



**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
VALPARAÍSO**

**“DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR LA
OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU, VI
REGIÓN, CHILE”**

MARÍA JOSÉ GANGAS RAMÍREZ

2011

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
VALPARAÍSO**

“DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD
DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU, VI REGIÓN, CHILE”

MARÍA JOSÉ GANGAS RAMÍREZ

COMISIÓN EVALUADORA	CALIFICACIONES	
	Nota	Firma
PROFESOR GUÍA SR. MATÍAS QUEZADA	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE SR. MAURICIO REYES	_____	_____
PROFESOR INTEGRANTE SR. FELIPE CASELLI	_____	_____

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

VIÑA DEL MAR, CHILE
2011

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no han sido presentados 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 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 propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Matías Quezada Labra
Profesor Guía

María José Gangas Ramírez
Alumna Memorista

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer a mi profesor guía Don Matías Quezada Labra, quien gentilmente respondió mis numerosas dudas cada vez que las tenía, sin su ayuda no podría haber realizado mi memoria de título.... ¡Muchas Gracias!

También quiero agradecer a la Dirección de Obras Portuarias, en especial a Don Guillermo Jaramillo, por facilitarme información para el desarrollo de esta memoria.

A mi compañero y amigo Cristian Santander, por su gran ayuda y preocupación en la realización de mi proyecto de título.

A mis amigas y amigos Nicole Escudero, Macarena Faúndez, Rosario Chesta, Pía Monreal, Celeste Bunster, Felipe Rifo y Jorge Gómez por su constante ánimo y preocupación.

A Wladimir Altamirano, por siempre estar ahí preocupado e interesado por mis asuntos, por darme todo el amor que me das y que también siento por ti, muchas gracias por hacerme tan feliz.

Gracias a mi familia, por su cariño, preocupación y apoyo a lo largo de mi carrera como también en la finalización de esta con mi memoria de título.

A mis padres, Fernando Gangas Muñoz y Ana María Ramírez Olmos, muchas gracias por todo lo que me han dado durante toda mi vida. Todos los logros que he tenido y que tendré son en forma de agradecimiento por lo mucho que he recibido por parte de ustedes, lo que mas quiero es que se sientan la mitad de orgullosos de lo que yo me siento de ustedes. Los amo.

Finalmente agradezco a todos los que han contribuido con la realización de esta memoria.

¡¡GRACIAS TOTALES!!
María José Gangas Ramírez

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR
LA OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU,
VI REGIÓN CHILE

*Dedicada a mis padres, Fernando Gangas y Ana María Ramírez,
sin su ayuda y guía no sería la persona que soy hoy.*

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1-1
2	OBJETIVOS	2-3
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	2-3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2-3
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3-4
3.1	OLEAJE	3-4
3.1.1	DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ONDAS	3-4
3.1.2	ONDAS PRODUCIDAS POR VIENTO	3-5
3.1.3	TEORÍAS DE ONDAS.....	3-7
3.2	TRANSFERENCIA ESPECTRAL DE OLEAJE.....	3-12
3.2.1	TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE	3-12
3.2.2	DEFINICIÓN ESPECTRAL DEL OLEAJE.....	3-18
3.2.3	ESPECTROS DE FRECUENCIAS MÁS UTILIZADOS	3-20
3.2.4	METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL	3-23
3.3	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	3-25
3.3.1	GENERALIDADES.....	3-25
3.3.2	TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS	3-26
3.3.3	TRANSPORTE TRANSVERSAL DE SEDIMENTOS	3-28
3.4	OBRAS DE ABRIGO.....	3-31
3.4.1	CONCEPTO DE DIQUES.....	3-31
3.4.2	DIQUE EN TALUD	3-35
3.4.3	DIQUE VERTICAL	3-39
4	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO	4-41
4.1	OLEAJE	4-41
4.1.1	GENERALIDADES.....	4-41
4.1.2	METODOLOGÍA	4-42
4.1.3	ANÁLISIS DE CLIMA OPERACIONAL	4-48
4.1.4	ANÁLISIS CLIMA EXTREMO.....	4-63
4.1.5	CONDICIONES ACTUALES DE OPERATIVIDAD.....	4-69
4.2	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA CONCEPTUAL DE LAS ROCAS DE BUCALEMU.....	4-73
4.2.1	DEFINICIONES.....	4-73
4.2.2	UTILIZACIÓN DE ROCAS.....	4-74
4.2.3	TIPO DE ROCA PRESENTE EN EL LUGAR DE ESTUDIO.....	4-74
4.3	MAREAS.....	4-77
4.3.1	COMPONENTE ASTRONÓMICA.....	4-77
4.3.2	COMPONENTE METEOROLÓGICA.....	4-78
4.4	SEDIMENTOS	4-81
4.4.1	GENERALIDADES.....	4-81
4.4.2	BITÁCORA DE MUESTREO	4-83
4.4.3	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	4-85
4.4.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	4-90
4.4.5	RESULTADOS DE INDICADORES ESTADÍSTICOS	4-93
4.5	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	4-96
4.5.1	ANÁLISIS PREVIOS	4-96
4.5.2	ESTUDIO DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL.....	4-98
4.5.3	DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL	4-104

