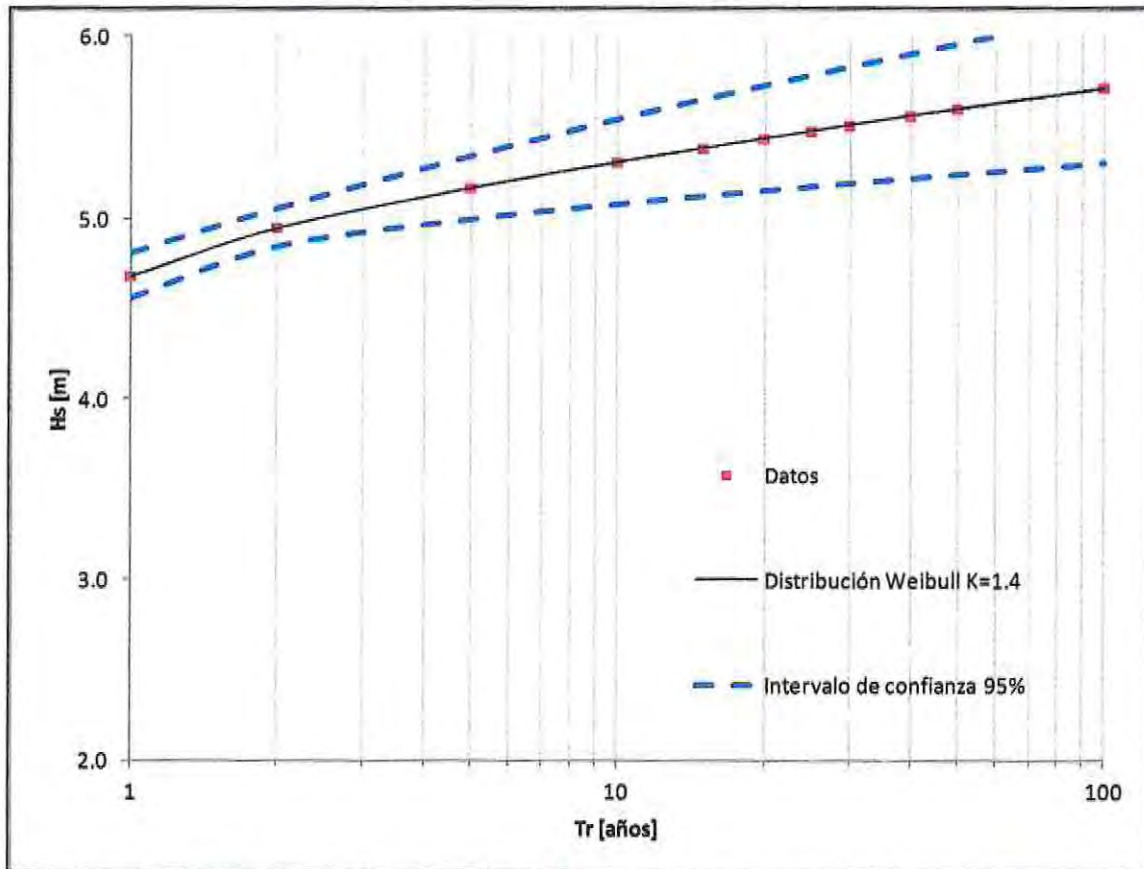


Figura 6-23 Distribución extrema de altura de ola significativa [H_s], dirección SW

Fuente 50 Elaboración propia

Tabla 6-18 Oleaje extremo SW para distintos periodos de retorno (T_r)

T_r (años)	H_s (m)	$H_{m\acute{a}x}$ (m)	$H_{mín}$ (m)
5	5.17	5.3	5.0
10	5.31	5.5	5.1
25	5.48	5.8	5.2
50	5.60	6.0	5.2
100	5.71	6.1	5.3

Fuente 51 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Las alturas (H_s) fueron asociadas a tres tipos de periodos para caracterizar el fenómeno del oleaje en aguas profundas. De acuerdo a la Tabla 6-17 y Tabla 6-18 se escogió el promedio de los periodos ($\overline{T_m}$ [s]), el periodo máximo ($T_{m\acute{a}x}$) y el periodo mínimo ($T_{m\acute{i}n}$). Para la direcci3n, se escogió solo el promedio de las direcciones de cada cuadrante. Lo antes mencionado se resume en la Tabla 6-19:

Tabla 6-19 Parámetros característicos oleaje según el cuadrante

Dirección	$T_{m\acute{i}n}$ [s]	T_m [s]	$T_{m\acute{a}x}$ [s]	Dir_m [°]
III	10	13	15	223
IV	8	9	12	305

Fuente 52 Elaboración propia

7 DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA

El diseño de defensa costera se realiza considerando los estudios de condiciones naturales visto anteriormente en el capítulo 6.2. En este apartado se tiene como objetivo conocer la estabilidad de los elementos que dispondrá la protección costera, el diseño del caudal de sobrepaso y definir la configuración en planta y la sección transversal de la obra.

7.1 ESTADOS LÍMITES

Los estados límites sirven para presentarse en la vida útil del proyecto y así determinar el dimensionamiento óptimo de la estructura. Se definen de acuerdo a las recomendaciones de obras marítimas (ROM) que se encuentra detallada en "Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias" (ROM 0.0, 2001) .

Se identifican tres conjuntos de estados límites relacionados con la seguridad estructural, el servicio y la explotación. Los dos primeros se denominan estados límites últimos (ELU) y de servicio (ELS) que definen los modos de falla en la estructura y la forma de la estructura. Los estados que describen el uso y la explotación se denominan estados límites operativos (ELO) que están relacionados con la explotación de la obra, en los cuales no hay fallo estructural, es decir, una vez que cesa la causa de la parada, la estructura recupera totalmente los requisitos de explotación.

Para efecto del diseño de la defensa costera, sólo se ocuparán los estados límites últimos (ELU) y los estados límites operativos (ELO). No se ocupará el estado límite de servicio (ELS) porque este fallo no suele alcanzarse como resultado de un evento extremo, si no por el deterioro progresivo de su capacidad resistente.

Se define estados límites últimos (ELU) como aquellos estados que producen la ruina, por rotura o colapso estructural de la obra o de una parte de ella.

El estado límite de operatividad (ELO) se define como todos aquellos en los que, se reduce o se suspende temporalmente la explotación por causas externas a la obra o a sus instalaciones, sin que haya daño estructural en ellas o en alguno de sus elementos. Un esquema de estos últimos dos estados límites se pueden ver en el ANEXO 5.

7.1.1 BASES DE DISEÑO

▪ Vida útil (L_f)

De acuerdo al ANEXO 6, se considera una obra de carácter industrial específico, donde en caso de rotura, exista pequeño riesgo de pérdidas humanas o daños medioambientales. Por lo tanto, se considera un Nivel 1.

Con estas características se tiene una vida útil de $L_f = 15$ [años].

▪ Riesgo (R)

De acuerdo al ANEXO 7, se considera que el riesgo de pérdidas humanas en caso de rotura es reducida y que en caso de inutilización de la obra, la repercusión económica se encuentre dentro del intervalo medio - bajo.

Los diques en talud, permiten el riesgo de iniciación de averías, por lo tanto, son una obra del tipo flexible con un valor de riesgo (R) = 0.4 (ó 40%).

▪ Periodo de retorno (T_r)

El período de retorno se encuentra en proporción a la vida útil y al riesgo de la obra según la Ecuación 26:

$$R = 1 - \left[1 - \frac{1}{T_r} \right]^{L_f} \approx 1 - e^{-\left(\frac{L_f}{T_r}\right)} \rightarrow T_r = -\frac{L_f}{\ln \cdot (1 - R)} \quad \text{Ecuación 26}$$

Para calcular el estado límite último (ELU) se evaluará una vida útil de $L_f = 15$ años y un riesgo admisible de $R = 0.4$, cuyo resultado es un período de retorno (T_r) de 29.36 años. Para los diseños se aproximará a un periodo de retorno de 30 años.

Para conocer el estado límite operativo (ELO) se considerará un periodo de retorno de $T_r = 5$ años.

7.2 ALTURA DE OLA DE DISEÑO

7.2.1 PROPAGACIÓN DEL OLEAJE A AGUAS INTERMEDIAS

De acuerdo a lo expuesto en los capítulos anteriores, se hicieron las propagaciones con parámetros característicos (T_r , H_s , y Dir_m) de las direcciones del III y IV cuadrante. Los resultados se obtuvieron del nodo de extracción en aguas intermedias.

En la Tabla 7-1 se observan los valores en aguas profundas y los valores propagados hasta en el nodo de extracción.

Tabla 7-1 Propagación efectuada por Delft3D-WAVE

Aguas profundas					Nodo		
Direcciones	T_r [años]	H_s [m]	T_m [s]	Dir_m [°]	H_s [m]	T_m [s]	Dir_m [°]
III	30	5.50	13	222	3.17	13	258.78
			15		3.08	15	
			10		3.05	10	
	5	5.00	13		2.88	13	
			15		2.80	15	
			10		2.80	10	
IV	30	5.02	9	304	4.46	10	239.02
			12		5.05	11	
			8		3.83	8	
	5	4.51	9		4.10	9	
			12		4.54	11	
			8		3.57	8	

Fuente 53 Elaboración propia

En la Figura 7-1 y Figura 7-2, se muestran la altura de ola mayores de acuerdo a la dirección de cada cuadrante visto en la Tabla 7-1.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

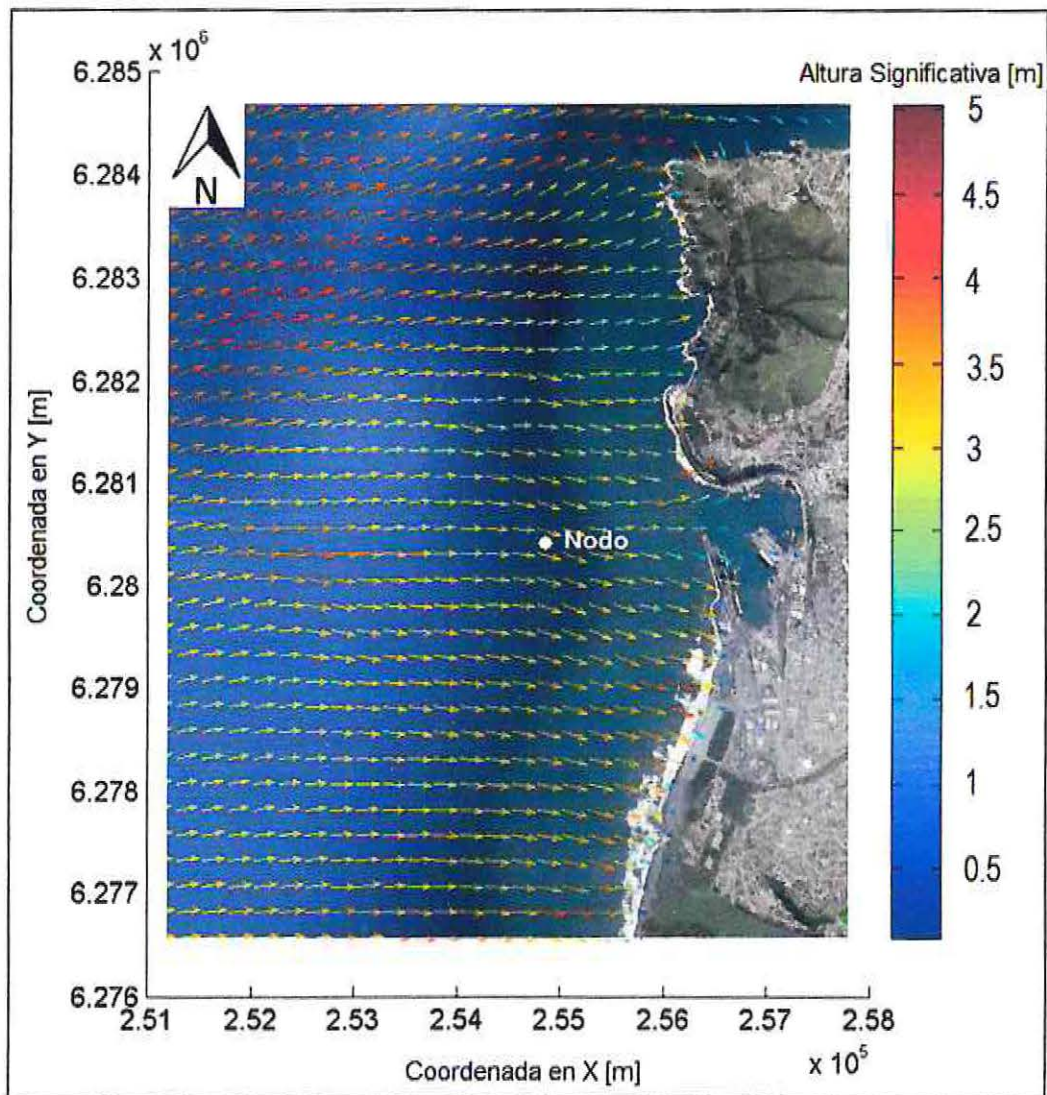


Figura 7-1 Propagación Delft3D-WAVE, desde la dirección del III cuadrante con $H_s=5.5$ m y $T_m=13$ s

Fuente 54 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

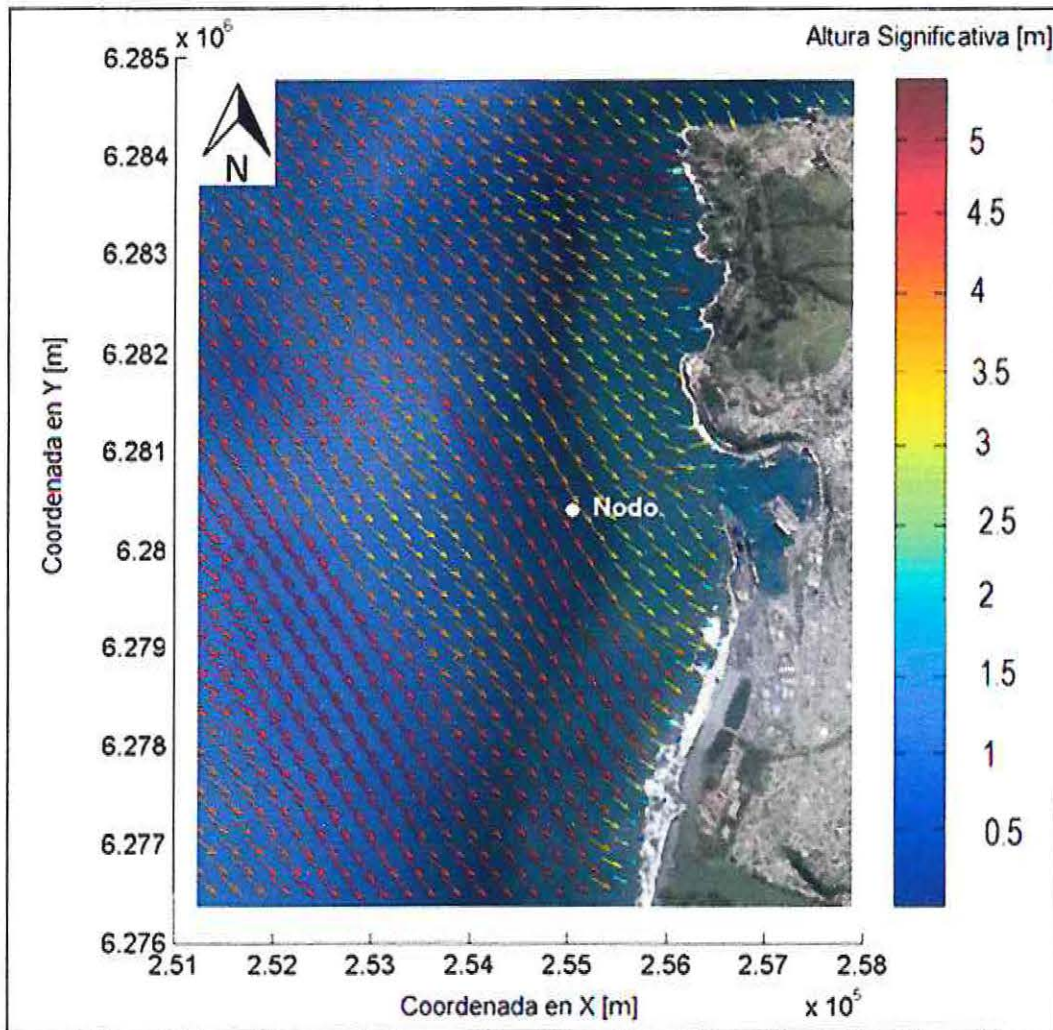


Figura 7-2 Propagación Delft3D-WAVE, desde la dirección del IV cuadrante con $H_s=5.02$ m y $T_m=12$ s

Fuente 55 Elaboración propia

En la Figura 7-1, la propagación efectuada desde la dirección del III cuadrante llega con valores cercanos a los 3 [m] a la zona de proyecto. Mientras que en la Figura 7-2, los valores son mayores, por lo tanto, una tormenta de la dirección del IV cuadrante, es la condición desfavorable para el realizar el diseño.

7.2.2 OLEAJE DE DISEÑO AL PIE DE LA OBRA

Para propagar el oleaje desde aguas intermedias hasta la zona de rompiente, el modelo Delft3D-WAVE, quedará fuera de sus alcances, por lo tanto, se utiliza el método de Goda (1985), expresada en la Ecuación 4. Para esta propagación, se considera dos niveles de diseños, cuyos valores de altura de oleaje al pie del talud se resumen en la Tabla 7-2:

Tabla 7-2 Altura de ola al pie del talud, propagación Goda (1985)

Condición en Aguas Profundas		Nodo		Altura de ola al pie del talud	
Direcciones	T_r [años]	H_s [m]	T_s [s]	$Z_{\text{diseño1}}$ [m]	$Z_{\text{diseño2}}$ [m]
III	30	3.17	15	2.85	2.6
		3.08	17	2.88	2.63
		3.05	12	2.75	2.5
	5	2.88	15	2.81	2.56
		2.80	17	2.84	2.59
		2.80	12	2.72	2.47
IV	30	4.46	12	2.9	2.65
		5.05	13	2.99	2.74
		3.83	9	2.72	2.47
	5	4.10	12	2.78	2.53
		4.54	13	2.94	2.69
		3.57	9	2.7	2.44

Fuente 56 Elaboración propia

De la propagación efectuada, se aprecia que mientras mayor sea la profundidad ($Z_{\text{diseño 1}}$) menor es la disipación de energía, entonces, los valores de la altura de ola son mayores para ese nivel. Por otro lado, este método es sensible al valor del periodo significativo (T_s), puesto que mientras mayor sea este, la ola tiende a aumentar de tamaño. Los valores que predominarán en el diseño, serán los efectuados desde las direcciones del cuarto cuadrante. En general, los valores de la altura de ola al pie del talud, no se diferencian demasiado en sus valores, esta característica debe coincidir a la poca profundidad que se encuentra el pie del talud del rompeolas.

7.3 DISEÑO ESTRUCTURAL

En el diseño estructural de la protección costera, se definen los pesos y las dimensiones de los elementos a ocupar. Para los cálculos se considera un criterio conservador, representando los fenómenos oceanográficos de forma desfavorable, con el fin de disminuir la incertidumbre de dichos fenómenos.

7.3.1 ESTIMACIÓN PESO DE CORAZA

Para estimar el peso del manto exterior o coraza del rompeola, se utilizan las formulas de Hudson (1974) y la de Van der Meer (1988). Los parámetros básicos para el cálculo de los elementos son:

- Peso específico del agua de mar: 1025 [kgf/m³]
- Peso específico de la roca: 2700 [Kgf/m³]
- Peso específico del hormigón 2400 [kgf/m³]

Por estar en el borde costero, se considera el desarrollo solo para una configuración del tipo tronco. El nivel de diseño es el correspondiente a $Z_{diseño}$ 1.

▪ Fórmula de Hudson (1974)

El cálculo del peso de la coraza está de acuerdo a la Ecuación 9 y se utiliza la altura de ola mayor ($T_r = 2.99 \approx 3$ m).