5	MEJORAMIENTO CALETA BUCALEMU.....	5-109
5.1	GENERALIDADES.....	5-109
5.1.1	DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	5-109
5.1.2	MEJORAS ESPERADAS EN EL FUNCIONAMIENTO.....	5-110
5.2	BASES DE DISEÑO.....	5-111
5.2.1	VIDA ÚTIL.....	5-111
5.2.2	RIESGO.....	5-112
5.2.3	PERIODO DE RETORNO.....	5-113
5.2.4	NIVEL DEL MAR.....	5-113
5.2.5	OLEAJE DE DISEÑO.....	5-113
5.3	DISEÑO DE LAS SECCIONES TÍPICAS.....	5-114
5.3.1	DISEÑO HIDRÁULICO.....	5-114
5.3.2	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	5-119
5.4	MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE AGITACIÓN.....	5-129
5.4.1	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA.....	5-129
5.4.2	OPERATIVIDAD ESPERADA.....	5-132
5.5	EVALUACIÓN Y ELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	5-134
5.5.1	COSTO DE LA ESTRUCTURA.....	5-134
5.5.2	FUNCIONALIDAD DE LA ESTRUCTURA.....	5-137
5.6	DETALLES DE LA ESTRUCTURA ELEGIDA.....	5-138
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	6-140
6.1	RESPECTO DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO.....	6-140
6.2	RESPECTO DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE ABRIGO.....	6-141
6.3	RECOMENDACIONES GENERALES.....	6-142
7	REFERENCIAS.....	7-143
8	ANEXOS.....	8-145
8.1	ANEXO I MODELO MIKE 21 BW.....	8-146
8.1.1	ECUACIONES FUNDAMENTALES.....	8-147
8.1.2	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA.....	8-149
8.1.3	PERIODO DE SIMULACIÓN.....	8-149
8.1.4	NÚMERO DE COURANT.....	8-149
8.2	ANEXO II MODELACIONES STWAVE.....	8-151
8.3	ANEXO III MAPA GEOLÓGICO VI REGIÓN, CHILE.....	8-156
8.4	ANEXO IV RESULTADOS DIQUE VERTICAL.....	8-158

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1 Clasificación de Ondas	3-4
Tabla 3-2 Recomendaciones de Pesos del Filtro para diferentes elementos	3-39
Tabla 3-3 Coeficientes de Reflexión	3-40
Tabla 4-1 Direcciones y Periodos de Propagación en Stwave.....	4-46
Tabla 4-2 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Periodo Offshore (Constitución).....	4-49
Tabla 4-3 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Dirección Off Shore (Constitución).....	4-50
Tabla 4-4 Tabla de Incidencia Dirección v/s Oleaje Off Shore (Constitución)	4-51
Tabla 4-5 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Dirección a 10 [m] de Profundidad.....	4-56
Tabla 4-6 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Periodo a 10 [m] de Profundidad	4-57
Tabla 4-7 Combinatoria a propagar en Mike 21 BW.....	4-58
Tabla 4-8 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Dirección a 3 [m] de Profundidad.....	4-60
Tabla 4-9 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Periodo a 3 [m] de Profundidad	4-61
Tabla 4-10 Resultados de Alturas Significativas y Bandas de Confianza de 95%.....	4-64
Tabla 4-11 Alturas, Direcciones y Periodos de Propagación en Stwave.....	4-65
Tabla 4-12 Parámetros de resumen offshore e inshore.....	4-67
Tabla 4-13 Condiciones Límite de Operación de Buques en Muelles y Pantanales	4-70
Tabla 4-14 Rocas Metamórficas según Roca Inicial.....	4-73
Tabla 4-15 Planos Maréales en Valparaíso, año 2010	4-77
Tabla 4-16 Planos Maréales en Bucalemu, año 2010	4-78
Tabla 4-17 Velocidades del viento con respecto a longitud del Fetch.....	4-79
Tabla 4-18 Datos de la carta de Superficie	4-79
Tabla 4-19 Corrección de los niveles de marea por efecto de presión.....	4-80
Tabla 4-20 Coordenadas Georreferenciadas de los Sectores Muestreados	4-84
Tabla 4-21 Clasificación según Escala Udden-Wentworth	4-85
Tabla 4-22 Diámetros Relevantes para Sector 1, Caleta Bucalemu	4-86
Tabla 4-23 Diámetros Relevantes para Sector 2, Caleta Bucalemu	4-86
Tabla 4-24 Diámetros Relevantes para Sector 3, Caleta Bucalemu	4-87
Tabla 4-25 Diámetros Relevantes para Sector 4, Caleta Bucalemu	4-88
Tabla 4-26 Diámetros Relevantes para Sector Estero, Caleta Bucalemu	4-89
Tabla 4-27 Indicadores Estadísticos, Sector 1	4-93
Tabla 4-28 Indicadores Estadísticos, Sector 2	4-93
Tabla 4-29 Indicadores Estadísticos, Sector 3	4-94
Tabla 4-30 Indicadores Estadísticos, Sector 4	4-94
Tabla 4-31 Indicadores Estadísticos, Sector Estero	4-95
Tabla 4-32 Análisis Estadístico Zona Sumergida Bucalemu.....	4-96
Tabla 4-33 Diámetros Relevantes Zona Sumergida Caleta Bucalemu	4-98
Tabla 4-34 Tabla de Incidencia en Aguas Profundas, Constitución	4-101
Tabla 4-35 Transporte Longitudinal Neto y Bruto por Tabla de Incidencia.....	4-102
Tabla 4-36 Transporte Longitudinal Sector 1	4-103
Tabla 4-37 Transporte Longitudinal Sector 2	4-103
Tabla 4-38 Transporte Longitudinal Sector 3	4-103
Tabla 4-39 Transporte Longitudinal Sector 4	4-103
Tabla 4-40 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 1	4-105
Tabla 4-41 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 2	4-105
Tabla 4-42 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 3	4-105
Tabla 4-43 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 4	4-105
Tabla 4-44 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 1	4-106
Tabla 4-45 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 2	4-106
Tabla 4-46 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 3	4-106
Tabla 4-47 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 4	4-106
Tabla 5-1 Datos de Entrada para calculo de Run Up	5-115

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR
LA OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU,
VI REGIÓN CHILE

Tabla 5-2 Resultados de Sobrepasso para Dique Vertical	5-117
Tabla 5-3 Datos de Entrada Dique Vertical	5-124
Tabla 5-4 Downtime en zona de estudio con y sin obra	5-132
Tabla 5-5 Cotizaciones de Estructuras para Caleta Bucalemu	5-135
Tabla 5-6 Resultados de Cotizaciones por Largo Real de la estructura.....	5-136
Tabla 5-7 Datos de Entrada para cálculo de componentes del dique	5-138
Tabla 5-8 Resultados de Componentes del Dique en Talud.....	5-138
Tabla 8-1 Cálculos Dique Vertical.....	8-160

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Ubicación de Bucalemu	1-1
Figura 1-2 Ubicación de Macizo Rocosos en Caleta Bucalemu.....	1-2
Figura 3-1 Representación Onda Ideal	3-5
Figura 3-2 Comportamiento de Funciones Hiperbólicas	3-6
Figura 3-3 Aplicación de Teorías en diferentes zonas.....	3-8
Figura 3-4 Comparación de ondas en diferentes teorías	3-8
Figura 3-5 Representación de una onda de Airy	3-10
Figura 3-6 Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje (Le Méhauté, 1976)	3-11
Figura 3-7 Esquema de ola refractada.....	3-12
Figura 3-8 Diagrama de Refracción	3-13
Figura 3-9 Esquema de Onda Difractada.....	3-14
Figura 3-10 Reflexión	3-15
Figura 3-11 Tipos de Rotura definidos a partir del Número de Iribarren	3-18
Figura 3-12 Ejemplo de Espectro de Frecuencias.....	3-19
Figura 3-13 Ejemplo de Espectro Direccional	3-19
Figura 3-14 Esquema de transporte longitudinal de sedimentos en una playa	3-26
Figura 3-15 Perfil de Verano e Invierno (Van Rijn, 1998)	3-29
Figura 3-16 Componentes de un Dique de Contención.....	3-31
Figura 3-17 Dique en Talud.....	3-32
Figura 3-18 Dique Vertical.....	3-32
Figura 3-19 Parámetros geométricos de una estructura en talud	3-33
Figura 3-20 Tipos de elementos artificiales de una obra en talud	3-34
Figura 3-21 Permeabilidad de una estructura en talud según Van der Meer (1993).....	3-34
Figura 3-22 Recomendación de Coastal Engineering Manual	3-39
Figura 4-1 Batimetría Final utilizada en Modelo Stwave.....	4-43
Figura 4-2 Ubicación nodo de estadísticas en aguas profundas.....	4-44
Figura 4-3 Malla Detalle anidada a Malla General en Modelo Stwave	4-46
Figura 4-4 Ubicación de punto de extracción de coeficientes, coordenadas 769715,860 E 6163756.940 S, profundidad 10 [m].....	4-47
Figura 4-5 Grilla General y Detalle Dirección 225°	4-52
Figura 4-6 Grilla General y Detalle Dirección 270°	4-53
Figura 4-7 Grilla General y Detalle Dirección 315°	4-54
Figura 4-8 Grilla de Batimetría del Modelo Mike 21 BW	4-59
Figura 4-9 Grilla General y Detalle para Altura Extremal Estimada, D 225° y T 13 [s].....	4-66
Figura 4-10 Buque pesquero estable	4-69
Figura 4-11 Formación Rocosa presente en la Zona de Estudio	4-75
Figura 4-12 Tipo de Roca en Macizo Rocosos, Bucalemu	4-75
Figura 4-13 Caracterización de los Sedimentos.....	4-81
Figura 4-14 Escala de Granulometría Udden-Wentworth (1992)	4-82
Figura 4-15 Sectores Muestreados, Caleta Bucalemu	4-83
Figura 4-16 Escalas de clasificación por Curtosis	4-90
Figura 4-17 Tipos de Curvas de Asimetría.....	4-91
Figura 4-18 Resultados físicos de resultados de desviación estándar	4-92
Figura 5-1 Propuesta de Layout en la Zona de Estudio en metros	5-109
Figura 5-2 Vidas Útiles Recomendadas.....	5-111
Figura 5-3 Riesgos Recomendados Admisibles.....	5-112
Figura 5-4 Parámetros Fórmula de Franco 1999	5-116
Figura 5-5 Cálculo de Sobrepaso de Dique Vertical.....	5-116
Figura 5-6 Valores Críticos de Caudales de Sobrepaso.....	5-118
Figura 5-7 Sección Transversal Dique en Talud	5-123
Figura 5-8 Formula de Sainflou (1928)	5-124

Figura 5-9 Sección Transversal Dique Vertical	5-126
Figura 5-10 Sección Transversal Dique Mixto.....	5-128
Figura 5-11 Grilla con estructura en Mike 21 BW	5-129
Figura 5-12 Coeficientes de Reflexión	5-130
Figura 5-13 Resultado de altura de ola con dique en talud.....	5-131
Figura 5-14 Resultado de altura de ola con dique vertical.....	5-131
Figura 5-15 Resultado de altura de ola con dique mixto.....	5-132
Figura 5-16 Layout con Dique en Talud.....	5-139
Figura 8-1 Modelación Stwave Dirección 202.5°	8-152
Figura 8-2 Modelación Stwave Dirección 247.5°	8-153
Figura 8-3 Modelación Stwave Dirección 292.5°	8-154
Figura 8-4 Modelación Stwave Dirección 337.5°	8-155
Figura 8-5 Mapa Geológico VI Región, Chile	8-157
Figura 8-6 Cargas actuantes sobre un cajón	8-159

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1 Funciones de Transferencia Altura de ola v/s Periodo Peak	4-55
Gráfico 4-2 Funciones de Transferencia Dirección v/s Periodo Peak	4-55
Gráfico 4-3 Altura de Ola v/s Dirección Peak en profundidad 3[m]	4-62
Gráfico 4-4 Altura de Ola v/s Periodo Peak en profundidad 3[m].....	4-62
Gráfico 4-5 Comparación de Distribuciones de Probabilidad.....	4-63
Gráfico 4-6 Resultados de Altura Significativa con Banda de Confianza 95%	4-64
Gráfico 4-7 Parámetros Inshore.....	4-67
Gráfico 4-8 Altura Límite v/s Alturas de Oleaje.....	4-72
Gráfico 4-9 Curva Granulométrica para Zona Sumergida, Caleta Bucalemu	4-97
Gráfico 4-10 Clasificación del Sedimento para Zona Sumergida, Caleta Bucalemu	4-97
Gráfico 4-11 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 1	4-107
Gráfico 4-12 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 2	4-107
Gráfico 4-13 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 3	4-108
Gráfico 4-14 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 4	4-108
Gráfico 5-1 Comparación Elemento Roca Formula de Hudson	5-119
Gráfico 5-2 Comparación Peso de Filtro Inferior y Superior	5-120
Gráfico 5-3 Peso de Núcleo W/200.....	5-120
Gráfico 5-4 Pesos del Pie de Apoyo	5-121
Gráfico 5-5 Ancho Pie de Apoyo.....	5-121
Gráfico 5-6 Alto Pie de Apoyo	5-122
Gráfico 5-7 Comparación de Cotizaciones para las 3 Tipologías	5-136
Gráfico 5-8 Probabilidades de Excedencia para Situaciones con y sin obra.....	5-137
Gráfico 6-1 Alturas de Ola con presencia de Rompeolas en Talud v/s Alturas Límites	6-141