Se realiza un análisis de sensibilidad, haciendo variar el tipo de canto (roca, dolos y tetrápodos), naturaleza del oleaje (roto o no roto) y el talud del rompeola (1:2 y 1:1.5). Se conserva un número de capa igual a dos, la forma de colocación de tipo aleatorio (random) y el porcentaje de avería (calculado siempre a iniciación de avería). Los resultados se resumen en la siguiente Tabla 7-3:

Tabla 7-3 Peso de la coraza con elementos de rocas

Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]	Peso _{máx} [tonf]	Peso _{mín} [tonf]
Rugosa angular	rota	1.50	2.0	5.5	6.9	4.1
		2.00		4.1	5.2	3.1
	no rota	1.50	4.0	2.8	3.5	2.1
		2.00		2.1	2.6	1.6

Fuente 57 Elaboración propia

Se considera solo roca del tipo angular, puesto que la roca lisa redondeada es difícil de encontrar en las canteras.

De la Tabla 7-3 los pesos de la coraza de rocas tienen una graduación de un 25%, señalando un valor máximo y un valor mínimo. El caso favorable son las rocas colocadas con una pendiente con talud de cot $\alpha = 1.5$ y que la naturaleza de la ola sobre la estructura sea rota.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 7-4 Peso de la coraza con elemento de Dolos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]
Dolos	rota	2.00	8.00	1.7
	no rota		16.00	0.9

Fuente 58 Elaboración propia

Tabla 7-5 Peso de la coraza con elementos de Tetrápodos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]
Tetrápodos	rota	1.50	7.00	2.5
		2.00		1.9
	no rota	1.50	8.00	2.2
		2.00		1.7

Fuente 59 Elaboración propia

De la Tabla 7-4 y Tabla 7-5 se observa que al colocar elementos de hormigón, estos requieren menos peso para mantener la estabilidad de la coraza del dique en talud. La ola en rompiente y un talud de cot $\alpha = 1.50$ hará el caso desfavorable.

▪ **Fórmula de Van der Meer (1988)**

A diferencia de la fórmula anterior, la expresión de Van der Meer (1988), expuesta en la Ecuación 11 y Ecuación 12, considera una permeabilidad teórica, condiciones del clima marítimo representados por la altura de ola, el periodo y la duración del temporal, forma de rotura de la ola (voluta o plunging y oscilación o surging) y el número de Iribarren.

Para el caso de profundidades reducidas, la altura de ola considera el concepto de $H_{2\%}$. De acuerdo a una distribución del tipo Battjes & Groenendijk (2000), el valor de $H_{2\%}$ se encontrará entre 1.10 y 1.40 de la altura de ola significativa.

El rompeola tiene una estructura compuesta por una coraza, un filtro y núcleo, considerando un coeficiente de permeabilidad (P) igual a 0.4. El valor de la avería adimensional (S) para la escollera, será de 2.00 para ambos taludes (1/1.50 y 1/2.00), por estar en condición de inicio de avería. Para los elementos de tetrápodos el valor de N_{od} será de 0.00, en condición de inicio de daño.

En la Tabla 7-6 y Tabla 7-7 se resumen los valores obtenidos para los distintos casos, según la Ecuación 11 y Ecuación 12:

Tabla 7-6 Peso de la coraza con elementos de rocas

$H_{2\%}$	T_m [s]	Horas	N	S	P	cot α	Peso [tonf]	Peso _{Máx} [tonf]	Peso _{Min} [tonf]
4.19	11	21	5815	2	0.4	2.00	3.6	4.5	2.7
						1.50	5.5	6.9	4.2
		27	7475			2.00	3.9	4.8	2.9
						1.50	6.0	7.5	4.5

Fuente 60 Elaboración propia

Para los cálculos se consideró el $H_{2\%} = 1.4 \cdot H_s$ (3 m), asociado a un periodo medio (T_m) de 11 [s]. Se escogió 21 horas, puesto que es el rango desde que comienza el temporal hasta que

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

alcanza el valor máximo de altura de ola y se asignará 27 [h], para conocer la influencia al aumentar las olas en un temporal¹⁶. Mientras que para el peso de la coraza con elementos de tetrápodos, se ocupará la Ecuación 13, con resultados descritos en la siguiente Tabla 7-7:

Tabla 7-7 Peso de la coraza con elementos de Tetrápodos

H _{2%}	Tipo de elemento	N _{od}	Peso [tonf]
4.20	Tetrápodos	0.00	4.0

Fuente 61 Elaboración propia

Para obtener el peso de los tetrápodos, se realizó en base a una pendiente del talud de 1:1.5. Al considerar el número de unidades desplazadas (N_{od}) como cero, la relación $N_{od}^{0.50}/N^{0.25} = 0$, por lo tanto, para este caso, se omitirá el valor del número de las olas en una tormenta (N).

7.3.2 ESTIMACIÓN PESO DE FILTRO Y NÚCLEO

Con el fin de evitar el lavado de los materiales secundarios y la deformación del talud, que puede llegar a conducir el colapso de la sección, se realizan los cálculos en base a la permeabilidad teórica del macizo granular (P). Un dique convencional (manto, filtro y núcleo) presenta un valor teórico de $P = 0.4$.

Para conocer el valor del filtro, se ocupa la Ecuación 16 y sus resultados se encuentran en la Tabla 7-8 con una graduación del 30%, según el SPM (USACE, Shore Protection Manual, 1984).

Tabla 7-8 Peso del filtro de protección para un manto de escollera

Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso _{Manto} [tonf]	Peso _{Filtro} [tonf]	Peso _{Máx} [tonf]	Peso _{Mín} [tonf]
Rugosa angular	rota	1.50	5.5	0.7	0.9	0.5
		2.00	4.1	0.5	0.7	0.4
	no rota	1.50	2.8	0.3	0.4	0.2
		2.00	2.1	0.3	0.3	0.2

Fuente 62 Elaboración propia

Para conocer el valor del peso del núcleo, se ocupa la Ecuación 17, cuyo resultados se encuentran en la Tabla 7-9 con una graduación del 70% según el SPM (USACE, Shore Protection Manual, 1984).

Tabla 7-9 Peso del núcleo para un manto de escollera

Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso _{Filtro} [tonf]	Peso _{Núcleo} [kgf]	Peso _{Máx} [kgf]	Peso _{Mín} [kgf]
Rugosa angular	rota	1.50	0.7	10.4	17.6	3.1
		2.00	0.5	7.8	13.2	2.3
	no rota	1.50	0.3	4.8	8.2	1.5
		2.00	0.3	3.9	6.6	1.2

Fuente 63 Elaboración propia

Para conocer el peso del filtro en base a elementos artificiales en el manto, se tienen las siguientes relaciones (British Standard, 1991):

¹⁶ El valor del número de ola de un temporal (N) se obtendrá de la página www.windwuru.cz

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 7-10 Condición de filtro para unidades de manto de piezas especiales

Unidad del manto principal	Condición de filtro recomendable
Dolo	W/5 a W/10
Tetrápodo	W/10 a W/20

Fuente 64 (British Standard, 1991)

Y los resultados se detallan en la Tabla 7-11 y Tabla 7-12:

Tabla 7-11 Peso del filtro de protección para un manto con elementos de Dolos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso _{Manto} [tonf]	Peso _{Filtro} [kgf]	Peso _{Máx} [kgf]	Peso _{Mín} [kgf]
Dolos	rota	2.00	1.7	221.3	332.0	166.0
	no rota	2.00	0.9	117.3	176.0	88.0

Fuente 65 Elaboración propia

Tabla 7-12 Peso del filtro de protección para un manto con elementos de Tetrápodos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso _{Manto} [tonf]	Peso _{Filtro} [kgf]	Peso _{Máx} [kgf]	Peso _{Mín} [kgf]
Tetrápodos	rota	1.50	2.5	168.7	253.0	126.5
		2.00	1.9	126.5	189.8	94.9
	no rota	1.50	2.2	146.7	220.0	110.0
		2.00	1.7	110.7	166.0	83.0

Fuente 66 Elaboración propia

Para conocer el peso del núcleo para un manto con elementos artificiales, se ocupan los mismos valores obtenidos en la Tabla 7-9.

7.3.3 ESTIMACIÓN PIE DE PROTECCIÓN

Dada la dinámica del oleaje en el cual se encuentra el dique en talud, se recomienda realizar un elemento de protección al pie del rompeolas, con el fin de evitar la socavación en la zona y perder estabilidad en la coraza de protección. Se considera la Ecuación 19 de Gerding (1993), con un número de unidades desplazada (N_{od}) = 2.00 de acuerdo a un daño moderado (avería entre 5% y 10% de las piezas), una pendiente 1:1.5 (cot α = 1.50) y un ancho de berma de 4 unidades como mínimo (British Standard, 1991). El nivel de diseño, se considera el mínimo con un $Z_{diseño}$ = 0.00 [m] NRS. El peso que utiliza la sección es el correspondiente al filtro y sus profundidades se detallan en la Tabla 7-13:

Tabla 7-13 Estimación de los parámetros ht y h, según diferentes pesos del filtro

W_{50} [kgf]	Dn_{50} [m]	ht [m] NRS	h [m] NRS
500	0.6	-0.5	-1.2
400	0.5	-0.7	-1.8
300	0.4	-1.1	-2.6

Fuente 67 Elaboración propia

Los valores que aquí se encuentran están en negativo, puesto que estos están determinados bajo el nivel de NRS. Se aprecia que, bajo tres posibles condiciones de filtros, ésta disminuye en el peso del elemento, aumentando la profundidad de la sección de protección.

7.3.4 DIMENSIONAMIENTOS MÍNIMOS DE LOS ELEMENTOS

▪ Dimensionamiento de la coraza

Conociendo los diámetros nominales de los elementos (ANEXO 11), se conocen en la Tabla 7-14 , Tabla 7-15 y Tabla 7-16 el dimensionamiento de la coraza o manto principal, considerando los pesos calculados a través de la fórmula de Hudson (1974). Se ocupa la Ecuación 20 y un número de capa igual a dos, tipo de colocación aleatoria (random) y diferentes coeficientes de capas dependiendo del tipo de unidad del manto (escollera rugosa, dolos y tetrápodos).

Tabla 7-14 Espesor del manto de escollera

Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso [tonf]	Dimensiones [m]
Rugosa angular	rota	1.50	5.5	2.5
		2.00	4.1	2.3
	no rota	1.50	2.6	2.0
		2.00	2.1	1.8

Fuente 68 Elaboración propia

Tabla 7-15 Espesor del manto de elementos de Dolos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso [tonf]	Dimensiones [m]
Dolos	rota	2.00	0.8	1.3
	no rota		0.4	1.0

Fuente 69 Elaboración propia

Tabla 7-16 Espesor del manto de elementos de Tetrápodos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso [tonf]	Dimensiones [m]
Tetrápodos	rota	1.50	2.5	2.0
		2.00	1.9	1.8
	no rota	1.50	2.2	1.9
		2.00	1.7	1.8

Fuente 70 Elaboración propia

▪ Dimensionamiento del filtro

Se ocupa la misma metodología que el anterior desarrollo, pero en esta ocasión se utilizan los valores de acuerdo a la unidad del manto de escollera rugosa (número de capa igual a dos, colocación de tipo random y un coeficiente de capa, $K_{\Delta} = 1.00$) y están en función al peso del manto calculado por la fórmula de Hudson (1974). Sus resultados se detallan en la Tabla 7-17, Tabla 7-18 y Tabla 7-19:

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 7-17 Espesor del filtro con manto de escollera

Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso Filtro [tonf]	Dimensiones [m]
Rugosa angular	rota	1.50	0.7	1.3
		2.00	0.5	1.1
	no rota	1.50	0.3	1.0
		2.00	0.3	0.9

Fuente 71 Elaboración propia

Tabla 7-18 Espesor del filtro con manto de elementos de Dolos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso Filtro [kgf]	Dimensiones [m]
Dolos	rota	2.00	112.1	0.7
	no rota		55.7	0.5

Fuente 72 Elaboración propia

Tabla 7-19 Espesor del filtro con manto de elementos de Tetrápodos

Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Peso Filtro [kgf]	Dimensiones [m]
Tetrápodos	rota	1.50	168.7	0.8
		2.00	126.5	0.7
	no rota	1.50	146.7	0.8
		2.00	110.7	0.7

Fuente 73 Elaboración propia

Como se observa de los resultados de los espesores del manto principal y del filtro, se mantiene la misma tendencia, pues los valores se encuentran directamente proporcionados al peso del elemento, siendo mayor espesor los que poseen pesos mayores de roca o elementos prefabricados. Lo que determina la elección de algunos de los elementos, será la cercanía de canteras, la calidad de la roca, capacidad de acopio de elementos de hormigón, personal calificado, entre otros.

Para el método constructivo se recomienda redondear al entero ó 0.5 superior.

7.3.5 ESTIMACIÓN PARAPETO

Para el cálculo en la estimación del muro parapeto o espaldón, se considera una altura de ola máxima ($H_{m\acute{a}x}$), aumentando en un 60% la altura de la ola significativa (H_s). Para el coeficiente de fricción (μ) se adopta el criterio de Goda y Nigai (1974) con un valor de 0.6. Se considera los valores de coeficientes de seguridades, al deslizamiento de 1.20 y vuelco de 1.40. Por lo tanto, la siguiente Figura 7-3, ilustra los valores obtenidos de acuerdo a las presiones de las Ecuación 20, Ecuación 21, Ecuación 22 y Ecuación 24.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

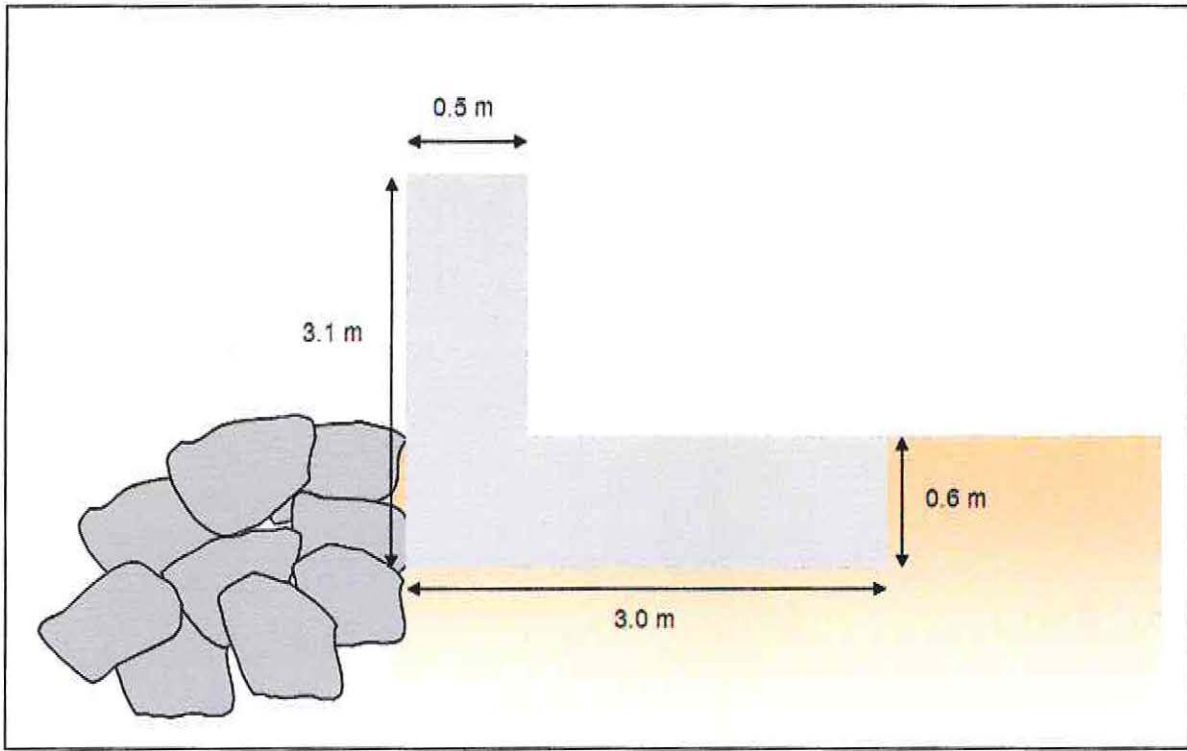


Figura 7-3 Dimensiones parapeto

Fuente 74 Elaboración propia

De acuerdo a las dimensiones, se obtiene un coeficiente de seguridad al deslizamiento de 1.27 y un coeficiente de seguridad al vuelco 2.5. Se disminuye la cota de coronamiento de la escollera a la altura de +6 [m] sobre el NRS.

7.4 DISEÑO HIDRÁULICO

7.4.1 ESTIMACIÓN CAUDAL DE SOBREPASO

El cálculo del caudal de sobrepaso se desarrolla de acuerdo a los valores de altura de ola del estado límite operativo (ELO) de 5 años. Los valores consideran las pendientes 1:2 y 1:1.5 (sin haber variaciones en sus resultados), una incidencia del oleaje con respecto a la normal (β) de 10 [°], un caudal admisible (q admisible) de 0.02 [L/s por m] y el valor de la fuerza de gravedad (g) igual a 9,807 [m/s²].

Los valores del factor de rugosidad (γ_f), se encuentran en la siguiente Tabla 7-20:

Tabla 7-20 Factor de rugosidad

Tipo de elemento	γ_f
Roca (2 capas, permeable)	0.40
Roca (2 capas, impermeable)	0.55
Dolos	0.43
Tetrápodos	0.38

Fuente 75 (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

Realizando los cálculos de acuerdo a la Ecuación 14 y mostrando sus resultados en la Tabla 7-21:

Tabla 7-21 Caudal de sobrepaso calculado en L/s/m

H_s [m]	γ_β	γ_f	R_c [m] NRS	q admisible [L/s/m]	q calculado [L/s/m]
3.00	0.94	0.40	+5.80	0.02	0.017
		0.55	+8.00		0.017
		0.43	+6.20		0.019
		0.38	+5.50		0.018

Fuente 76 Elaboración propia

Se observa que los valores del francobordo (R_c) son pequeños cuando el coeficiente de rugosidad son menores, como es el caso en la roca permeable y en los dolos. Para el coeficiente de incidencia, se considera desfavorable cuando el ángulo con respecto a la normal sea 0 [°], es decir, que llegue perpendicular a la costa y el valor de $\gamma_\beta = 1$. El criterio de caudal admisible según Franco et al. 1994, se observa en el ANEXO 8.

7.4.2 RUN UP

Para estimar el ascenso del oleaje (run up) por sobre el nivel de diseño ($Z_{\text{diseño } 1}$), se utiliza una altura de oleaje significativo (H_s) de acuerdo a un periodo de retorno de 30 años, con un valor de 3 [m] y asociado a su periodo significativo (T_s) de 13 [s].

De acuerdo a la siguiente ecuación:

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

$$\frac{R_u}{H_s} = b \cdot \xi^c \quad \xi > 1.5 \wedge P < 40\%$$

Ecuación 27

Al calcular el remonte del 2%, se debe utilizar los parámetros $b=1.17$ y $c=0.46$. Los resultados se encuentran en la siguiente Tabla 7-22:

Tabla 7-22 Cálculo del $Ru_{2\%}$

$\tan\alpha$	ξ	$Ru_{2\%}$ [m]
1:2	2.5	+ 5.4
1:1.5	3.2	+ 6

Fuente 77 Elaboración propia

Se distingue que a menor pendiente ($\tan\alpha=1:2$) el run up es menor. Se aprecia también que, el 2% del tiempo que dura el evento corresponde a + 5.4 [m] por sobre el nivel de diseño ($Z_{\text{diseño}} = + 2.3$ m NRS), por lo tanto, un nivel de coronamiento de +7.7 [m] NRS existirían algunos sobrepasos pero no generaría problemas operativos importantes en la explanada.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

7.5 COSTOS DE LAS ALTERNATIVAS

En la elaboración de los costos para el diseño de la protección costera, se utilizarán precios unitarios y otros criterios obtenidos de obras similares. Sin embargo, en este tipo de obras los costos de los contratistas pueden aumentar significativamente de acuerdo a la incertidumbre, riesgos y otros factores.

La estimación de los ítems y costos unitarios requerirá de una verificación de los proveedores y contratistas locales.