RESUMEN

El presente documento consiste en el proyecto de título llamado “Diseño de Estructura de Abrigo para Mejorar la Operatividad de la Caleta de Pescadores Bucalemu, VI Región, Chile”, el cual ha sido abordado en tres puntos principales: Clima de Oleaje, Transporte de Sedimentos y por último Diseño de Estructura de Abrigo.

En el primer punto, Clima de Oleaje, se caracterizó el medio determinando las condiciones naturales existentes en el sector de estudio, para así analizar las causas que determinan la baja operatividad en la zona y proponer alternativas de solución.

En el segundo punto, Transporte de Sedimentos, se definió el tipo de grano presente en la zona y si el movimiento de material arenoso, producto del oleaje, afecta la productividad de la caleta.

Finalmente, como solución, se diseñó una estructura de abrigo para disminuir el oleaje incidente y además que cumpliera con las alturas límites de operatividad para el tipo de embarcaciones presente en la zona de estudio.

1 INTRODUCCIÓN

La sexta región tiene una superficie de 16.387 km², limitando al norte con la V y Metropolitana y al sur con la VII.

La economía regional gira en torno a los rubros minero y agrícola, teniendo la pesca un papel muy secundario tanto en la participación en el producto regional como en la generación de empleo. Como lineamiento estratégico, la autoridad regional privilegia el desarrollo de la actividad turística, que podría impactar positivamente sobre la pesca artesanal.

Todos los enclaves con actividad pesquera se ubican en la provincia Cardenal Caro, la única que tiene salida al mar. Esta provincia posee una población de 41.160 habitantes. Tiene una superficie de 3.295,07 km². Su capital es Pichilemu, principal ciudad turística y balneario de la región.

El proyecto a realizar se centrará en la localidad de Bucalemu, en específico en su caleta, que se ubica a 37 Km. al sur de Pichilemu, el pequeño poblado está fuertemente vinculado a la actividad pesquera y alguera, con una presencia turística estacional menor. La caleta concentra la gran mayoría de la actividad pesquera de la región. Cuenta con alrededor de 169 pescadores artesanales inscritos (información del 10 Julio, 2011 obtenida en SernaPesca), además dispone de infraestructura terrestre de buena calidad.

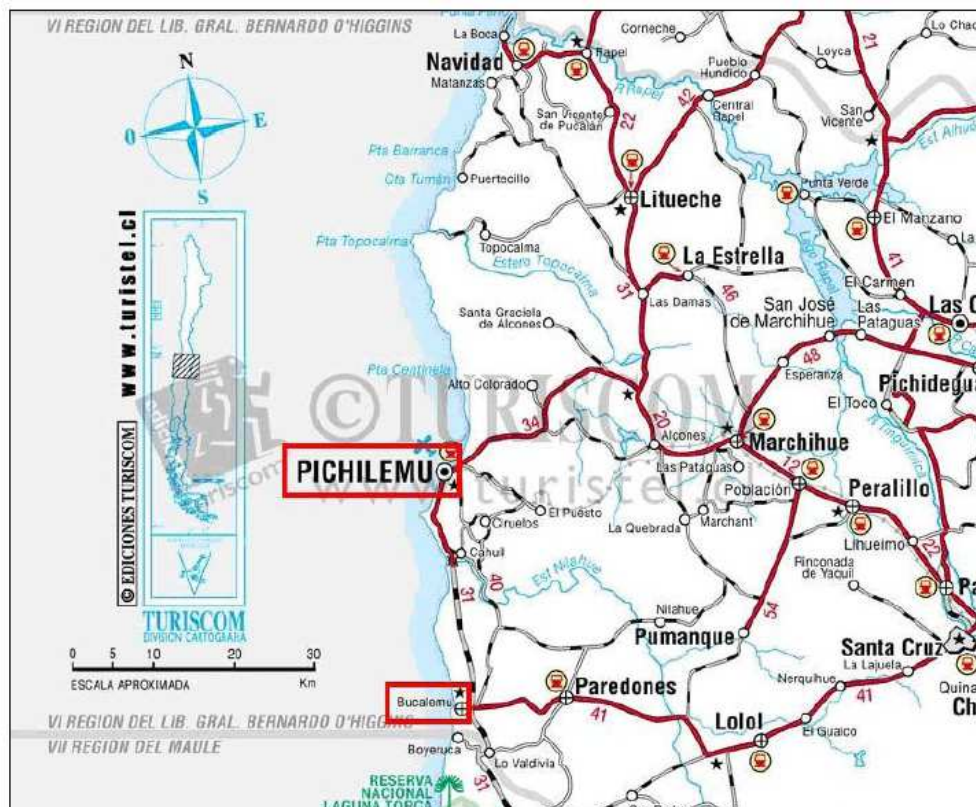


Figura 1-1 Ubicación de Bucalemu (Fuente Sernatur)

Las condiciones de bahía son de mala calidad, presentando alto riesgo en opinión de los propios pescadores, para las embarcaciones y para operatividad de las mismas.