Los costos estimados para la construcción de la protección costera se realizarán para una extensión de 530 m y los precios estarán en UF, debido a su reajustabilidad.

Para la estimación del suministro e instalación de elementos de hormigón, se estimarán valores de mano de obra, equipos, maquinarias y materiales, cuyos valores se considerarán de obras de envergaduras equivalentes (Fernández, 2010).

Tabla 7-23 Estimación de costos de protección con escollera

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad	P.U. (UF)	Sub total (UF)
1	ACTIVIDADES GENERALES				
1,1	Instalación de faenas	G	1	1,659.1	1,659.1
2	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE LA CORAZA				
2.1	Roca coraza (3.1 - 5.2 t)	M ³	24,009	1.6	38,192.0
3	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS				
3.1	Roca filtro (400 - 700 kg)	M ³	14,310	1.2	16,503.5
3.2	Núcleo (2.3 - 13.5 kg)	M ³	50,668	0.9	44,329.7
4	REQUERIMIENTOS				
4.1	Suministro e instalación del geotextil	M ²	25,758	0.1	2,575.8
5	RELLENO				
5.1	relleno estructural	M ³	32,650	0.3	8,494.1
6	EXCAVACIÓN				
6.1	Remoción del sedimento (bajo el agua)	M ³	33,570	0.4	12,799.5
Total costo directo (UF)					124,554
Contingencias (35%)					43,594
Gastos generales y utilidades (15%)					18,633
Total neto (UF)					186,831
Impuesto IVA (19%)					35,498
Total (UF)					222,328

Fuente 78 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 7-24 Estimación de costo de protección de Tetrápodos

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad	P.U. (UF)	Sub total (UF)
1 ACTIVIDADES GENERALES					
1.1	Instalación de faros	GL	1	2,988.4	2,988.4
2 SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE LA CORAZA					
2.1	Elementos Tetrápodos (1.7t)	M ³	19,080	4.5	85,860.0
2.2	Colocación Tetrápodos	M ³	19,080	1.8	34,344.0
3 SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS					
3.1	Roca filtro (400 - 700 kg)	M ³	11,130	1.2	12,836.0
3.2	Núcleo (2.3 - 13.5 kg)	M ³	71,020	0.9	62,135.7
4 RECUBRIMIENTOS					
4.1	Suministro e instalación del geotextil	M ²	25,758	0.1	2,575.8
5 RELLENO					
5.1	Relleno estructural	M ³	31,800	0.3	8,220.1
6 EXCAVACIÓN					
6.1	Remoción del sedimento (bajo el agua)	M ³	39,750	0.4	13,912.5
Total costo directo (UF)					\$ 222,853
Contingencias (35%)					\$ 77,998
Gastos generales y utilidades (15%)					\$ 33,428
Total neto (UF)					\$ 334,279
Impuesto IVA (19%)					\$ 63,513
Total (UF)					\$ 397,792

Fuente 79 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 7-25 Estimación de costo de protección de Dolos

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad	P.U. (UF)	Sub total (UF)
1	ACTIVIDADES GENERALES				
1.1	Instalación de faenas	GL	1	2,474.2	2,474.2
2	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE LA CORAZA				
2.1	Elementos Dolos (1.7 t)	M ³	13,780	4.5	62,010.0
2.2	Colocación Dolos	M ³	13,780	1.8	24,804.0
3	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS				
3.1	Roca filtro (400 - 700 kg)	M ³	8,055	1.2	9,230.9
3.2	Núcleo (2.3 - 13.5 kg)	M ³	71,550	0.9	62,599.4
4	REQUERIMIENTOS				
4.1	Suministro e instalación del geotextil	M ²	25,758	0.1	2,575.8
5	RELLENO				
5.1	Relleno estructural	M ³	31,270	0.3	8,083.1
6	EXCAVACIÓN				
6.1	Remoción del sedimento (bajo el agua)	M ³	33,750	0.4	13,912.5
Total costo directo (UF)					185,750
Contingencias (35%)					65,012
Gastos generales y utilidades (15%)					27,832
Total neto (UF)					278,625
Impuesto IVA (19%)					52,939
Total (UF)					331,564

Fuente 80 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 7-26 Estimación de costos de protección de escollera con muro parapeto

ITEM	DESCRIPCIÓN	Unidad	Cantidad	P.U. (UF)	Sub total (UF)
1	ACTIVIDADES GENERALES				
1.1	Instalación de faenas	GI	1	1,099.8	1,099.8
2	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE LA CORAZA				
2.1	Roca coraza (3.1 - 5.2 t)	M ³	15,370	1.6	24,449.6
3	SUMINISTRO Y COLOCACIÓN DE ELEMENTOS SECUNDARIOS				
3.1	Roca filtro (400 - 700 kg)	M ³	12,190	1.2	14,088.5
3.2	Núcleo (2.3 - 13.5 kg)	M ³	16,430	0.9	14,374.7
4	MURO PARAPETO				
4.1	Hormigón	M ³	1,617	3.4	5,479.9
5	RECUBRIMIENTOS				
5.1	Suministro e instalación del geotextil	M ²	17,315	0.1	1,731.5
6	RELLENO				
6.1	Relleno estructural	M ³	48,230	0.3	12,467.2
7	EXCAVACIÓN				
7.1	Remoción del sedimento (bajo el agua)	M ³	25,440	0.4	8,904.0
Total costo directo (UF)					82,666
Contingencias (36%)					28,898
Gastos generales y utilidades (15%)					12,385
Total neto (UF)					123,848
Impuesto IVA (19%)					23,531
Total (UF)					147,379

Fuente 81 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Se representa gráficamente el resumen de los costos (en UF) de las 4 alternativas en la siguiente Figura 7-4

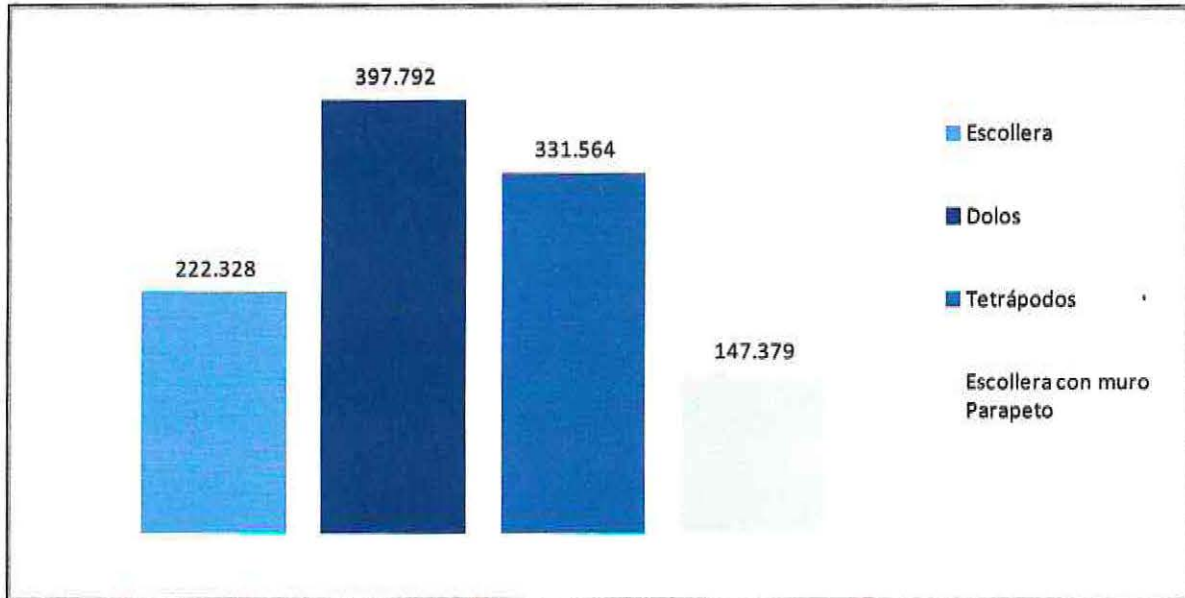


Figura 7-4 Resumen económico de las 4 alternativas

Fuente 82 Elaboración propia

7.6 RESULTADOS Y ESQUEMA FINAL DE LA PROTECCIÓN COSTERA

Los parámetros que se ocuparon para desarrollar el esquema final, fueron de carácter conservador y se resumen en la Tabla 7-27:

Tabla 7-27 Consideraciones para el diseño final

Parámetros	Criterios
Nivel de marea de diseño $Z_{\text{diseño } 1}$	+2.3 m NRS
Nivel de marea de diseño $Z_{\text{diseño } 3}$	+0.0 m NRS
ELU (Tr = 30 años)	3 m
ELO (Tr = 5 años)	3 m
Formula de la estimación del peso de la coraza	Hudson (1974)
Formula de la estimación del peso del pie de protección	Gerding (1993)
Formula de la estimación del caudal de sobrepaso	Determinístico
Formula de la estimación del muro parapeto	Günbak y Göke (1984)
Piente de talud de la obra	1/2

Fuente 83 Elaboración propia

Se consideró un nivel de marea de diseño + 2.3 [m] NRS por ser la situación mayor que se presenta en una tormenta. Mientras que un nivel de 0.0 m NRS será el valor menor que

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

puede alcanzar la marea. Los valores de ELU y ELO, se estimarán los mismos, puesto que, poseen diferencias centesimales.

Para la estimación del peso de la coraza, en vez de utilizar la expresión de Van der Meer (1988), se decidió ocupar la fórmula de Hudson (1974), ya que es levemente mayor a la primera fórmula, los resultados se detallan en la siguiente Tabla 7-28:

Tabla 7-28 Protección de escollera con muro parapeto

Capas	Wn_{min}	Wn_{50}	$Wn_{máx}$
Coraza	3.1 tonf	4.1 tonf	5.2 tonf
Filtro	400 kgf	500 kgf	700 kgf
Núcleo	2.3 kgf	7.8 kgf	13.2 kgf
Cotas			
Coronamiento muro		+8.1 m NRS	
Coronamiento escollera		+6 m NRS	
Profundidad		-1.2 m NRS	
Espesores			
Coraza		2.5 m	
Filtro		1.5 m	

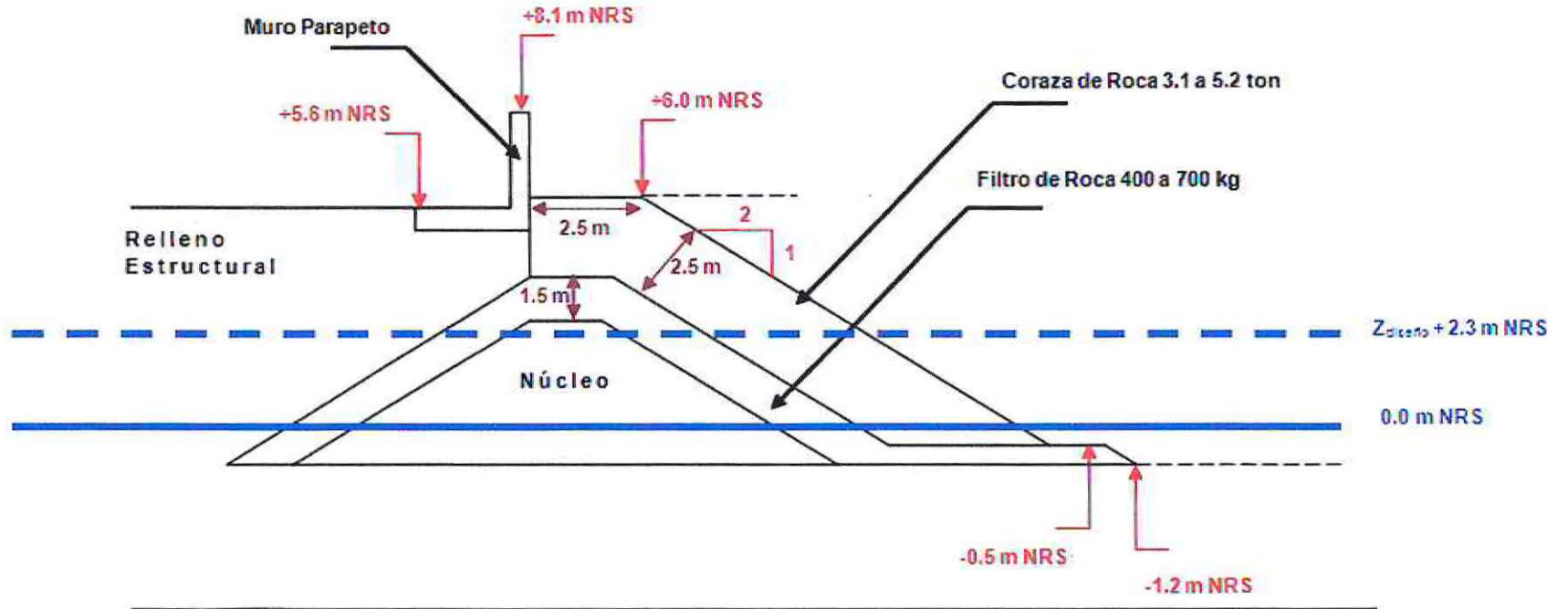
Fuente 84 Elaboración propia

Para el diseño final, se debe conocer el estudio de canteras (ANEXO 9) y saber las especificaciones técnicas de materiales y construcción (ANEXO 10).

En caso que la empresa contratista estime conveniente usar elementos de hormigón, en el ANEXO 11 se detallarán los parámetros de forma para su construcción y en el ANEXO 12 se detallarán sus perfiles.

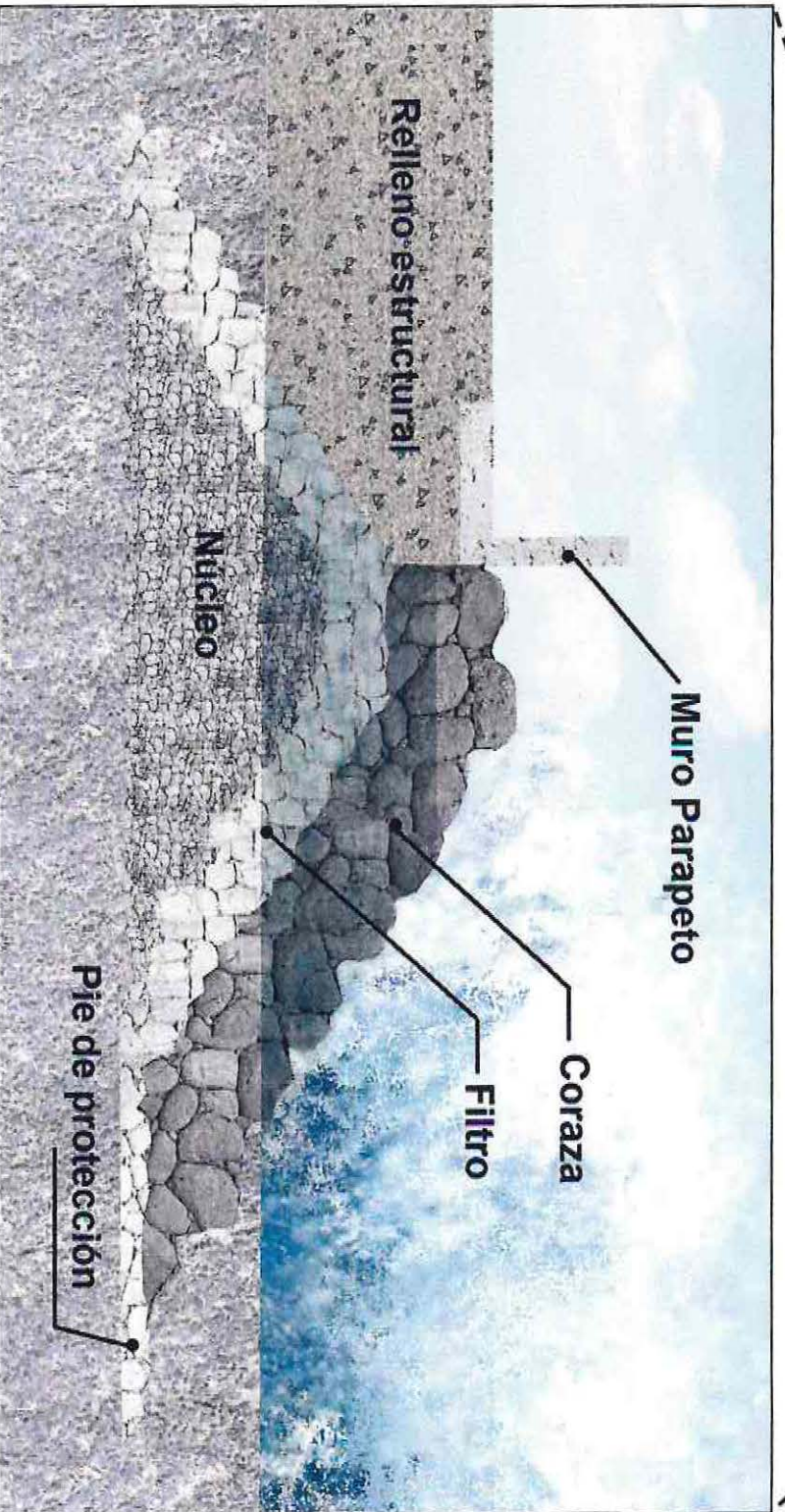
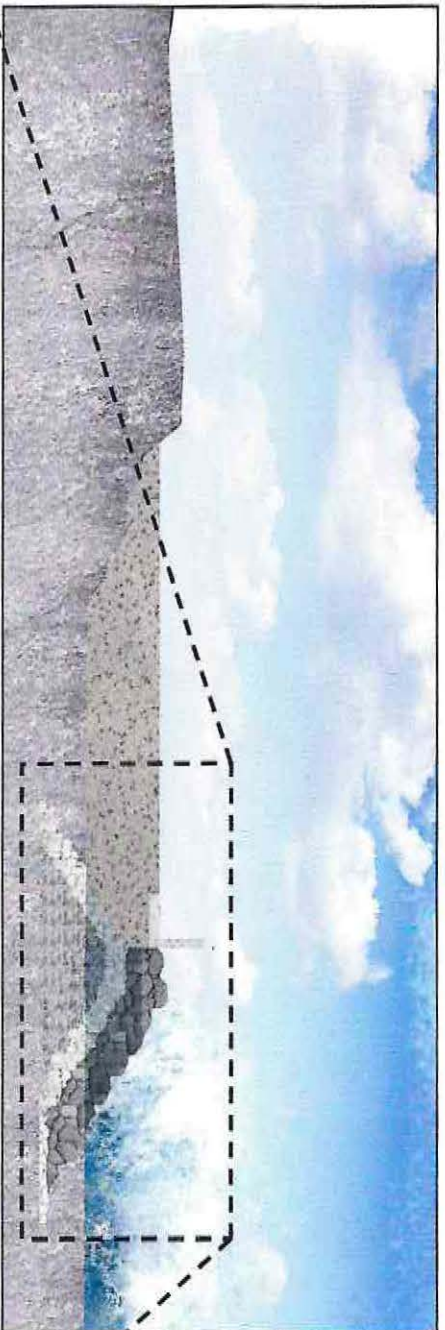
"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

7.6.1 PERFIL TRANSVERSAL



COTA - TERRENO	1.42	1.41	1.39	1.38	1.37	1.36	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.30	1.29	1.28	1.26	1.25
DISTANCIA - AL ORIGEN	44.00	46.00	48.00	50.00	52.00	54.00	56.00	58.00	60.00	62.00	64.00	66.00	68.00	70.00	72.00	74.00

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”



"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"
7.6.2 PERFIL EN PLANTA



8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La alternativa seleccionada, se elaboró con ecuaciones y metodologías aceptadas en la comunidad científica y proyectos en Chile. Los valores, serán los mínimos que se debe cumplir para la construcción de la obra. Las conclusiones, serán en base a los objetivos planteados y son los siguientes:

1. Para el nivel de marea de diseño, se consideraron valores de la marea meteorológica y astronómica. Además, se agregó el fenómeno del set up del oleaje, por encontrarse la obra en profundidades reducidas y cercana a la rompiente.