La carencia de una estructura adecuada para la operatividad es un tema especialmente sensible para el sector pesquero artesanal en la región. Las razones de ello son varias y muy valederas:

- Permite bajar los tiempos de operación
- Reduce las condiciones de riesgo (cruce de barras)
- Las embarcaciones sufren menos daños
- Aumenta el número de días con posibilidad de salir a la pesca
- Contribuye a potenciar la actividad.

Por lo tanto, como solución se diseñará una estructura de abrigo, aprovechando una formación rocosa existente (si es que el tipo de roca presente es utilizable), de tal manera que se cuente con una zona de sombra que permita optimizar la operatividad a menores costos.

Además, con el diseño de la estructura, se debería centralizar la actividad pesquera de las cinco caletas reconocidas (Boca de Rapel, Matanza, Puertecillo, Pichilemu y Bucalemu) y con mayor razón las restantes.



**Figura 1-2 Ubicación de Macizo Rocosos en Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar estudios de ingeniería que permitan caracterizar las condiciones naturales de la caleta Bucalemu y así poder diseñar (a nivel de ingeniería básica) una estructura apropiada para mejorar la operatividad de la caleta, utilizando la formación rocosa presente en la zona si es que esta fuese utilizable.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el Clima de Oleaje.
- Caracterizar conceptualmente el tipo de formación rocosa existente en la zona de estudio.
- Determinar los Niveles de Marea en la zona de estudio.
- Obtener el Transporte Longitudinal y Transversal del sector de estudio.
- Determinar los parámetros de diseño para la estructura de abrigo.
- Generar alternativas de estructuras de abrigo para posteriormente evaluarlas.
- Diseñar una Estructura de Abrigo.
- Aportar con recomendaciones para la zona de estudio propuesta.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 OLEAJE

3.1.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ONDAS

En física, una onda es la propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio, por ejemplo, densidad, presión, campo eléctrico o campo magnético, que viaja a través del espacio transportando energía. El medio perturbado puede ser de naturaleza diversa como aire, agua, un trozo de metal o el vacío.

En hidráulica marítima el oleaje es preferentemente generado por la acción del viento, sin embargo existen otras ondulaciones que no lo son. Los periodos típicos, longitudes de onda y mecanismos forzantes de las ondas en el océano se presentan en la Tabla 3-1:

**Tabla 3-1 Clasificación de Ondas
(Fuente Elaboración Propia)**

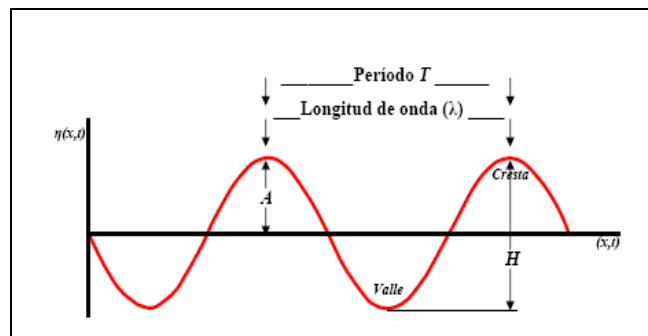
NOMBRE	PERIODOS TÍPICOS	LONGITUDES DE ONDA	MECANISMOS FORZANTES
RIPPLES	< 0.2 [s]	10 - 2 [m]	Viento sobre superficie del mar
SEA	0.2 - 9 [s]	10s of [m]	Viento sobre superficie del mar
SWELL	9 - 30 [s]	100s of [m]	Viento sobre superficie del mar
INTERNAS	minutos a horas	1 - 300 [m]	Cizalles de corriente sobre la estratificación
PLANETARIAS Y TOPOGRÁFICAS	horas a días	100 - 1000s [km]	batimetría/presión atmosférica
TSUNAMIS	15 min a 1 hora	100s [km]	sismos, deslizamientos, meteoritos
MAREAS	algunas horas	100s - 1000s [km]	gravitacional (luna y sol principalmente)

A continuación se desarrolla de manera general los principales fenómenos asociados a las ondas generadas por viento, debido a que estas son las que presenta una mayor relevancia para el desarrollo del presente proyecto de título

3.1.2 ONDAS PRODUCIDAS POR VIENTO

El viento puede generar olas localmente (llamadas “seas”), las que viajan en direcciones distintas, o puede generar olas que se propagan desde una ubicación remota en el mar abierto (llamadas “swell”) y son más regulares que las anteriores.

Para estudiar olas, se debe comenzar indicando los rasgos de una onda ideal de forma sinusoidal. De acuerdo a la Figura 3-1 se pueden establecer la siguiente nomenclatura para las ondas: La longitud de onda (λ), es la distancia entre dos crestas (o dos valles, o dos puntos de inflexión con la misma curvatura arriba y debajo de los puntos). El período (T) es el tiempo que tardan en pasar dos crestas o dos valles (o cualquier otro punto de referencia de la onda) por una posición fija. La velocidad o celeridad (C) de la onda es el cociente de la longitud de onda sobre el período. La amplitud de onda (A) es igual a la mitad de la altura de la onda (H) cuando esta se comporta lineal. La cresta de la onda es el punto de máxima elevación y el valle el de mínima.



**Figura 3-1 Representación Onda Ideal
(Fuente Elaboración Propia)**

La altura de onda no depende de C , λ , o T , si no que de la energía transferida a la superficie del océano por el viento, cuando estamos en la zona de generación. Mientras más intenso el viento, más altas serán las olas. El período y la longitud de onda pueden ser expresados en términos de sus recíprocos, la frecuencia angular de onda $\omega = 2\pi/T$ y el número de onda $\kappa = 2\pi/\lambda$. El vector número de la onda tiene magnitud κ y apunta en la dirección de propagación de la onda, o sea, perpendicular a las crestas de las olas superficiales. Con las definiciones de ω y κ , la velocidad de onda es igual a:

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\kappa}$$

Ecuación 3-1

La longitud de onda λ es una función de T y C es una función de λ . Así, ondas largas viajan más rápido que las cortas. El estudio de las olas generadas por viento es simplificado tratándolas como ondas de pequeña amplitud, lo que significa que la inclinación o pendiente de la onda (la razón de la altura H a la longitud de onda λ) es menor de 1/20 en situaciones ideales. En situaciones reales, la inclinación de las ondas de amplitud pequeña es de 1/50.