Los cambios más sensibles se encuentran en los valores astronómicos (se adoptó el nivel medio de las pleamares máximas). Pero, al considerar una altura de marea menor (como las altura medias de las pleamares), hará que los valores del peso de la coraza y la altura de la cota de coronamiento disminuyan, siendo una obra más expuesta a sufrir alguna falla a causa de los temporales.

En el caso del efecto meteorológico por presión atmosférica, se mantiene un comportamiento constante durante los 7 años de estadística, sin presentar variaciones extremas durante los años. Se consideró un aumento de marea de 10 [cm].

Para el fenómeno wind set up, los valores son menos relevantes, producto de su lejano centro de bajas presiones.

Por último, el set up del oleaje, es el segundo valor que mas incrementa a la marea de diseño, siendo un coeficiente directamente proporcional al periodo de la ola. Se adoptó un valor de 0.65 [m], de acuerdo a una ola con periodo de retorno de 30 años, viniendo de la dirección del IV cuadrante.

De acuerdo al criterio de Franco et al 1994, se consideró un caudal admisible de sobrepaso de 0.02 [l/s por m], con este valor, el tránsito de los vehículos es seguro a bajas velocidades. Para que cumple lo anterior, se debe emplear una estructura que posea un bajo índice de rugosidad, de esta forma, la cota de coronamiento de la estructura será menor.

Se sabe que el caudal admisible al ser un valor promedio en el tiempo, podría ser superado en un solo evento o temporal.

2. Para el cálculo del peso de la coraza, se decidió ocupar la expresión de Hudson (1974), ya que es una formulación que no considera sobrepaso y provoca que la energía del oleaje se concentre en la coraza. Además al ser superior a la formulación de Van der Meer (1988), hará que el diseño sea conservador y minimice los riesgos provocado por la incertidumbre de los fenómenos de la naturaleza.

Para el desarrollo se consideró una estadística de oleaje de 21 años (1992-2013), cuyo estudio de clima extremo se obtuvo con un periodo de retorno (T_r) = 30 años, considerando los riesgos y la vida útil, que EPSA requería. En caso que una tormenta supere la altura de ola respecto a 30 años, causará daños a la obra.

En la protección del pie del talud, se ocupó la formulación de Gerding (1993) que considera un nivel de marea de diseño +0.0 [m] NRS, por ser el valor mínimo que se puede alcanzar.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

3. Se observa de las alternativas que el peso de los elementos pre fabricados son menores en comparación a la escollera, teniendo una disminución del volumen aproximadamente del 50% con respecto a la roca, resultando una construcción menos invasivas para el entorno y medio ambiente.
Por otro lado, para la cota de coronamiento, se posee valores similares entre las 4 alternativas. Técnicamente es factible considerar la protección con Dolos y Tetrápodos, pero económicamente, se elevan más del doble en los costos de la obra. Sin embargo, construir una protección de escollera, es factible, puesto que las canteras que se encuentran cercanas al Puerto de San Antonio, son capaces de explotar las toneladas y volumen requeridas en el proyecto. Aun así, de forma de disminuir las cantidades de rocas, se diseñó un muro parapeto, siendo esta última alternativa la que cumple con los requisitos técnicos y económicos.
4. Para la elaboración del plano en elevación, se utiliza la sección que muestra el perfil transversal, con el fin de facilitar los requerimientos constructivos. En la estructura en planta, se debe evitar las singularidades en sus extremos, para evitar la concentración del oleaje en esos puntos. Se consideró realizar un relleno, hasta los 50 [m], ya que a esa distancia, se gana explanada y además, se encuentra fuera de la concesión de STI.

En general, es importante que en la etapa de ingeniería básica se caractericen los fenómenos conservadoramente, un ejemplo de ello, es haber ocupado el nivel de diseño $Z_{\text{diseño 1}}$ en vez $Z_{\text{diseño 2}}$, lo cual provocó que la altura de ola aumentaran en 20 cm y como consecuencia los pesos de la coraza crecieron aproximadamente un 20% para la escollera y 23% para los elementos prefabricados (ver ANEXO 13). Esta diferencia es poco significativa y será necesario asumir este costo, para que la obra se encuentre el mayor del tiempo posible protegiendo a la explanada.

8.1 RECOMENDACIONES GENERALES

Se realizará recomendaciones generales que se deben considerar en la etapa de construcción o realizar en futuras obras.

1. Ocupar datos gratuitos para realizar ingeniería conceptual, pre diseños o para obras que en caso de fallar no tengan repercusiones económica y posibles pérdidas humanas. Para el caso de obras de mayor envergadura, como protección de dársenas, ocupar datos confiables que representen fehacientemente el oleaje y la caracterización de la zona de proyecto. En el caso que sea necesario, complementar los valores con modelaciones físicas.
2. Ir necesariamente a la zona de proyecto y recopilar información con lugareños sobre los efectos oceanográficos, sobre todo, las condiciones extremas del mar (temporales).
3. En el caso de querer ocupar las formulaciones de Hudson (1974) y Van der Meer (1988), se promediará sus valores como se realiza en el CEM (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).
4. Para facilitar la construcción del pie de protección del talud, se ocupará la extensión del filtro, puesto que los valores obtenidos con Gerding (1993) son semejantes a la capa secundaria.
5. Para la configuración en planta de la protección costera, en sus extremos y en el cambio de orientación (codo), se recomienda diseñar con un coeficiente de estabilidad (K_d) igual a 1.6 o utilizar las rocas mayores (5.2 t) del diseño.
6. La construcción de la protección se debe ser realizada luego de la temporada de invierno, puesto que después de ese periodo, el perfil de playa se encontrará erosionada, llegando a las profundidades máximas y sin alterar los volúmenes de protección del enrocado. Además, se debería ocupar una barrera de tablestacas, para que el oleaje no se lleve los elementos pequeños en la etapa constructiva.
7. En caso de las tormentas de los últimos años sea constante en el futuro, llegando alturas de ola al pie de la obra de 5 [m] se necesitará aumentar la cota de coronamiento a una altura de +13 [m] NRS y peso en la coraza de 31 [tonf] con un máximo 39 [tonf].
8. Realizar estudios de transporte de sedimentos, en caso que la protección interfiera en el ciclo natural del sedimento.

Finalmente, este proyecto de título corresponde a un estudio de ingeniería básica y no presenta información suficiente para construcción.

9 REFERENCIAS

- Beyá, J., & Winckler, P. (2012). *Inundaciones Costeras, Más allá de los Tsunamis*.
- British Standard. (1991). Maritime Structures. Part 7. En *Guide to the design and construction of breakwaters*.
- CIRIA CUR. (2006). *The rock manual*.
- Del Villar, E., & Garcia, M. (2008). *Dique de escollera*. Madrid.
- Deltares. (2013). *Delft3D-wave_user_manual*.
- DOP-ARA, D. d. (2013). *Guía para el diseño, construcción, operación y conservación para obras marítimas y costeras. Vol. III*. Santiago.
- EPSA. (2011). *Estado de canteras para el proyecto "Terminal Costera Espigón, Puerto de San Antonio"*.
- EurOtop. (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*.
- Fernández, R. (2010). *Estudio de alternativas de rompeolas para el proyecto "Terminal de descarga de carbón"*.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. Yokosuka.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Wave in oceanic and coastal waters*. Cambridge.
- Huidobro, J. (2009). *Diseño de rompeolas bajo un concepto de riesgo*.
- Negro, V., & Varela, O. (2008). *Diseño de Diques Rompeolas*.
- OCDI, T. O. (2002). *Technical Standars and Commentaries of Port and Harbour Facilities in Japan*.
- Proconsa Ambiental. (2001). *Línea Base clima y meteorología "Ampliación Puerto de San Antonio"*.
- ROM 0.0, R. d. (2001). *Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias*.
- ROM 0.2, R. d. (1990). *Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*.
- SHOA pub. 3000, S. H. (2008). *Cartas y publicaciones náuticas*.
- SHOA pub. 3009, S. H. (2014). *Tablas de marea de la costa de Chile*.
- SHOA pub. 3202, S. H. (1999). *Método oficial para cálculo de los valores no armónicos de las mareas*.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*.
- UNICAN, V. I. (2000). *Documento de Referencia (Vol. III)*. Cantabria.
- UNICAN, V. I. (2000). *Documento de Referencia (Vol. III)*. Cantabria.
- USACE, U. A. (1984). *Shore Protection Manual (Vol. 2)*.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

USACE, U. A. (2006). *Coastal Engineering Manual*.

Van de Meer, J. (1995). *Conceptual design of rubble mound breakwaters*.

10 GLOSARIO

[A]

Aguas profundas: cuando la profundidad h es igual o mayor que la mitad de su longitud de onda, L , el oleaje no experimenta modificaciones debida a la profundidad.

Aguas someras: es cuando la profundidad h es igual o menor que la vigésima quinta parte de su longitud de onda, L , el oleaje está completamente controlado por la profundidad del agua.

Altura de ola máxima ($H_{m\acute{a}x}$): es el máximo de todas las alturas de las olas.

Altura de ola medio (H_m ó $H_{1/2}$): es el promedio del 50% de las olas más altas.

Altura de ola significativa ($H_{1/3}$ ó H_s): corresponde al promedio de las alturas asociados al 33% de las olas más altas de un registro. Para el caso particular de un espectro de banda estrecha con una distribución de altura de olas de tipo Rayleigh. La altura de ola significativa es igual a la altura de momento de orden cero, $H_s=H_{m0}$.

Altura de ola: distancia vertical entre la cresta y valle de la onda.

Asomeramiento (Shoaling): es el proceso de transformación de la onda en que se observa un cambio en la altura y en la longitud de la onda, a medida que el tren de onda se aproxima hacia la costa.

[B]

Batimetría: representa la morfología o relieve del fondo marino, es el equivalente submarino a la altimetría. Consiste en determinar la profundidad midiendo el tiempo que le toma a una onda acústica, enviada desde el barco, viajar a través del agua hacia el fondo marino y luego volver al barco.

Berma de apoyo: su función es apoyar las piezas del manto principal o coraza y retención de las piezas desplazadas.

[C]

Canteras: lugar de donde se extrae piedra y otros materiales usados en la construcción.

Caudal de sobrepaso (Overtopping): ocurre cuando el ascenso o run –up excede al francobordo de la estructura (R_c). Sus unidades se encuentran en m^3/s por metro longitudinal de la estructura.

Cuadrantes meteorológicos: considerando el norte en 0° y que gira en sentido de la manecilla del reloj. Por lo tanto el tercer (III) cuadrante se encontrará entre $180 [^\circ]$ a $270 [^\circ]$ y el cuarto (IV) cuadrante se encontrará entre $270 [^\circ]$ a $360 [^\circ]$.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

[D]

Dársena: parte de un puerto, que esta resguardado artificialmente para que las embarcaciones puedan cargar y descargar con comodidad.

Densidad espectral: representa la energía total asociada a cada uno de los trenes de ondas en los que se puede descomponer un registro de oleaje, en función de la frecuencia y de la dirección de propagación.

Diámetro nominal medio de la roca (D_{n50}): longitud equivalente a las piezas del peso correspondiente a cuantil del 50% (W_{50}), en la distribución de pesos.

[E]

Espaldón (o parapeto): superestructura de hormigón. Reduce la cantidad de agua rebasada. Disminuye la altura de coronación. Reduce el volumen de material necesario. Proporciona camino de accesos, instalaciones de tuberías, galerías de servicio y facilita el mantenimiento del manto principal.

Espectro de energía: proceso matemático que describe el comportamiento energético en función de la frecuencia para cada una de las componentes monocromáticas que están presente en el oleaje irregular. Corresponde a la manera más completa de representar el oleaje ya que guarda la relación altura-periodo, en el caso de los espectros 1D y la relación altura, periodo y dirección en los espectros 2D.

Espectro JONSWAP: es un espectro sintético, el cual fue generado con datos tomados a finales de la década de los sesenta por un proyecto de medición de oleaje conocido como JONSWAP (JOint North Sea WAVE Project, por sus siglas en inglés). Este espectro fue generado para estados de mar formados por viento, con Fetch limitado y para una profundidad de agua indefinida.

Espectros sintéticos de oleaje: son generados por medios de los parámetros que caracterizan su desarrollo. Los modelos espectrales están basados generalmente en uno o varios parámetros.

Estados de mar: representa cada una de las posiciones de la dinámica del oleaje, admitiendo que éstas tienen una variación lo suficientemente lenta para considerar el proceso como estacionario.

[F]

Fetch: longitud sobre el cual el viento transmite energía a la ola.

[H]

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Hindcasting: corresponde a una predicción estadística de ola a largo plazo.

[K]

Kilogramo fuerza [Kgf]: unidad de fuerza que equivale a la fuerza que actúa sobre la masa de 1 [kg] sometido a la gravedad normal de la Tierra.

[M]

Modelo físico: también llamados modelos hidráulicos. Son representaciones pequeñas de un elemento real, al que se le denomina prototipo. Un modelo de este tipo debe ser geoméricamente, dinámica y cinemáticamente semejante al prototipo para permitir con esto que la observación, resultados y conclusiones del elemento que se estudie sea válido.

[N]

Nivel de reducción de sonda (NRS): es el plano en el cual están referida las sondas o profundidades de una localidad. Cada país adopta un NRS de acuerdo con las características del régimen de marea de sus costas. En Chile, se adoptó como nivel de reducción de sondas el plano determinado como la mayor bajamar en sicigias estando la luna en el perigeo (el punto más cercano de su órbita).

[O]

Oleaje distante (Swell): en el caso particular de Chile, el oleaje tipo swell es aquel que ha sido generado en distintos puntos de la cuenca del océano Pacífico, propagándose hasta las costas chilenas. Se caracteriza por poseer periodos de 10 a 25 [s].

Oleaje local (Sea): es oleaje generado por vientos locales y se caracteriza por poseer periodos aproximadamente de 4 a 8 [s]. Escasamente se aprecian crestas de cierta longitud y es difícil observar un periodo bien definido.

Oleaje monocromático: posee propiedades constantes.

Oleaje real o irregular: conjunto de olas compuestas por olas simple de diferentes alturas, periodos y dirección.

Oscilación (Surging): ocurre en pendientes más fuertes. La ola no rompe completamente, reflejando gran parte de la energía.

[P]

Perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés): utiliza el efecto Doppler transmitiendo sonido a una frecuencia fija y escuchando los ecos retornados por los reflectores en el agua. Estos equipos permiten medir velocidad y dirección de la corriente y

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

están equipados con sensor de temperatura, profundidad, sensor de inclinación y compás. Permiten a su vez medir la salinidad (conductividad), turbiedad y altura de ola.

Periodo de ola: tiempo que tardar en pasar por un punto fijo dos crestas o dos valles consecutivamente.

Periodo medio (T_m): es el promedio de los periodos asociados al 50% de las olas más altas de un registro.

Periodo peak (T_p): corresponde al periodo asociado al peak de energía del espectro.

Periodo significativo ($T_{1/3}$ o T_s): es el promedio de los periodos asociados al 33% de las olas más altas de un registro.

Pie de protección: elemento del rompeola que está compuesto por materiales menores al peso del filtro, pero nunca del núcleo. Su función es para la protección de la socavación en terreno de baja capacidad portante.

[R]

Refracción: ocurre cuando un tren de ola incide oblicuamente sobre la costa, encontrando una variación en la profundidad. Puede ser generada por el cambio del fondo marino o por presencia de una corriente.

[S]

Sicigia: fase de la luna cuando es llena o nueva.

Sistema de coordenadas geográficas UTM (Universal Transverse Mercator): se utiliza para referenciar cualquier punto de la superficie terrestre, utilizando para ello un tipo particular de proyección cilíndrica para representar la Tierra sobre un plano.

[T]

TEU: acrónimo del término en inglés Twenty-foot Equivalent Unit (TEU es la capacidad de carga de un contenedor normalizado de 20 pies). Una caja metálica de tamaño estandarizado que puede ser transferido fácilmente entre diferentes formas de transporte. Sus dimensiones son 20 pies (6.1m) de largo, 8 pies (2.4 m) de ancho y 8.5 pies (2.6 m) de altura.

Tonelada fuerza [Tonf]: unidad de fuerza que equivale al peso que tiene una masa de una tonelada, bajo condiciones de gravedad normal en el planeta Tierra. Es decir, aproximadamente 9800 [N].

[V]

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Veril: línea que une puntos de igual profundidad.

Voluta (Plunging): ocurre en playas de mayores pendientes. Se caracteriza por el tubo que se forma.

11 ANEXOS

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.1 ANEXO 1

11.1.1 PRESIÓN ATMOSFÉRICA

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

En las siguientes figuras se detallarán las variaciones anuales de presión atmosférica en la estación meteorológica de Pudahuel.