Para una onda progresiva, el desplazamiento vertical de la superficie libre η está dada por:

$$\eta = A \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right] = A \cos [kx - \omega t]$$

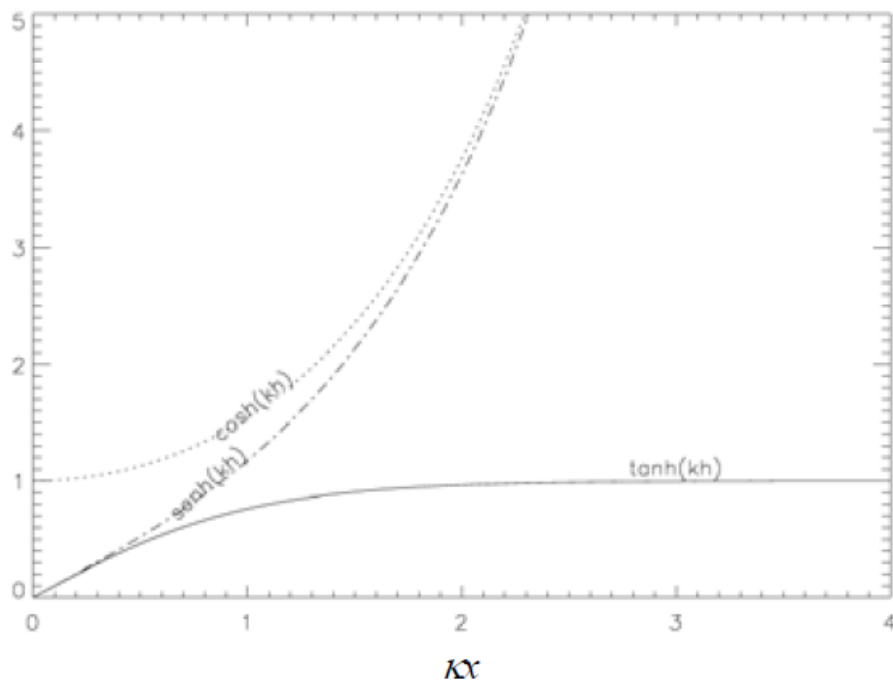
Ecuación 3-2

Donde x es la posición y t es el tiempo. El argumento $[kx - \omega t]$ es la fase de la onda y adquiere valores entre 0 y 2π desde una cresta a la siguiente en un punto fijo o desde una cresta a la otra en un tiempo determinado. La velocidad a la cual el argumento se propaga, o velocidad de fase C es obtenida de las ecuaciones de movimiento, asumiendo que la onda es progresiva, incompresible y sin rotación, es igual a

$$C = \left[g \frac{\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{\lambda} h \right]^{1/2} = \left[\frac{g}{k} \tanh(kh) \right]^{1/2}$$

Ecuación 3-3

Antes de explicar que ocurre con la velocidad de fase en aguas profundas y someras, se explicará el comportamiento de las funciones hiperbólicas que se presentan en el siguiente diagrama:



**Figura 3-2 Comportamiento de Funciones Hiperbólicas
(Fuente Elaboración Propia)**

Una onda de agua profunda u onda corta se encuentra cuando la longitud de onda es más pequeña que dos veces la profundidad de la columna de agua (o sea $\lambda < 2h$). Esto significa que λ es pequeña y kh es grande, luego $\tanh kh$ tiende a 1. (Ver Figura 3-2)
Por lo tanto, a partir de la Ecuación 3.3 se puede definir:

$$C = \sqrt{g \frac{\lambda}{2\pi}} = \sqrt{\frac{g}{k}}$$

Ecuación 3-4

Las ondas de aguas someras u ondas largas se observan cuando $\lambda > 20h$. Esto significa que la longitud de onda es larga y en consecuencia $\tanh kh$ tiende a kh . (Ver Figura 3-2) Luego, para ondas de aguas someras la velocidad de fase es:

$$C = \left[\frac{g}{k} (kh) \right]^{1/2} = \sqrt{gh}$$

Ecuación 3-5

La Ecuación 3-5 no depende de la longitud de onda sino de la profundidad local. Esto es una relación importante ya que dice que las ondas largas tales como las ondas de marea que se propagan sobre áreas costeras tendrán velocidades de fase que son proporcionales a la raíz cuadrada de la profundidad del agua.

Las ondas intermedias son aquellas que caen entre ondas largas y ondas cortas. Su velocidad de fase está dada por la Ecuación 3-3. El rango de profundidades a las cuales estas ondas pueden existir aumenta con su longitud de onda.

3.1.3 TEORÍAS DE ONDAS

Las teorías que describen el oleaje son aproximaciones a la realidad. Pueden describir bien aquellos fenómenos cuyo escenario satisfaga las condiciones hechas en su derivación. Asimismo, pueden no describir otros fenómenos que violen esas condiciones. Al adoptar una teoría, ha de asegurarse de que el fenómeno de interés está descrito razonablemente bien. A modo de ejemplo en estudios de protección del litoral, que es uno de los objetivos del estudio del oleaje y de este proyecto de título, depende de la habilidad para predecir los perfiles de la superficie del mar y el movimiento del agua, así como de la precisión de esas aproximaciones.

La Figura 3-3 adelanta un ejemplo de cómo las diferentes teorías de oleaje se aplican a zonas de distinta profundidad relativa.