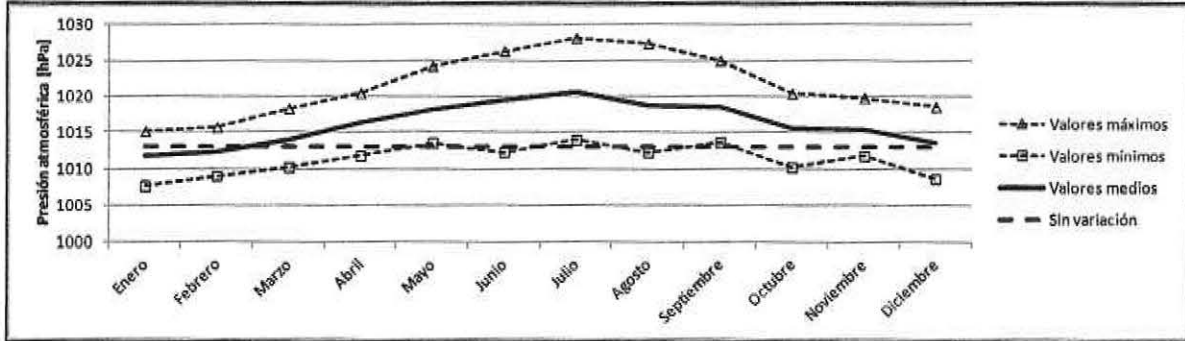


Figura 11-1 Variación de presión atmosférica año 2014

Fuente 85 Elaboración propia

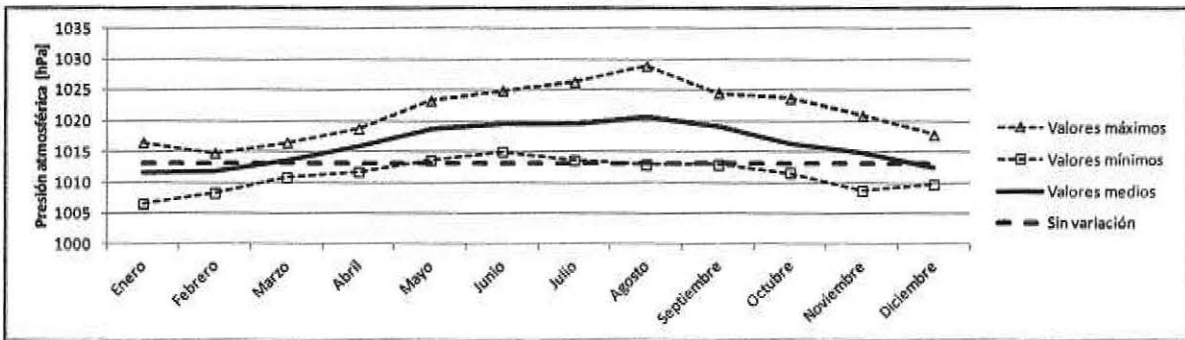


Figura 11-2 Variación de presión atmosférica año 2013

Fuente 86 Elaboración propia

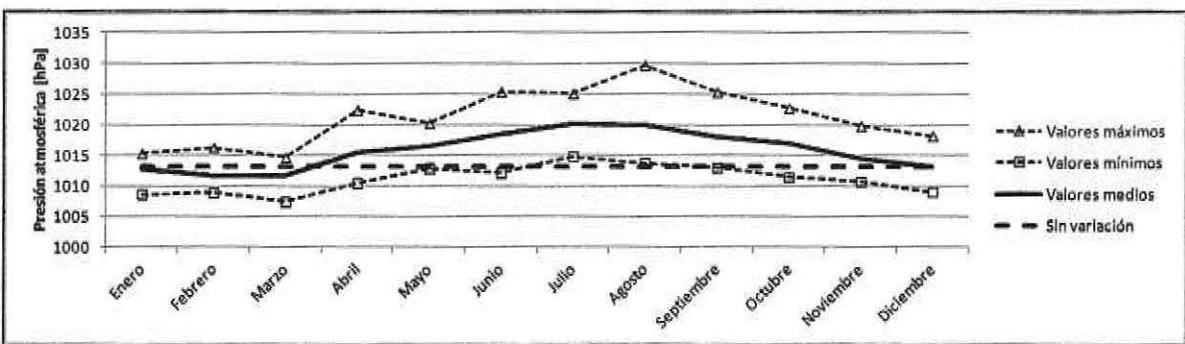


Figura 11-3 Variación de presión atmosférica año 2012

Fuente 87 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

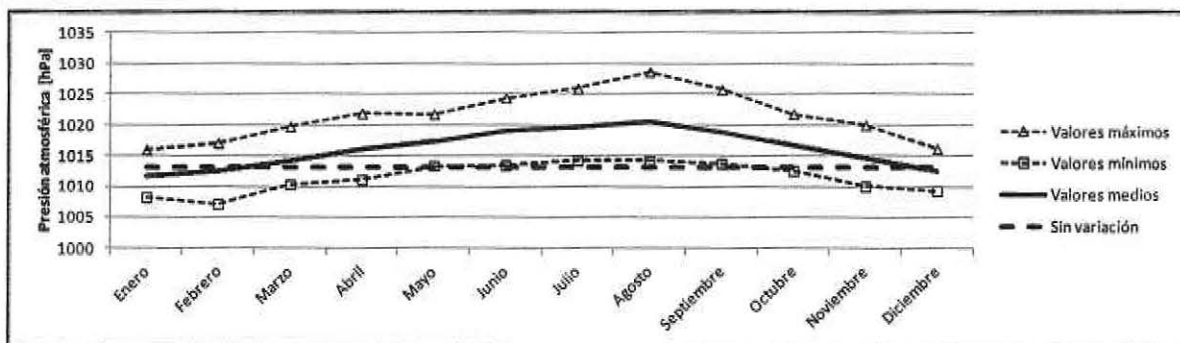


Figura 11-4 Variación de presión atmosférica año 2011

Fuente 88 Elaboración propia

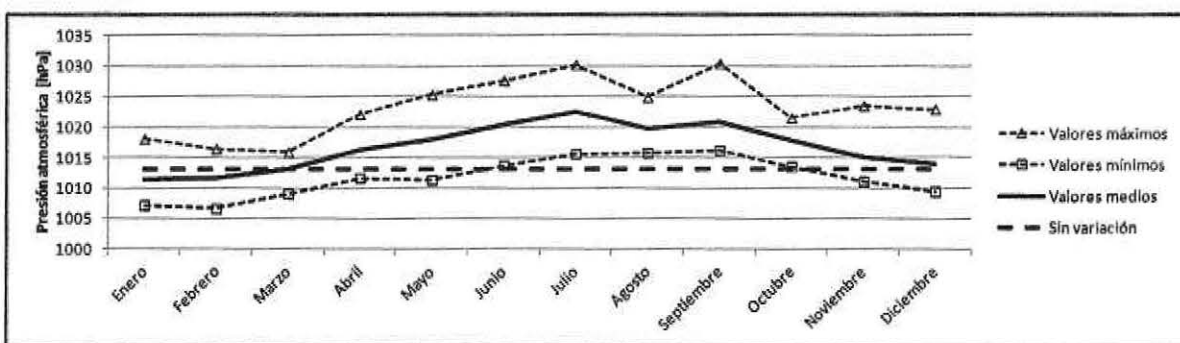


Figura 11-5 Variación de presión atmosférica año 2010

Fuente 89 Elaboración propia

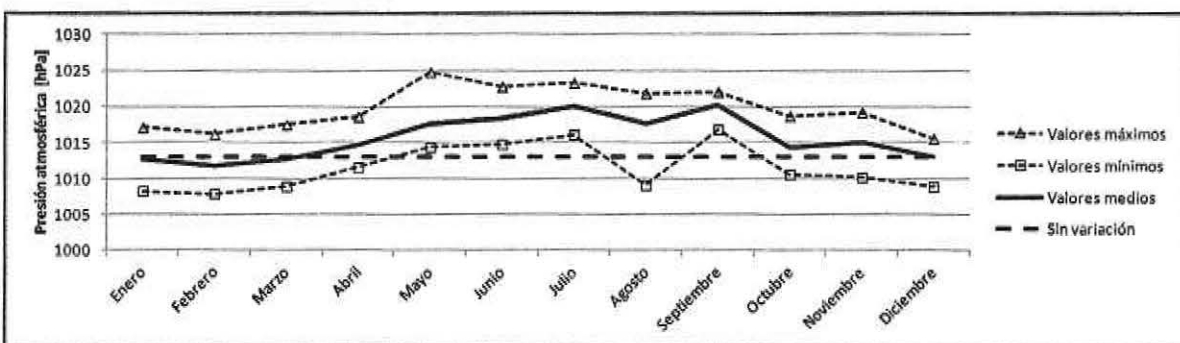


Figura 11-6 Variación de presión atmosférica año 2009

Fuente 90 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

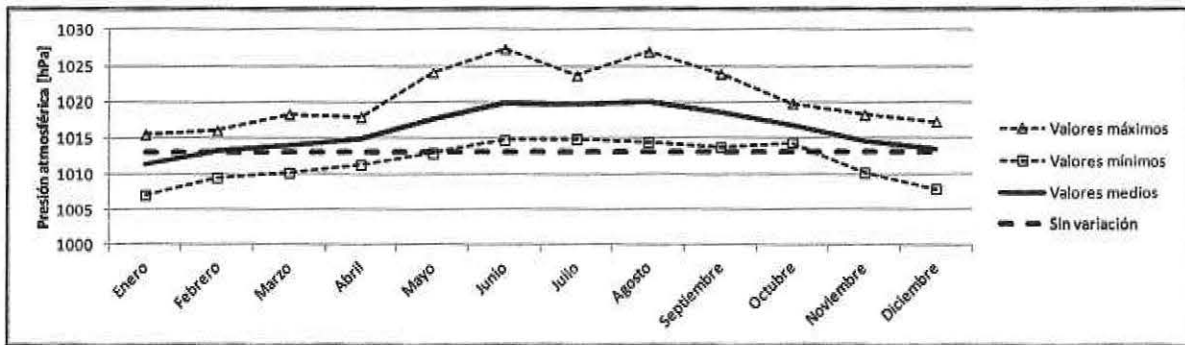


Figura 11-7 Variación de presión atmosférica año 2008

Fuente 91 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

11.2 ANEXO 2

11.2.1 TEORÍA EN EL MODELO DEL TÉRMINO FUENTE

TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DEBIDA AL VIENTO

La transferencia de energía debida al viento se describe por el mecanismo de resonancia de la superficie libre de las olas por fluctuaciones turbulentas de presión, Phillips (1957) y el mecanismo considerado como crecimiento exponencial en tiempo debido a la interacción resonante entre las olas inducidas por las fluctuaciones de la presión y la superficie libre de las olas, Miles (1957). Por lo tanto este término se describe como la suma de crecimiento lineal y exponencial dada la siguiente ecuación:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + B \cdot E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde A describe el crecimiento lineal (mecanismo resonante de Phillips) y B el crecimiento exponencial (mecanismo de realimentación de Miles). Para el término de crecimiento línea A, la expresión es debida a Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981). Para el coeficiente B se usan dos expresiones opcionales que considera SWAN. La primera está tomada de una versión anterior del modelo WAM (conocido como WAM Cycle 3 [WAMDI Group, 1988]). Es debido a Snyder et al. (1981), reescalado en término de la velocidad de fricción U^* por Komen et al. (1984). El coeficiente de arrastre relaciona a U^* con la conducción de la velocidad del viento a una altura de 10 [m], U_{10} tomado de Wu (1982). La segunda expresión de B para SWAN, se toma de la versión más reciente del modelo WAM (conocido como WAM Cycle, Komen et al. [1994]). Es debido a Janssen (1991a) y representa de manera explícita la interacción entre el viento y las olas, considerando los efectos de capa límite atmosférica y la longitud de la rugosidad de la superficie del mar.

DISIPACIÓN

El termino disipación de energía de las olas está representado por la suma de tres contribuciones diferentes: descrestamiento (whitecapping), $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$, fricción de fondo , $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$ y rotura inducida por la profundidad, $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$.

Descrestamiento (whitecapping)

Whitecapping es controlado principalmente por la esbeltez de la ola. En SWAN, como en otros modelos de olas de tercera generación se basa en una distribución aleatoria de pulsos de presión en la superficie del agua propuesto por Hasselmann (1974), tal como fue adaptada por el WAMDI Group (1988):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \cdot \bar{\sigma} \cdot \frac{\bar{k}}{\bar{k}} \cdot E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde Γ es el coeficiente dependiente de la esbeltes de la ola, k es el número de olas y $\bar{\sigma}$ y \bar{k} son la frecuencia y el numero de olas medios, respectivamente. Komen et al. (1984) estimaron el valor de Γ cerrando el balance de energía de las olas en condición completamente desarrollado. Esto implica que el valor depende de la entrada de la formulación de entrada de viento que se utiliza. Una descripción alternativa para Whitecapping en SWAN está dado por Van der Westhuysen et al. (2007) y Van der

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Westhuysen (2007), que es una forma adaptada de la expresión de Alves y Banner (2003). Y se llevo a la siguiente expresión:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C'_{ds} \cdot \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{\frac{p}{2}} \cdot (\tanh(kh))^{\frac{(2-p_0)}{4}} \cdot \sqrt{g \cdot k} \cdot E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 30}$$

Con la función de densidad $B(k)$, se calcula con a partir de la variable del espacio de la frecuencia de la siguiente manera:

$$B(k) = \int_0^{2\pi} C_g \cdot k^3 \cdot E(\sigma, \theta) \cdot d\theta \quad \text{Ecuación 31}$$

Y B_r : $1.75 \cdot 10^{-3}$ es un nivel de saturación del umbral. El coeficiente de proporcionalidad se establece como $C'_{ds} = 5.0 \cdot 10^{-5}$. Cuando $B(k) > B_r$, olas rompen y el exponente p se fija igual a un parámetro de calibración p_0 . Para $B(k) < B_r$ no hay rotura, pero se manifiesta algunas disipaciones residuales. Esto se obtiene mediante el establecimiento $P=0$.

Interacción de la ola con el fondo

La disipación inducida por la profundidad puede ser causada por la fricción de fondo, por el movimiento del fondo, por la percolación¹⁷ o por las irregularidades del fondo (Shemdin et al., 1978). Para mares de plataforma continental con fondos arenosos, el mecanismo dominante parece ser la fricción de fondo (por ejemplo, Bertotti y Cavaleri, 1994), que generalmente puede ser representado por:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{fondo} \cdot \frac{\sigma^2}{g^2 \cdot \sinh^2(kd)} \cdot E(\sigma, \theta) \quad \text{Ecuación 32}$$

En el que C_{fondo} es el coeficiente de fricción. Se han propuesto numerosos modelos de fricción de fondo. Sin embargo, en SWAN se han implementado las formulaciones más simples de cada tipo de los modelos de oleaje: el modelo empírico JONSWAP de Hasselmann et al. (1973), el modelo de arrastre turbulento de Collins (1972) y el modelo de viscosidad de remolino de Madsen et al. (1988).

Rotura de oleaje debido a la profundidad

El término debido a la rotura por disminución de la profundidad no está suficientemente estudiado y no se sabe mucho sobre el modelado espectral de este fenómeno. Sin embargo, en SWAN se utiliza el modelo de Battjes y Janssen (1978).

¹⁷ Paso lento de los fluidos a través de los materiales porosos

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = -\frac{D_{tot}}{E_{tot}} \cdot E(\sigma, \theta)$$

Ecuación 33

Donde D_{tot} , es la tasa de disipación de la energía total y depende de la máxima altura de ola, $H_{m\acute{a}x}$ y E_{tot} , es la energía total de la ola. En agua someras $H_{m\acute{a}x}$ se puede calcular por medio $\gamma=H_{m\acute{a}x}/d$ (en el que $H_{m\acute{a}x}$ debe estar a una profundidad d). En Delft3D-WAVE, un valor constante está disponible igual $\gamma=0.73$ (un valor medio de la serie de datos de Battjes y Stive, 1985).

INTERACCIÓN NO LINEAL OLA-OLA

Interacciones entre cuádrupletes

Hasselmann (1962, 1963a,b) encontró que en aguas profundas las interacciones no lineales que dominan son las debidas a grupos de 4 olas o cuádrupletes (quadruplets). En SWAN los cálculos se realizan con la aproximación de interacción discreta (DIA) de Hasselmann et al. (1985).

Interacción entre triadas

Eldberky y Battjes (1985) consiguieron una aproximación computacionalmente asequible para el cálculo de las interacciones triádicas (interacción entre 3 olas): el DTA (aproximación discreta triádica). Partiendo del DTA, Elderbeky (1996) presentó una formulación algo diferente para calcular las interacciones triádicas que fue llamada LTA (Lumped Triad Approximation). Los resultados obtenidos con esta aproximación mejoran ligeramente los obtenidos por el DTA, por lo que es la aproximación implementada en SWAN.

SET-UP

Para calcular el set-up, puede ser suficiente considerar la divergencia de la ecuación de balance del momento. Si la divergencia de la aceleración en la ecuación resultante es ignorada, el resultado es:

$$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(g \cdot d \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(g \cdot d \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0$$

Ecuación 34

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.3 ANEXO 3

11.3.1 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

A continuación se mostrarán las figuras de correlación para el caso A de H_s del ADCP comparada con la H_s simulada del Delft3D-WAVE.

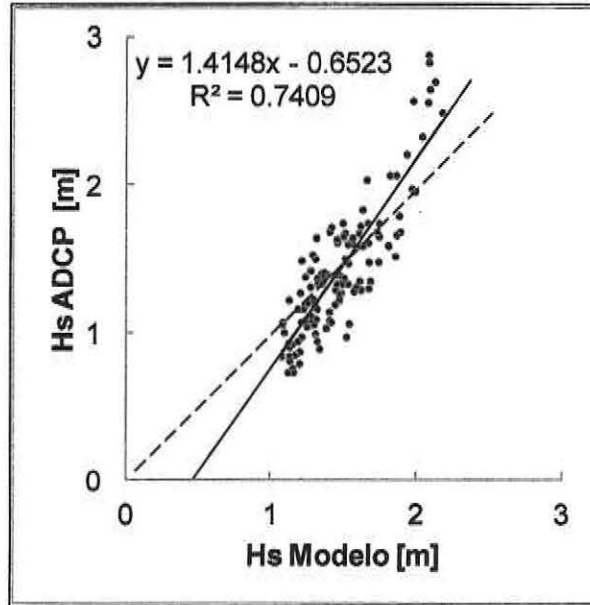


Figura 11-8 Correlación de H_s , caso A.1

Fuente 92 Elaboración propia

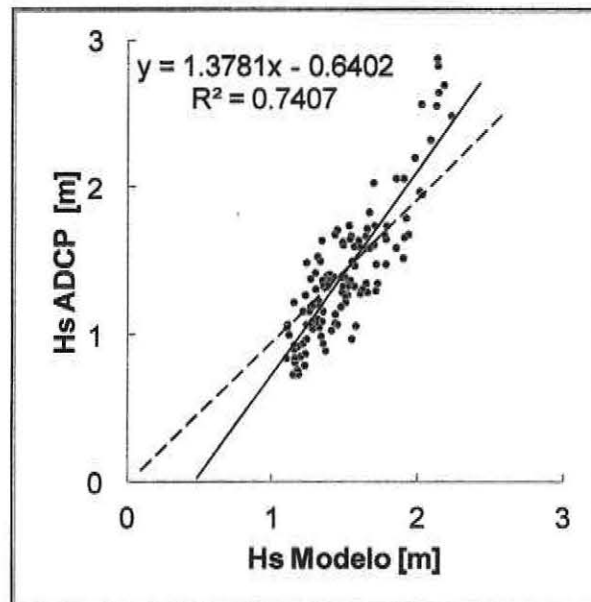


Figura 11-9 Correlación de H_s , caso A.2

Fuente 93 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

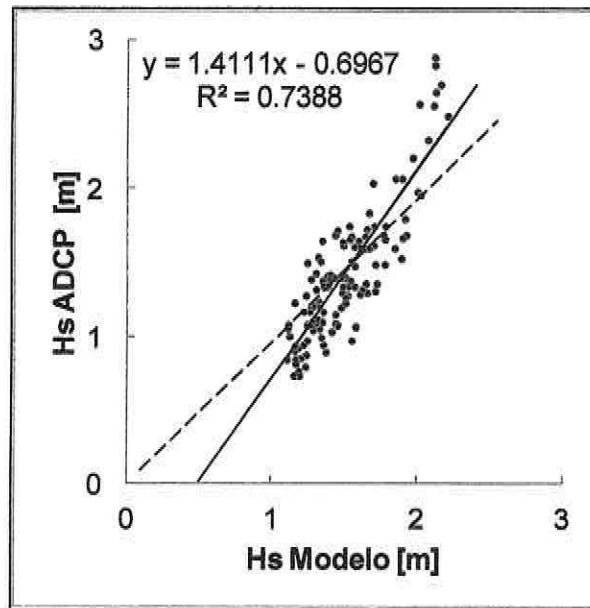


Figura 11-10 Correlación de H_s , caso A.3

Fuente 94 Elaboración propia

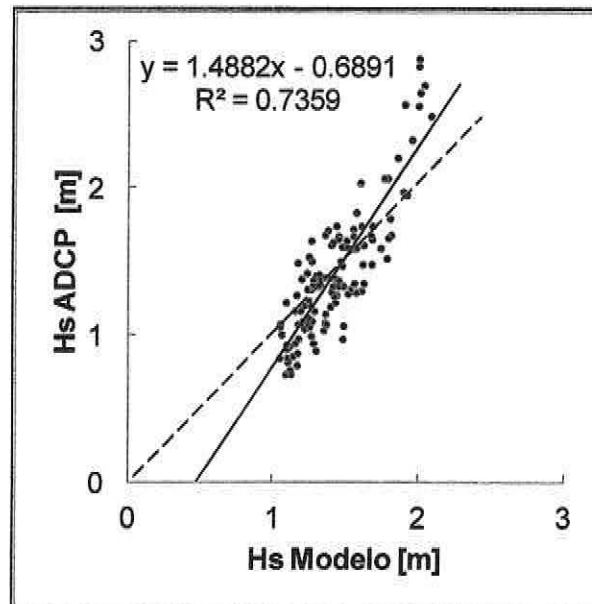


Figura 11-11 Correlación de H_s , caso A.4

Fuente 95 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

En las siguientes figuras se mostrará la correlación de los periodos medios (T_m) del caso A.

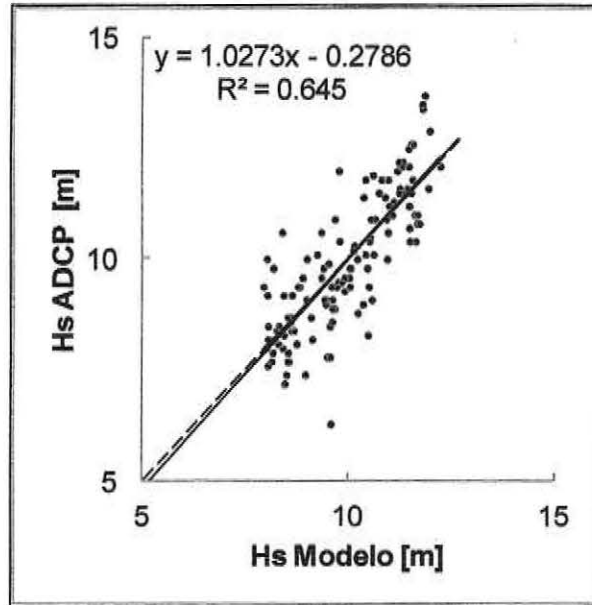


Figura 11-12 Correlación de T_m , caso B.1

Fuente 96 Elaboración propia

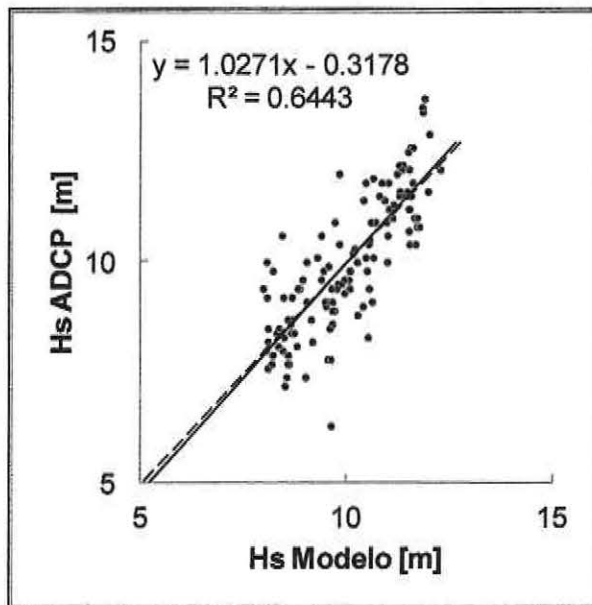


Figura 11-13 Correlación de T_m , caso B.2

Fuente 97 Elaboración propia

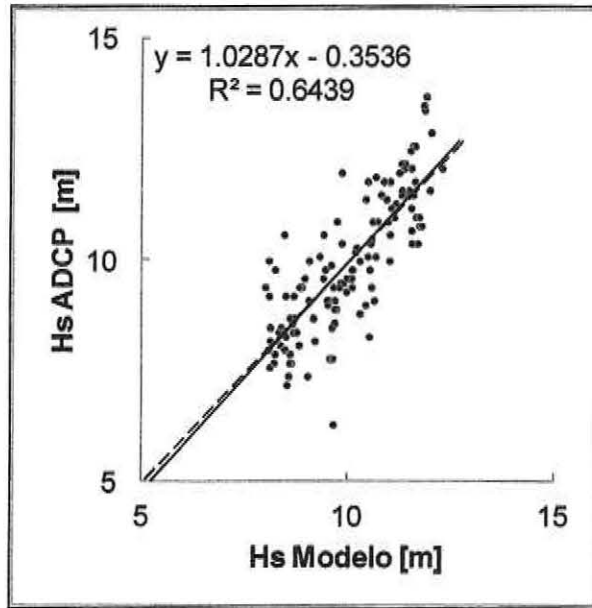


Figura 11-14 Correlación de T_m , caso B.3

Fuente 98 Elaboración propia

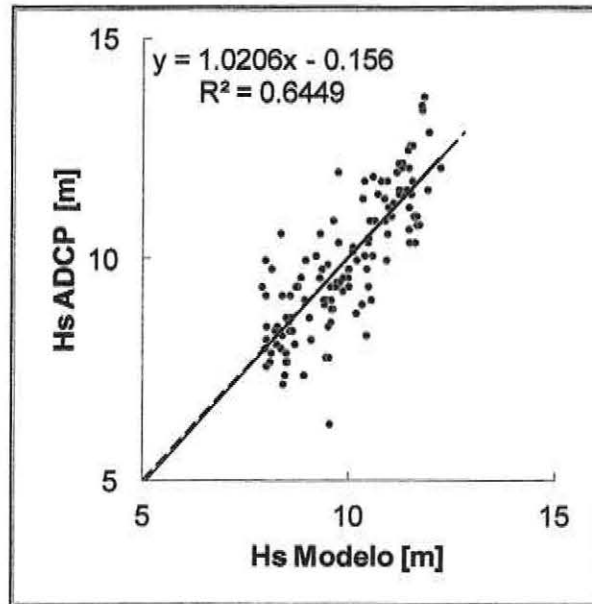


Figura 11-15 Correlación de T_m , caso B.4

Fuente 99 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Para el caso B, se tendrá las siguientes figuras de correlaciones de H_s .

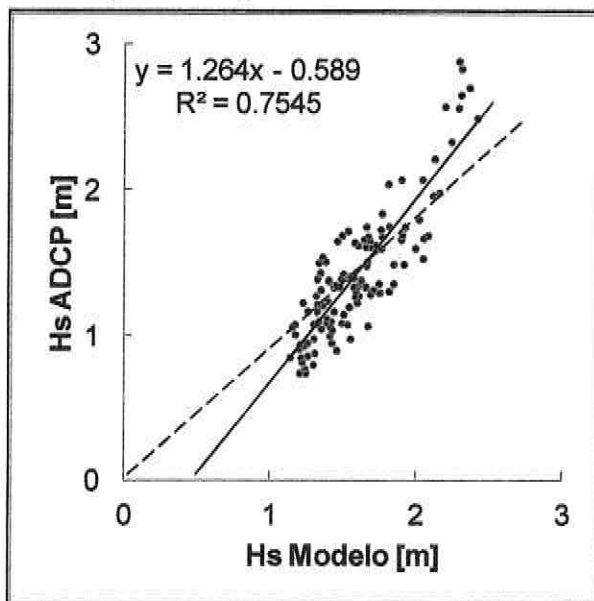


Figura 11-16 Correlación de H_s , caso B.1

Fuente 100 Elaboración propia

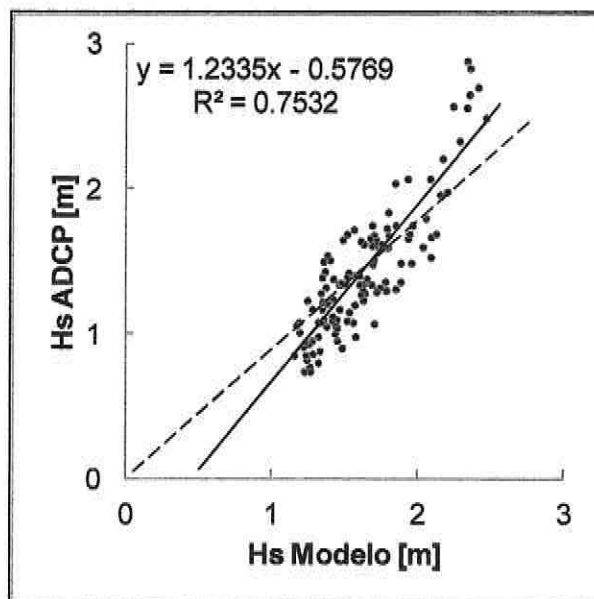


Figura 11-17 Correlación de H_s , caso B.2

Fuente 101 Elaboración propia

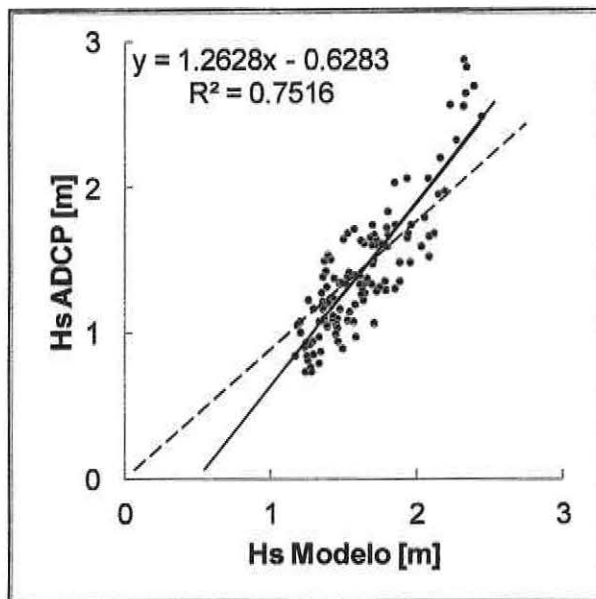


Figura 11-18 Correlación de H_s , caso B.3

Fuente 102 Elaboración propia

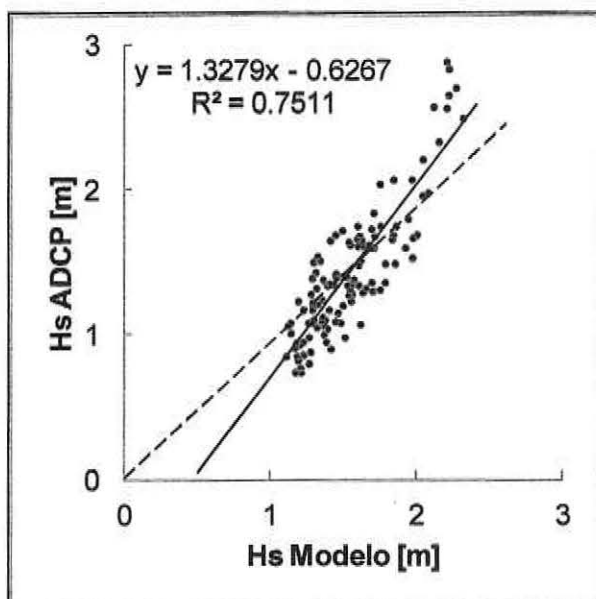


Figura 11-19 Correlación de H_s , caso B.4

Fuente 103 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

En las siguientes figuras se tendrán las correlaciones de T_m .

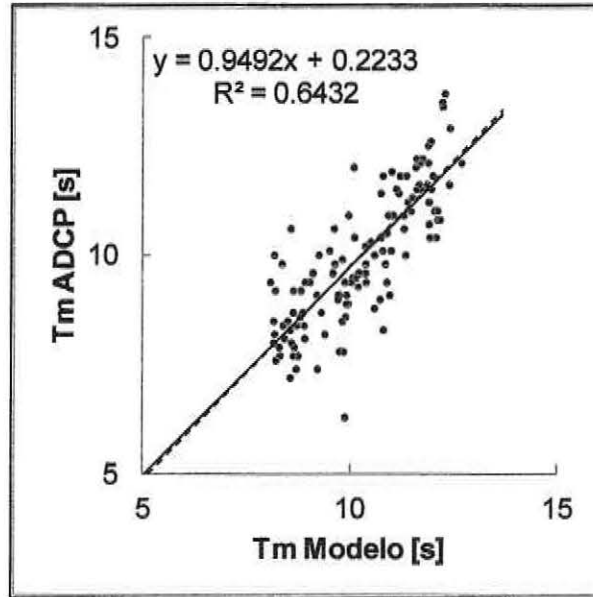


Figura 11-20 Correlación de T_m , caso B.1

Fuente 104 Elaboración propia

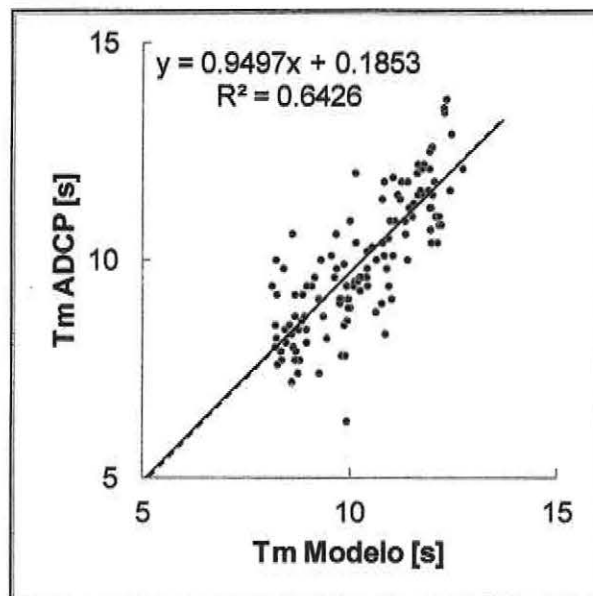


Figura 11-21 Correlación de T_m , caso B.2

Fuente 105 Elaboración propia

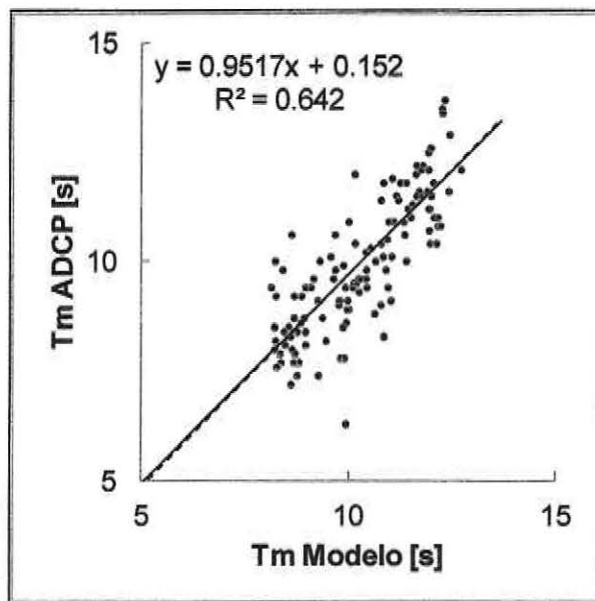


Figura 11-22 Correlación de T_m , caso B.3

Fuente 106 Elaboración propia

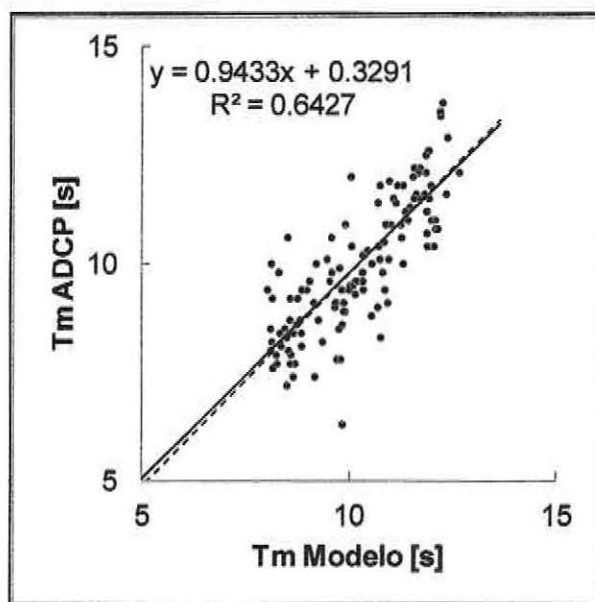


Figura 11-23 Correlación de T_m , caso B.4

Fuente 107 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

En las siguientes figuras se mostrarán la serie de tiempo desde el 18 de Octubre al 17 de Noviembre del 2011. A continuación se verán los datos de H_s del ADCP y de los casos A simulados.

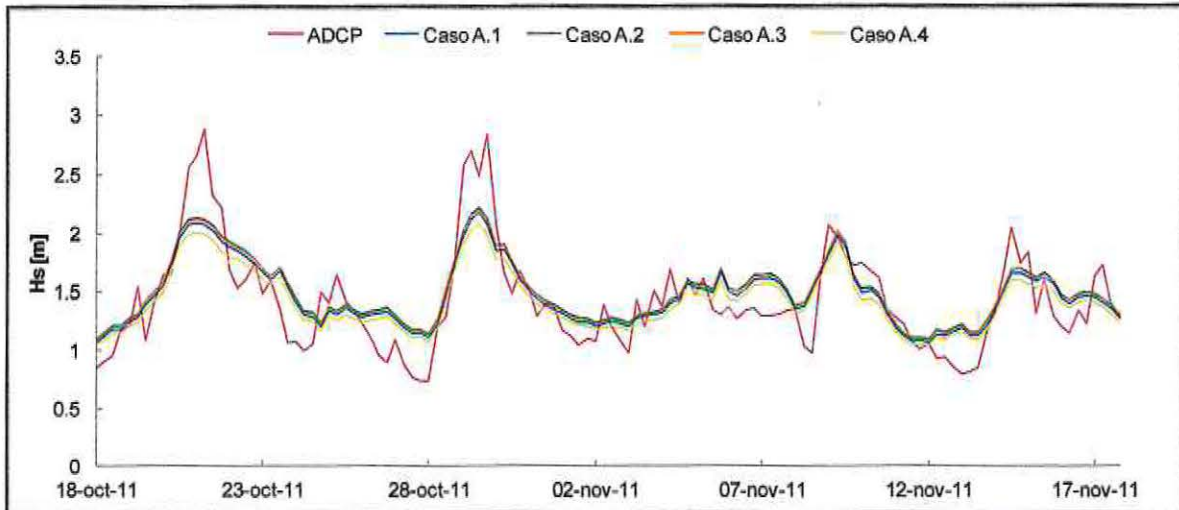


Figura 11-24 Serie de tiempo de H_s del caso A

Fuente 108 Elaboración propia

A continuación se verán los datos de T_m del ADCP y de los casos simulados

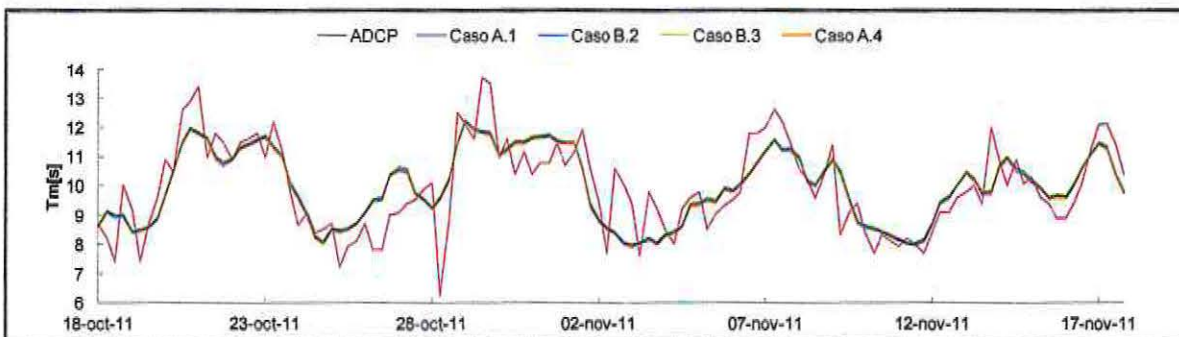


Figura 11-25 Serie de tiempo de T_m del caso A

Fuente 109 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

A continuación se verán los datos de H_s del ADCP y de los casos B simulados.

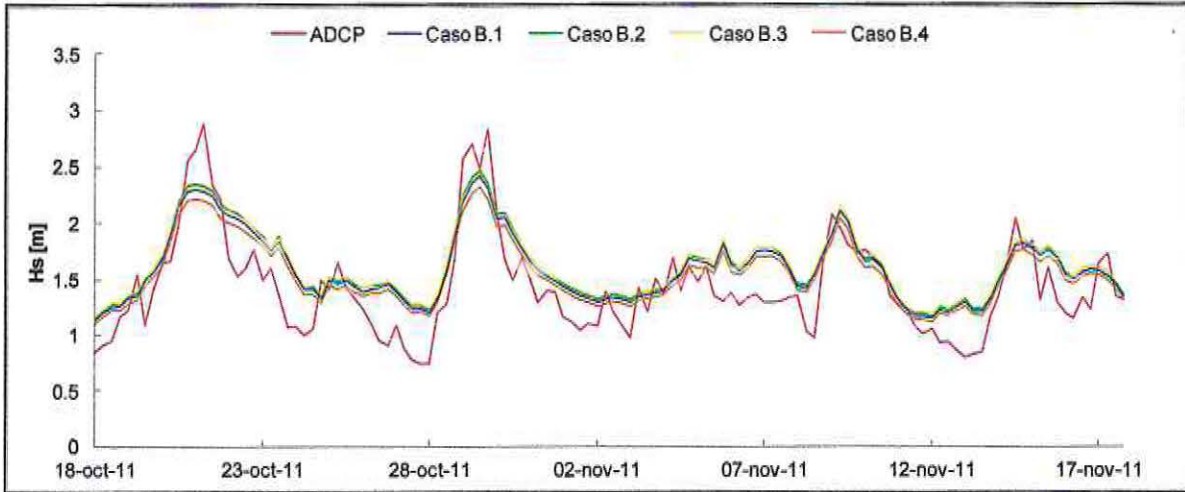


Figura 11-26 Serie de tiempo de H_s del caso B

Fuente 110 Elaboración propia

A continuación se verán los datos de T_m del ADCP y de los casos B simulados.