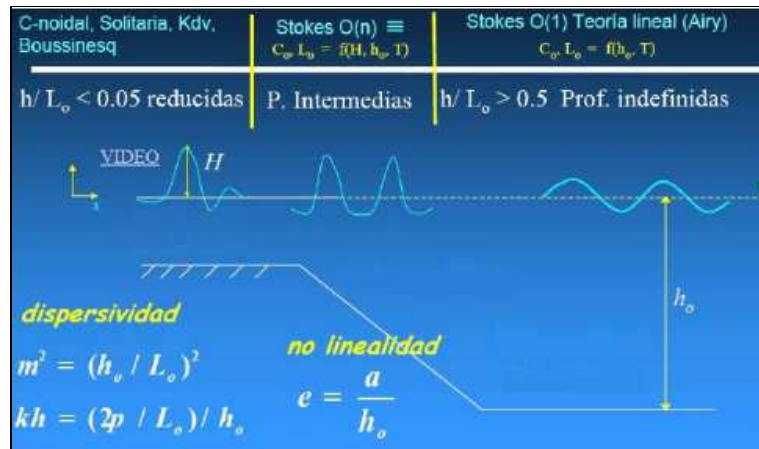


Figura 3-3 Aplicación de Teorías en diferentes zonas (Fuente Ref. 1)

En la Figura 3-4 se puede comparar la forma de las diferentes ondas, en función de sus teorías:

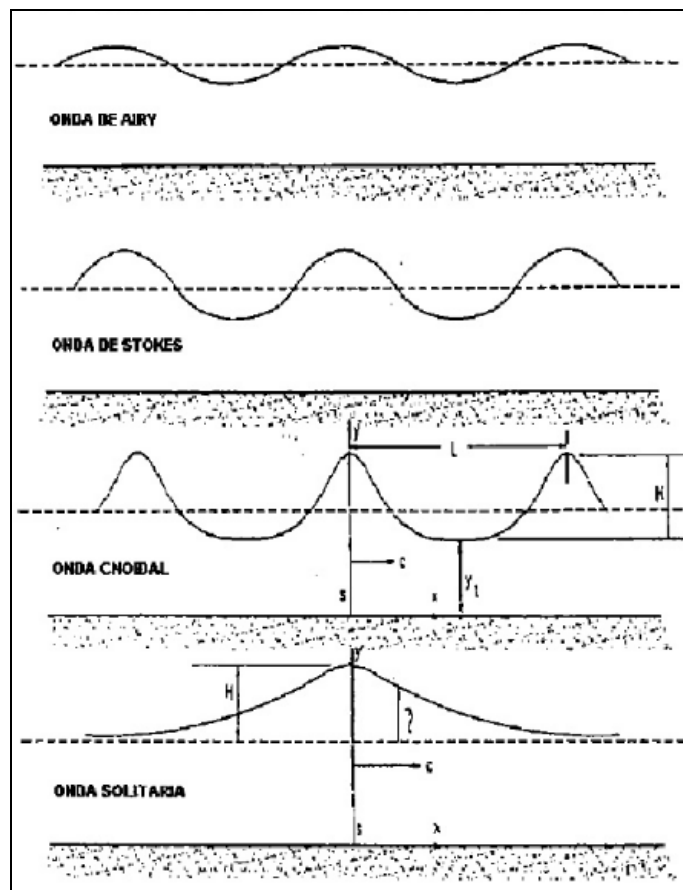


Figura 3-4 Comparación de ondas en diferentes teorías (Fuente Ref. 1)

3.1.3.1 TEORÍA LINEAL DEL OLAJE

Es la teoría de oleaje más simple, también denominada Teoría de Airy, en honor al primer autor que la derivó. Aunque tiene limitaciones en su aplicación, puede ser muy útil para describir los fenómenos principales de las olas, cuyas hipótesis de partida son las siguientes:

- El agua es homogénea e incompresible; (lo que implica que la densidad, ρ , es constante).
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- No existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino. El flujo es irrotacional.
- El fondo del mar constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.
- Las ondas son planas (de dos dimensiones).
- La amplitud de onda es pequeña y su forma es invariable en el tiempo y espacio.

Una conclusión de la primera hipótesis es que las líneas de corriente en un fluido incompresible son paralelas. En efecto, la ecuación de conservación de masa dice que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0$$

Ecuación 3-6

Si el fluido es incompresible, la densidad es constante, por lo tanto la Ecuación 3-6 se puede escribir:

$$\nabla \cdot (\bar{u}) = 0$$

Ecuación 3-7

Lo que quiere decir que la divergencia de la velocidad es nula, o lo que es lo mismo, que las líneas de flujo son paralelas.

El hecho de que el flujo sea irrotacional implica que el campo correspondiente se deriva de un potencial, es decir, que puede escribirse, para las velocidades horizontal (u), y vertical (w), las siguientes ecuaciones:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

Ecuación 3-8

La Ecuación 3.8 implica que si se conoce el potencial $\phi(x, z, t)$ en todo el ámbito del estudio, se pueden conocer también las velocidades de las partículas.

En general, la onda se caracteriza por su longitud (L), su altura (H), su periodo (T), la profundidad (d) y la dirección sobre la que se propaga (σ).

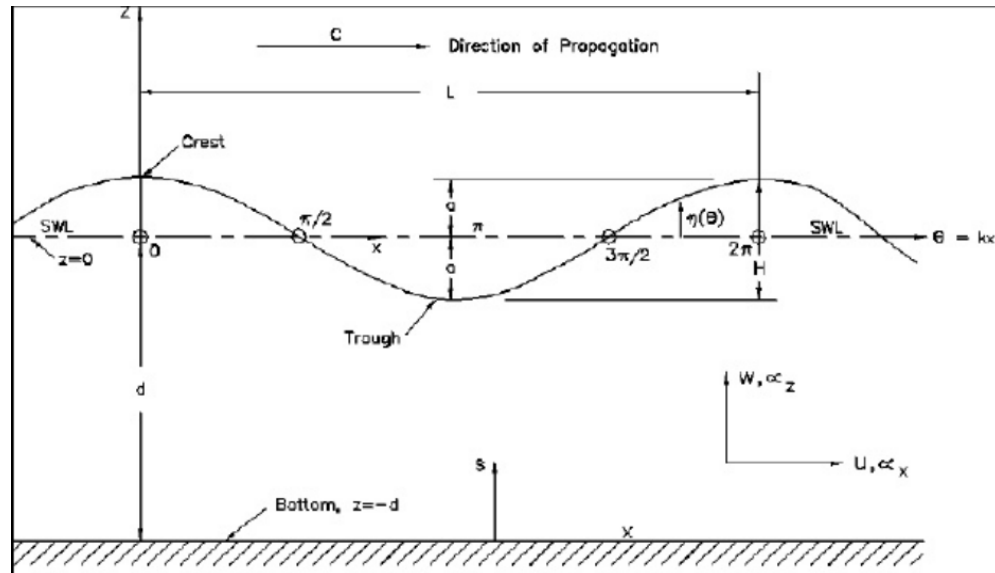


Figura 3-5 Representación de una onda de Airy (Fuente Ref. 1)