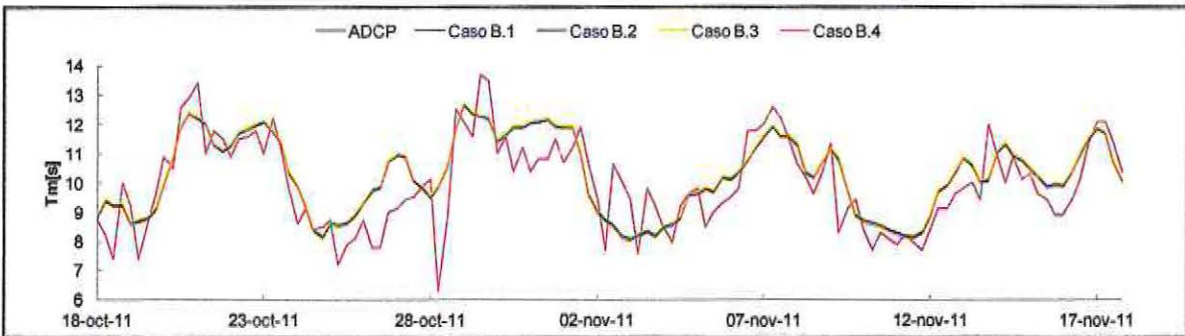


Figura 11-27 Serie de tiempo de T_m del caso B

Fuente 111 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Para completar la información anterior, se mostrarán los valores estadísticos de Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés), coeficiente de correlación (R), Sesgo (bias) y coeficiente de determinación (R^2), expresados en las siguientes tablas.

Tabla 11-1 Estimadores estadísticos para H_s , caso A

Estimadores	Casos A [H_s]			
	A.1	A.2	A.3	A.4
RMSE	0.26	0.26	0.26	0.26
R	0.86	0.86	0.86	0.86
BIAS	0.01	0.07	0.08	0.00
R^2	0.74	0.74	0.74	0.74

Fuente 112 Elaboración propia

Tabla 11-2 Estimadores estadísticos para T_m , caso A

Estimadores	Casos A [T_m]			
	A.1	A.2	A.3	A.4
RMSE	0.92	0.92	0.92	0.92
R	0.81	0.80	0.80	0.81
BIAS	0.04	0.05	0.07	-0.05
R^2	0.65	0.64	0.64	0.65

Fuente 113 Elaboración propia

Tabla 11-3 Estimadores estadísticos para H_s , caso B

Estimadores	Casos B [H_s]			
	B.1	B.2	B.3	B.4
RMSE	0.29	0.30	0.31	0.27
R	0.87	0.87	0.87	0.87
BIAS	0.17	0.20	0.20	0.12
R^2	0.76	0.75	0.75	0.75

Fuente 114 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 11-4 Estimadores estadísticos para T_m , caso B

Estimadores	Casos B [T_m]			
	B.1	B.2	B.3	B.4
RMSE	0.97	0.98	0.98	0.95
R	0.80	0.80	0.80	0.80
BIAS	0.30	0.33	0.35	0.25
R^2	0.64	0.64	0.64	0.64

Fuente 115 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.4 ANEXO 4

11.4.1 CLIMA EXTREMO

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Se escogió el método POT, ya que los valores de altura de ola (Hs) escogidos por máximo anuales son inferiores, como se ve en la Tabla 11-5 y Tabla 11-6:

Tabla 11-5 Orden de tormentas seleccionadas por el método máximo anual, dirección NW

Dirección Nor-Oeste [NW]				
Orden	Fecha	Hs [m]	Tm [s]	Dirm [°]
1	27 de mayo de 2012	5.08	9.53	319.31
2	3 de mayo de 2005	4.80	9.70	315.79
3	20 de junio de 2011	4.73	9.85	303.52
4	3 de junio de 1997	4.72	9.10	318.55
5	7 de junio de 2006	4.50	9.59	305.28
6	28 de mayo de 1999	4.35	10.34	293.8
7	12 de junio de 1996	4.23	9.32	319.8
8	19 de mayo de 1993	4.17	10.44	293.8
9	30 de julio de 2001	4.11	8.19	328.64
10	26 de mayo de 2002	4.07	9.81	301.61
11	2 de septiembre de 2001	4.03	11.54	207.18
12	13 de junio de 2000	3.97	8.65	300.77
13	13 de junio de 2010	3.96	9.01	303.57
14	14 de agosto de 2009	3.93	8.76	303.28
15	5 de junio de 1992	3.93	8.88	313.31
16	5 de junio de 1998	3.83	8.71	319.09
17	21 de mayo de 2003	3.62	8.79	300.67
18	23 de julio de 1995	3.53	9.20	300.67
19	11 de noviembre de 2008	3.48	9.18	212.72
20	23 de mayo de 1994	3.44	8.52	307.2
21	2 de mayo de 1994	3.13	11.12	223.79

Fuente 116 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 11-6 Orden de tormentas seleccionadas por el método máximo anual, dirección SW

Dirección Sur-Oeste [SW]				
Orden	Fecha	Hs [m]	Tm [s]	Dirm [°]
1	13 de agosto de 2012	5.54	14.82	218.29
2	24 de julio de 2010	5.30	14.40	233.24
3	20 de octubre de 1992	5.29	11.80	210.21
4	3 de julio de 2013	5.16	15.31	242.67
5	5 de septiembre de 2007	5.13	14.75	233.61
6	21 de junio de 1997	5.13	13.36	242.72
7	18 de mayo de 2005	5.03	14.50	227.12
8	21 de junio de 1998	5.02	13.22	215.47
9	18 de marzo de 2004	5.01	11.79	214.78
10	18 de junio de 1994	4.97	15.16	236.49
11	10 de septiembre de 2001	4.86	10.44	203.18
12	10 de octubre de 2002	4.85	13.82	227.36
13	26 de marzo de 2011	4.76	11.68	209.75
14	3 de septiembre de 2000	4.72	14.40	216.61
15	22 de agosto de 2003	4.70	10.76	205.08
16	31 de octubre de 2006	4.69	13.72	219.93
17	7 de agosto de 2008	4.66	13.23	217.25
18	5 de mayo de 2009	4.59	10.79	208.58
19	13 de agosto de 1995	4.56	13.16	236.78
20	7 de mayo de 1993	4.52	13.67	229.25
21	19 de septiembre de 1999	4.51	12.04	216.88

Fuente 117 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.5 ANEXO 5

11.5.1 ESTADOS LÍMITES

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

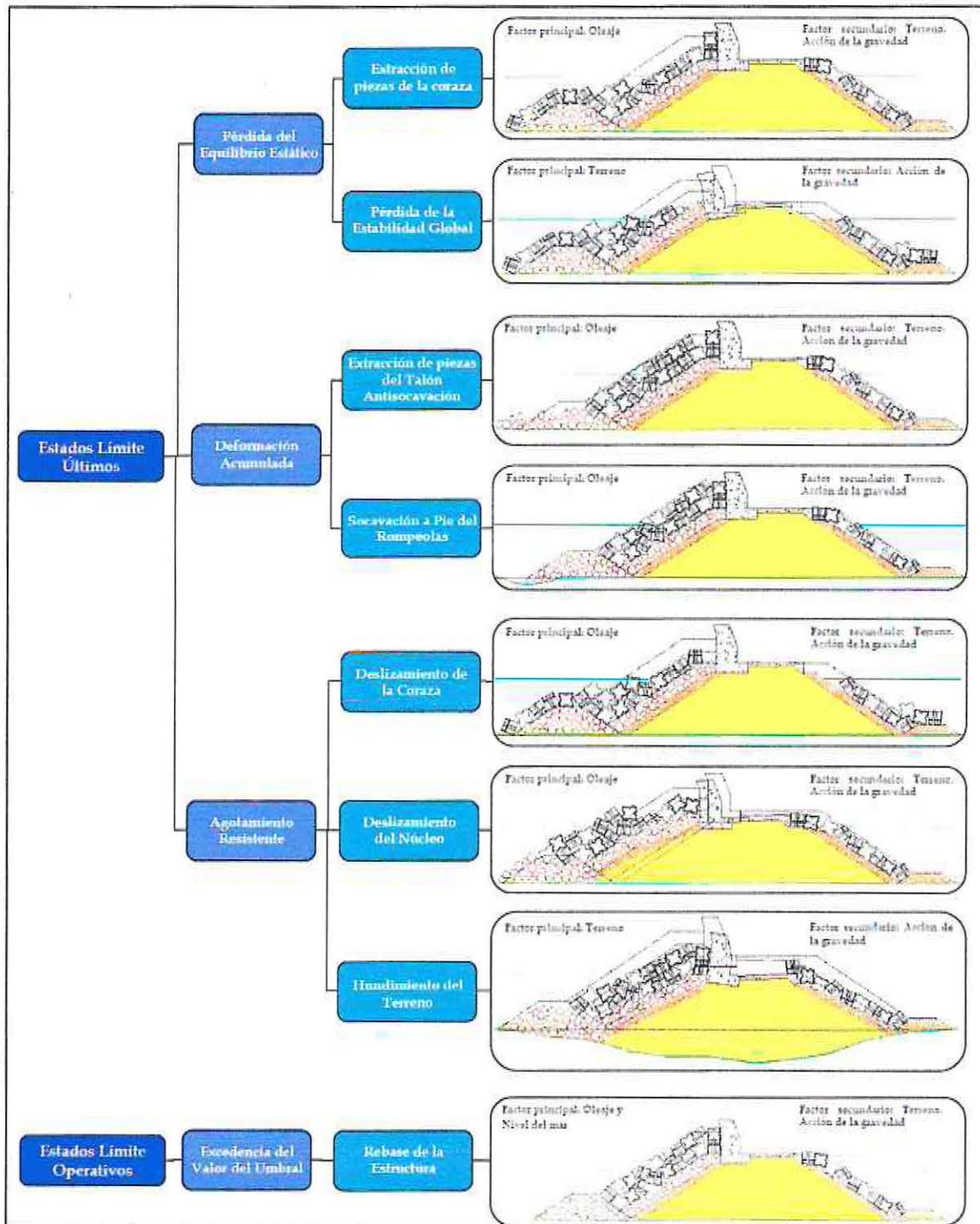


Figura 11-28 Esquema para los estados límites último (ELU) y operativo (ELO)

Fuente 118 (Huidobro, 2009)

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.6 ANEXO 6

11.6.1 RECOMENDACIÓN VIDA ÚTIL

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 11-7 Determinación vida útil mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo

Tipo de obra o instalación	Niveles de seguridad requerido (en años)		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Infraestructura de carácter general	25	50	100
De carácter industrial específico	15	25	50

Fuente 119 (ROM 0.2, 1990)

Leyenda:

Infraestructura de carácter general: Obras de carácter general; no ligada a la explotación de una instalación industrial o de yacimiento concreto.

De carácter industrial específico: Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligada a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo, etc.).

Nivel 1: obras e instalaciones de interés locales o auxiliares.

Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medio ambientales 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, etc.).

Nivel 2: obras e instalaciones de interés general.

Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medio ambientales en caso de rotura.

(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, etc.).

Nivel 3: obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medio ambientales en caso de rotura.

(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, etc.).

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.7 ANEXO 7

11.7.1 RECOMEDACIÓN RIESGO

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 11-8 Determinación del riesgo máximo admisible para la obra

a) <u>Riesgo de iniciación de averías</u>		Posibilidad de pérdidas humanas	
		Reducida	Esperable
Repercusión económica en caso de inutilización de la obra	Baja	0.50	0.30
	Media	0.30	0.20
	Alta	0.25	0.15
b) <u>Riesgo de destrucción total</u>		Posibilidad de pérdidas humanas	
		Reducida	Esperable
Repercusión económica en caso de inutilización de la obra	Baja	0.20	0.15
	Media	0.15	0.10
	Alta	0.10	0.05

Fuente 120 (ROM 0.2, 1990)

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, semi rígidas o de rotura en general reparable (daños menores que un nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de avería.

En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptados como destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.

Leyenda:

Posibilidad de pérdidas humanas:

Reducidas: cuando no es esperable que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daño.

Esperable: cuando es previsible que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daño.

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

11.8 ANEXO 8

11.8.1 CAUDAL ADMISIBLE

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

SEGURIDAD FUNCIONAL		SEGURIDAD ESTRUCTURAL				
DESCARGA MEDIA POR SOBREPASO (l/s/m)	1000	Inseguro a cualquier velocidad	Peligroso	Daño estructural	Daño incluso si está totalmente protegido	Daño incluso con el paseo marítimo pavimentado
					Daño si la pendiente posterior no está protegida	Daño si el paseo marítimo no está pavimentado
					Daño si la coronación no está protegida	
					Ningún daño	
100						
10						
1						
0.1						
0.01		Incómodo pero no peligroso		Daño menor a instalaciones	Ningún daño	
0.001		Húmedo pero no incómodo		Ningún daño		
0.0001						
		VEHÍCULOS	PEATONES	EDIFICIOS	MURO DE DEFENSA COSTERA (Seawall)	REVESTIMIENTOS, MUROS (Seawall)

Figura 11-29 Criterio de caudal admisible de Franco et al. 1994

Fuente 121 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

11.9 ANEXO 9

11.9.1 ESTUDIO DE CANTERAS

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

El siguiente estudio fue elaborado por EPSA para el proyecto “Terminal Costanera Espigón, Puerto de San Antonio” (EPSA, 2011), y detallará la ubicación y características de las canteras más cercanas al puerto de San Antonio.

En la siguiente figura se visualizará los tres lugares que posiblemente suministrarán las rocas necesarias para el proyecto:



Figura 11-30 Ubicación de canteras

Fuente 122 Elaboración propia

CANTERA LO ZÁRATE

▪ Ubicación

Se encuentra ubicada en la localidad de Lo Zárate a 4 km al norte de la carretera 78 que une Santiago con San Antonio y a 21,7 km del puerto de San Antonio

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

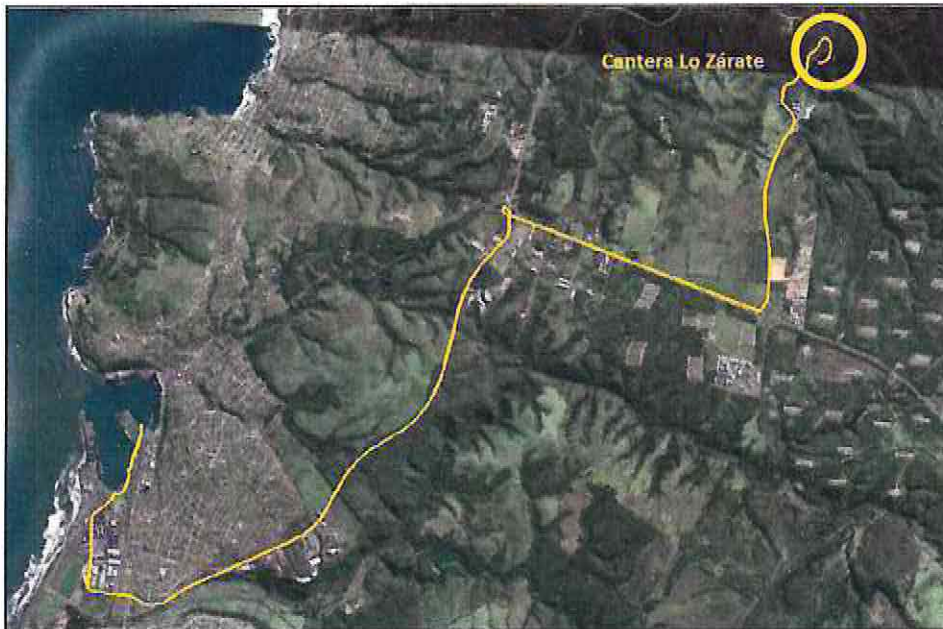


Figura 11-31 Trayecto al puerto de San Antonio

Fuente 123 (EPSA, 2011)

▪ Características

Esta cantera ha provisto material para variadas obras marítimas que se han desarrollado en la provincia de San Antonio.

Presenta un frente de explotación que produce rocas de gran tamaño, sana, no meteorizada del tipo gneiss. Este frente se encuentra limitado en su extremo norte, por material de baja calidad y altamente degradado. Cuenta con una explanada de acopia aledaña al frente de explotación que permite el acopio del material seleccionado y áreas en el sector alto al costado de la carretera, que permite efectuar la clasificación y separación del material.

▪ Comentarios

El sistema de explotación que se utiliza es por medio de arriendo de la cantera con un cobro por derecho a puerta.

No presenta restricciones y la calidad está certificada con ensayos efectuados el año 2005 por motivo de los trabajos de ampliación del Molo Sur del puerto, efectuado por la Dirección de Obras Portuarias (DOP).

Su material fue utilizado, además, en la ampliación del sitio 1 del Molo Sur y en obras de protección de muros costeros en Cartagena.

Entrega material de tamaño superior a 7 [t].

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

CANTERA ROMÁN

▪ Ubicación

Se encuentra ubicada al sur este del puerto de San Antonio, a 14.8 [km] en un costado de un estero que desemboca en el río Maipo.



Figura 11-32 Ubicación de la cantera Román y trayectoria al puerto

Fuente 124 (EPSA, 2011)

Se accede a ella por el camino a las Parcelas, en el sector de San Juan. El ingreso está ubicado a 2.4 km del puente que cruza el estero San Juan y por un camino de tierra que se extiende 1.3 km desde el ingreso.

▪ Características

El material de esta cantera ha sido ocupado para la ejecución de los trabajos de reconstrucción y ampliación del puerto de San Antonio, y diversas obras de defensas fluviales en la zona.

Presenta un frente de explotación, de aproximadamente 50 [m] y una longitud aproximada de 120 [m] para futura explotación, además, en el lecho del estero, que corre por uno de sus

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

costados, presenta grandes frentes de explotación, desde los cuales se han extraído rocas para la ampliación del puerto.

En la actualidad, no se tiene documentos que aporten antecedentes del tipo de roca ni un conocimiento del tipo mineralógico del material que entrega esta cantera, sin embargo, por haber sido utilizado, en el año 1996-1997, en obras de ampliación del puerto por parte de la Dirección de Obras Portuarias, se debe inferir que presenta características adecuadas para su uso en obras marítimas.

El sistema de explotación que se utiliza es por medio de arriendo de la cantera con el pago de derecho a puerta.

▪ **Comentarios**

La característica física de éste material, desde una perspectiva visual, son similares a las que se encuentran en la cantera Lo Zárate, sin embargo, atendiendo a que no se cuenta con antecedentes formales de la calidad y características del material, es recomendable (CIRIA CUR, 2006) a someter a ensayos de: mineralogía, densidad, desgaste de los ángulos, carga de punta y absorción.

CANTERA DEL NEGRO

▪ **Ubicación**

Se encuentra ubicada al sur del puerto de San Antonio, a 3.5 [km] del camino que une San Juan con la ruta 78 y se accede a ella por un costado de la ex planta de Esva que existe en el sector, por un camino de tierra que bordea la ribera norte del río Maipo.

Está ubicada a 12 [km] del puerto de San Antonio.

Es la cantera que presenta mejores condiciones de acceso.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

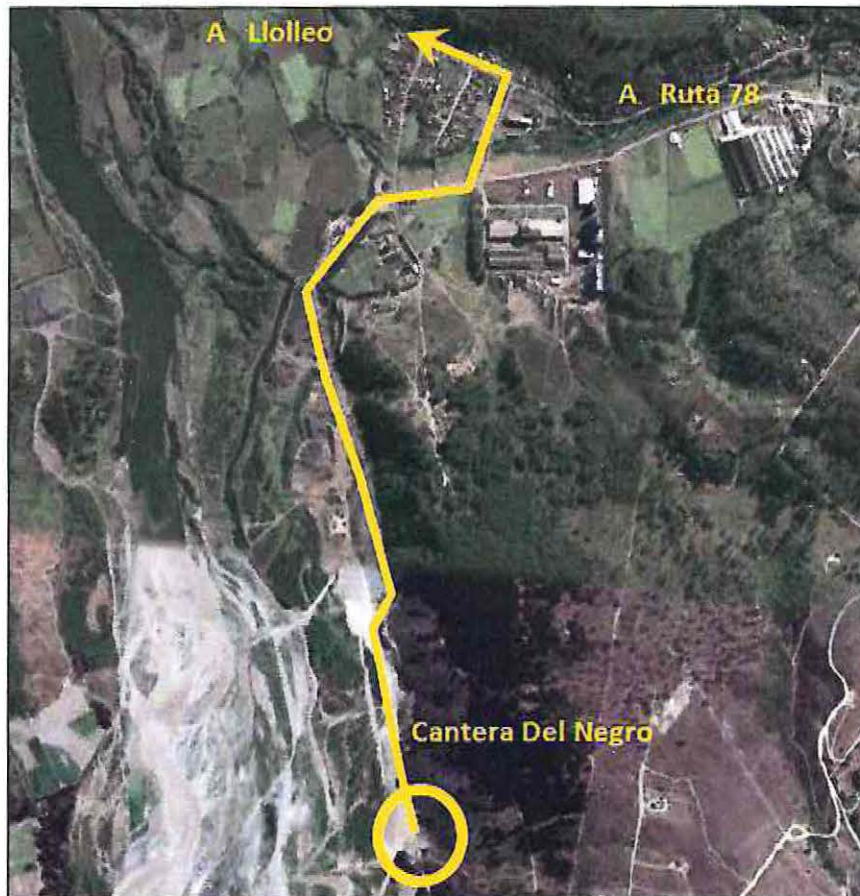


Figura 11-33 Ubicación cantera del Negro

Fuente 125 (EPSA, 2011)

▪ Características

Presenta un frente de explotación de 40 [m] con una altura de 20 [m].

Una inspección ocular del sector en que está instalada permite establecer que tiene alternativas de expansión en un tramo de, aproximadamente 100 [m], sin embargo, para poder efectuar dicha ampliación se debe efectuar un rebaje y retiro del material que cubra los mantos rocosos.

Las características del material, desde la perspectiva de la textura y del color son similares a las que presenta la roca producida en cantera Román. Sin embargo se aprecian sectores de distinta calidad y que presenta características de disgregación.

La explotación es efectuada por el propietario quien vende el producto puesto en camión.

▪ Comentario

Esta cantera, al igual que las anteriores no se encuentra en explotación, sin embargo, ha entregado material para algunas obras de protección fluvial.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Para los trabajos que requieran una producción masiva y constante se deben habilitar explanadas de acopio y selección del material, para lo cual cuenta con superficies disponibles.

Desde el punto de vista ocular, presenta características similares a las producida en cantera Lo Zárate, sin embargo, para validar las características de la roca que produce se deberán efectuar ensayos que permitan determinar su densidad, mineralogía, resistencia de punta, desgaste de los ángales, conforme a los parámetros recomendados (CIRIA CUR, 2006).

GRAVAS E INTEGRAL DE RÍO

En las riberas del rio Maipo se encuentran instaladas empresas proveedoras de material granular, arenas, gravas e integral del río.

Entre las principales se destacan Áridos Santa Gloria y Áridos Río Maipo.

Producen material para las plantas productoras de hormigón y para cubrir las necesidades de áridos, bases estabilizadas, rellenos y hormigón pre-mezclados que se requieren en la zona.

Tienen capacidad actual y futura para producir el material de relleno que las obras exigen, atendiendo que el hecho del río entrega suficiente material.

La calidad del material ha sido probada en diversas oportunidades en las obras marítimas ejecutadas en el puerto.

La distancia promedio que las plantas productoras tienen hasta el puerto es de 10 [km].

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

11.10ANEXO 10

11.10.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIÓN

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Se darán algunas especificaciones técnicas sobre el material que se ocupará en el proyecto, de acuerdo a la norma existente (DOP-ARA, 2013):

ROCA

El material rocoso a utilizar será preferentemente de tipo ígneo o metamórfico, limpio, denso, resistente a la acción del agua de mar, del clima, sin exfoliaciones, exento de trizaduras, inclusiones o daños que afecten sus características estructurales, resistentes a los agentes atmosféricos y con densidad mínima de 2.6 [tonf/m³].

De las rocas ígneas, de tipo: granito, diorita, gabro, riolita, andesita, basalto y sienita, serán adecuadas para conformar la coraza, filtro y núcleo.

Las rocas metamórficas, de tipo: gneis y mármol, serán las adecuadas para las 3 capas de la protección costera.

Los materiales deberán ser sometidos a ensayos que permitan establecer fehacientemente sus características, los cuales a lo menos serán: petrografía, densidad, absorción, resistencia de punta, porosidad y desgaste de los ángulos (con un máximo del 15%).

De acuerdo a la construcción se tendrá las siguientes especificaciones de mayor relevación:

- El 60% de las rocas deberá ser superior al W_{50} . No se aceptará un sobretamaño mayor al 15% de lo indicado en el proyecto.
- La capa final de enrocado será colocada con precisión, gradualmente, unidad por unidad desde la base inferior del talud y sólo cuando ha sido colocada totalmente la capa inferior. No se aceptarán rocas que sobresalgan excesivamente del talud de proyecto, aceptándose como máximo 1/5 de la longitud mayor de la roca a colocar.
- El eje mayor de los enrocados será instalado en forma perpendicular a la pendiente del talud de diseño.
- La relación entre tamaño mayor y menor de cada unidad no será mayor de 2.5.

MOLDAJES Y HORMIGÓN

El diseño, construcción, montaje y mantención de todos los moldajes para el hormigón, incluyendo arrostamientos, se realizará de acuerdo con la norma ACI 347.

En general, los moldes deberán ser resistentes, estables y rígidos, y garantizar la estanqueidad de las juntas entre sus elementos.

Por otro lado, el hormigón en su dosificación deberá considerar una dosis mínima de cemento de 425 [kg por m³] o aditivos que aseguren la impermeabilidad del hormigón y su resistencia a los agentes agresivos del mar.

Para la colocación de los elementos prefabricados debe considerar lo siguiente:

- El transporte desde el lugar de fabricación al de colocación se efectuara mediante el sistema que eviten golpes y movimientos bruscos, por lo cual se deberán afianzar convenientemente.
- No se aceptará que sean descargados mediante volteo desde el camión u otro medio de transporte
- No se aceptará la colocación de elementos que presenten daños en su sección o desprendimiento que afecte su peso.

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.11ANEXO 11

11.11.1 DIÁMETRO NOMINALES DE LOS ELEMETOS DE CORAZA

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Diámetro nominal de la roca

De acuerdo al peso calculado por Hudson (1974) se podrá calcular el diámetro promedio nominal (D_{n50}) de la Roca, expresado en la siguiente tabla:

Tabla 11-9 Cálculo del diámetro nominal de la roca (D_{n50})

Altura de ola [m]	Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]	D_{n50} [m]
2.99	rugosa angular	rota	1.50	2.00	5.5	1.3
			2.00		4.1	1.2
		no rota	1.50	4.00	2.8	1.0
			2.00		2.1	0.9

Fuente 126 Elaboración propia

Parámetros de forma de un elemento pre fabricado

En el caso de los elementos prefabricados, no tienen un diámetro promedio nominal, por ser elementos regulares. Se recomendarán los siguientes parámetros de forma:

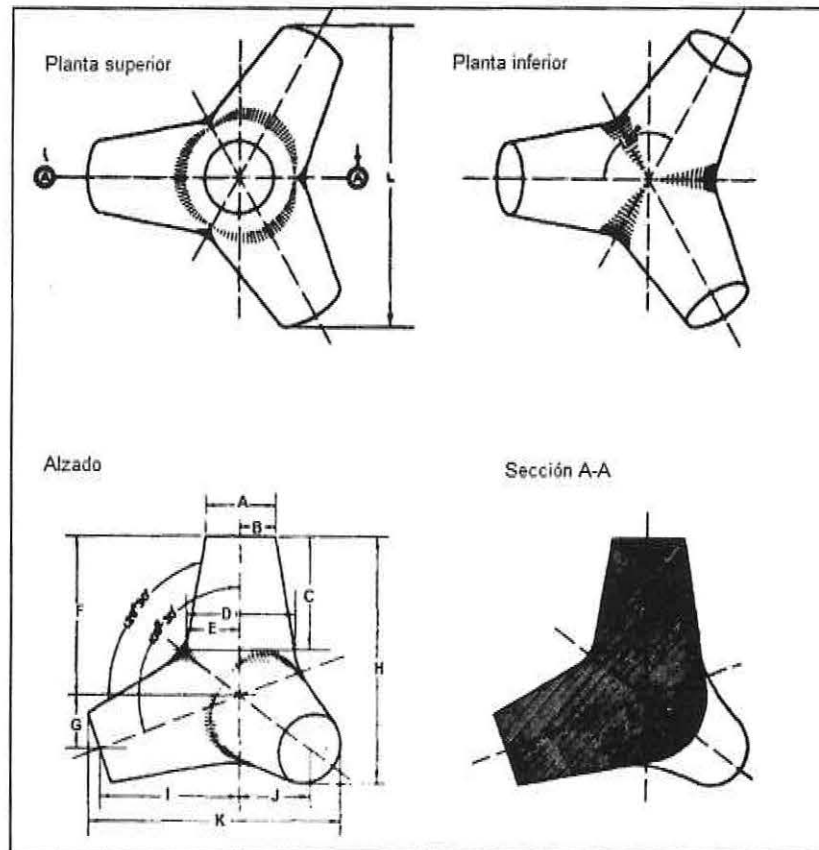


Figura 11-34 Características generales del elemento Tetrápodos

Fuente 127 (USACE, Shore Protection Manual, 1984)

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Cumpliendo las siguientes relaciones geométricas de las piezas (USACE, Shore Protection Manual, 1984):

$$V=0.28 \cdot H^3 \quad F=0.644 \cdot H$$

$$A=0.302 \cdot H \quad G=0.215 \cdot H$$

$$B=0.151 \cdot H \quad I=0.606 \cdot H$$

$$C=0.477 \cdot H \quad J=0.303 \cdot H$$

$$D=0.470 \cdot H \quad K=0.109 \cdot H$$

$$E=0.235 \cdot H \quad L=1.201 \cdot H$$

De acuerdo al volumen en función del peso:

Tabla 11-10 Volumen del elemento prefabricado, Tetrápodos

Altura de ola [m]	Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]	V [m ³]
2.99	Tetrápodos	rota	1.50	7.00	2.5	1.0
			2.00		1.9	0.9
		no rota	1.50	8.00	2.2	1.0
			2.00		1.7	0.9

Fuente 128 Elaboración propia

Se obtendrán los siguientes resultados geométricos

Tabla 11-11 Dimensionamientos geométricos de las piezas de Tetrápodos

V [m ³]	1.0	0.9	1.0	0.9
H [m]	1.5	1.5	1.5	1.5
A [m]	0.5	0.4	0.5	0.4
B [m]	0.2	0.2	0.2	0.2
C [m]	0.7	0.7	0.7	0.7
D [m]	0.7	0.7	0.7	0.7
E [m]	0.4	0.3	0.4	0.3
F [m]	1.0	1.0	1.0	0.9
G [m]	0.3	0.3	0.3	0.3
I [m]	0.9	0.9	0.9	0.9
J [m]	0.5	0.5	0.5	0.4
K [m]	1.7	1.6	1.7	1.6
L [m]	1.8	1.8	1.8	1.8

Fuente 129 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Para el caso de los elementos Dolos, se tendrá el siguiente esquema

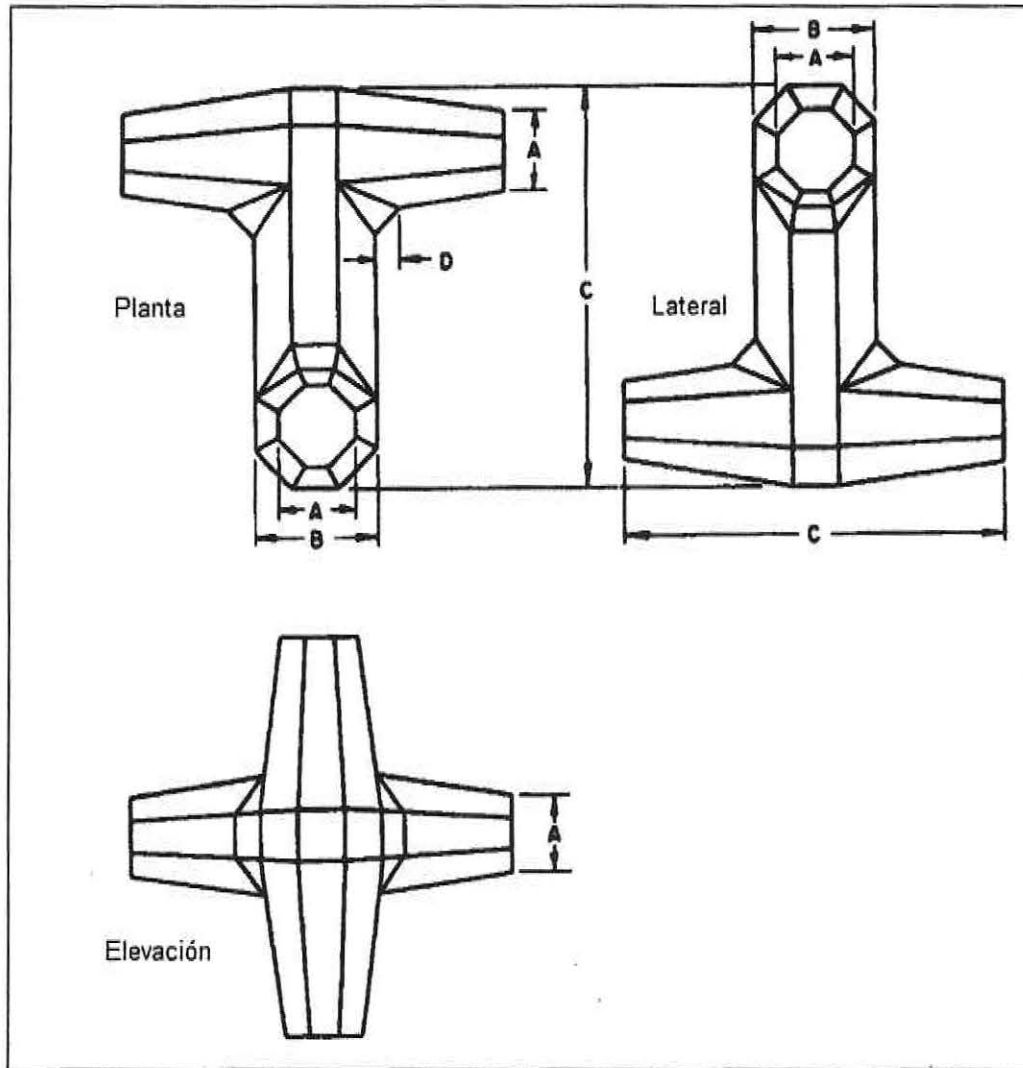


Figura 11-35 Características generales del elemento Dolo

Fuente 130 (USACE, Shore Protection Manual, 1984)

Cumpliendo las siguientes relaciones geométricas de las piezas (USACE, Shore Protection Manual, 1984):

$$V=0.16 \cdot C^3$$

$$A=0.20 \cdot C$$

$$B=0.32 \cdot C$$

$$D=0.057 \cdot C$$

$$E=0.364 \cdot C$$

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

De acuerdo al volumen en función del peso:

Tabla 11-12 Volumen del elemento prefabricado, Dolos

Altura de ola [m]	Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]	V [m ³]
2.99	Dolos	rota	2.00	8.00	1.7	0.7
		no rota	2.00	16.00	0.9	0.4

Fuente 131 Elaboración propia

Se obtendrán los siguientes resultados geométricos

Tabla 11-13 Dimensionamientos geométricos de las piezas de Dolos

V [m ³]	0.7	0.4
C [m]	1.63	1.32
A [m]	0.33	0.26
B [m]	0.52	0.42
D [m]	0.09	0.08
E [m]	0.59	0.48

Fuente 132 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

11.12ANEXO 12

11.12.1 ALTERNATIVAS DE PERFILES

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Tabla 11-14 Protección de escollera

Capas	$W_{n_{\min}}$	$W_{n_{50}}$	$W_{n_{\max}}$
Coraza	3.1 tonf	4.1 tonf	5.2 tonf
Filtro	400 kgf	500 kgf	700 kgf
Núcleo	2.3 kgf	7.8 kgf	13.2 kgf
Cotas			
Coronamiento	+8.1 m NRS		
Profundidad	-1.2 m NRS		
Espesores			
Coraza	2.5 m		
Filtro	1.5 m		

Fuente 133 Elaboración propia

Tabla 11-15 Protección con elementos de Dolos

Capas	W_{\min}	W_{50}	W_{\max}
Coraza		1.7 tonf	
Filtro	116 kgf	221.3 kgf	332 kgf
Núcleo	2.3 kgf	7.8 kgf	13.2 kgf
Cotas			
Coronamiento	+8.5 m NRS		
Profundidad	-1.2 m NRS		
Espesores			
Coraza	1.5 m		
Filtro	1.0 m		

Fuente 134 Elaboración propia

Tabla 11-16 Protección con elementos de Tetrápodos

Capas	W_{\min}	W_{50}	W_{\max}
Coraza		1.9 tonf	
Filtro	95 kgf	126.5 kgf	190 kgf
Núcleo	2.3 kgf	7.8 kgf	13.2 kgf
Cotas			
Coronamiento	+7.8 m NRS		
Profundidad	-1.2 m NRS		
Espesores			
Coraza	2.0 m		
Filtro	1.0 m		

Fuente 135 Elaboración propia

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

11.13ANEXO 13

11.13.1 DISEÑO ESTRUCTURAL CONSIDERANDO $Z_{\text{DISEÑO}2}$

"DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO"

Se conocerán otros valores del peso de la coraza, al considerar a una roca del tipo lisa redondeada y una altura de ola de acuerdo al $Z_{\text{diseño}}$ 2, según corresponda en la Tabla 11-17, Tabla 11-18 y Tabla 11-19:

Tabla 11-17 Peso de la coraza de escollera con Hudson (1974)

Altura de ola [m]	Tipo de Canto	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]	Peso _{Máx} [tonf]	Peso _{Min} [tonf]
2.74	rugosa angular	rota	1.50	2.00	4.24	5.30	3.18
			2.00		3.18	3.98	2.39
		no rota	1.50	4.00	2.12	2.65	1.59
			2.00		1.59	1.99	1.19

Fuente 136 Elaboración propia

Tabla 11-18 Peso de la coraza de Dolos con Hudson (1974)

Altura de ola [m]	Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]
2.74	Dolos	rota	2.00	8.00	1.3
		no rota		16.00	0.6

Fuente 137 Elaboración propia

Tabla 11-19 Peso de la coraza de Tetrápodos con Hudson (1974)

Altura de ola [m]	Tipo de elemento	Naturaleza de la ola	Talud (cot α)	Kd	Peso [tonf]
2.74	Tetrápodos	rota	1.50	7.00	2.0
			2.00		1.5
		no rota	1.50	8.00	1.7
			2.00		1.3

Fuente 138 Elaboración propia

“DISEÑO DE PROTECCIÓN COSTERA EN EL MOLO SUR, PUERTO DE SAN ANTONIO”

Para el caso de la fórmula de Van der Meer (1988), se cambiará solo el tipo de oleaje con respecto a un nivel de $Z_{\text{diseño}} 2$, como se ve en la Tabla 11-20 y Tabla 11-21:

Tabla 11-20 Peso de la coraza de escollera con Van der Meer (1988)

$H_{2\%}$	T_m [s]	Horas	N	S	P	cot α	Peso [tonf]	Peso _{Máx} [tonf]	Peso _{Mín} [tonf]
3.84	11	21	5815	2	0.4	2.0	2.8	3.5	2.1
						1.5	4.4	5.4	3.3
		27	7475	2.0	3.1	3.8	2.3		
				1.5	4.7	5.9	3.5		

Fuente 139 Elaboración propia

Tabla 11-21 Peso de la coraza de Tetrápodos con Van der Meer (1988)

T_m [s]	$H_{2\%}$	Tipo de elemento	N_{od}	Peso [tonf]
11	3.84	Tetrápodos	0.00	3.0

Fuente 140 Elaboración propia