En función del número de onda (k) y la frecuencia angular (ω) la longitud de onda se describe como:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) = \frac{gT}{\omega} \tanh(kd)$$

Ecuación 3-9

3.1.3.2 VALIDEZ DE LAS DISTINTAS TEORÍAS DE OLEAJE

Uno de los parámetros adimensionales que es utilizado para clasificar la validez de las distintas teorías de oleaje, corresponde al Número de Ursell (U_r) definido como:

$$U_r = H \frac{L^2}{d^3}$$

Ecuación 3-10

Ha de manifestarse que este se puede definir en función de la amplitud de la onda o del número de onda en lugar de la altura y longitud respectivamente. Por ello y aunque conceptualmente el significado de este parámetro es siempre el mismo, sus valores numéricos varían de forma importante por lo cual es preciso tener clara la definición empleada antes de realizar cualquier interpretación.

El número de Ursell es un parámetro importante ya que sirve para definir el régimen al que corresponden las ondas y, por tanto, ayuda a seleccionar la teoría más adecuada en cada caso.

La Figura 3-6 muestra el gráfico de Le Méhauté (1976), en el cual se representan las áreas de validez de las diferentes teorías de oleaje.

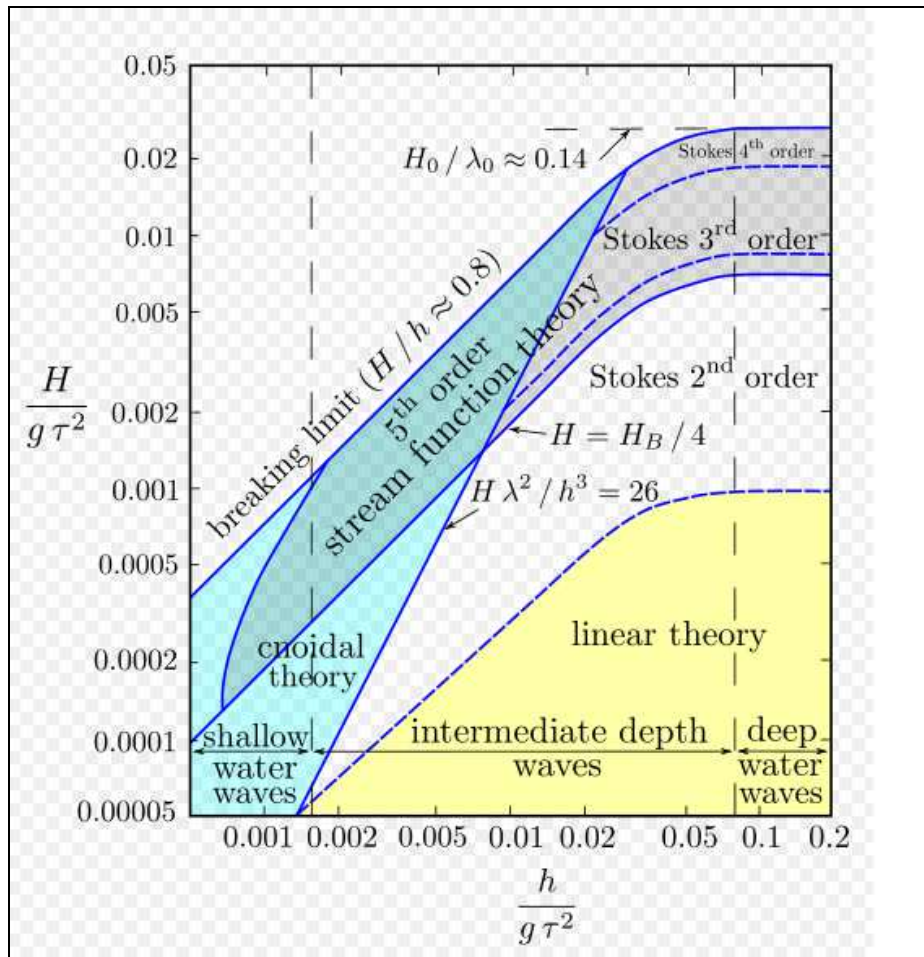


Figura 3-6 Rango de validez de las diferentes teorías de oleaje (Le Méhauté, 1976)
 (Fuente Ref. 2)

3.2 TRANSFERENCIA ESPECTRAL DE OLAJE

3.2.1 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE

A medida que el oleaje se acerca a la costa el efecto del fondo comienza a notarse. Como consecuencia de esta interacción el tren de ondas cambia.

Los procesos de transformación son fundamentalmente variaciones en la altura de ola y en la dirección de propagación.

Las alteraciones más comunes que sufre el oleaje son refracción, difracción, reflexión, shoaling y rompimiento, entre otros.

3.2.1.1 REFRACCIÓN

Este fenómeno tiene lugar cuando un tren de ondas incide oblicuamente sobre la costa y se encuentra frente a un cambio de profundidad. En ese caso una parte del frente de la onda viaja en aguas de menos profundidad y, por lo tanto, con menor celeridad que el resto dando lugar a un cambio de dirección. También por la presencia de una corriente se puede producir un retraso de parte del frente con el consiguiente cambio de dirección. Por lo tanto la refracción es debida tanto al efecto del fondo como a la presencia de una corriente.

Para estimar el efecto de la refracción sobre el oleaje debido al cambio de profundidad se considerará una batimetría recta y paralela a la costa, como se observa en la Figura 3-7:

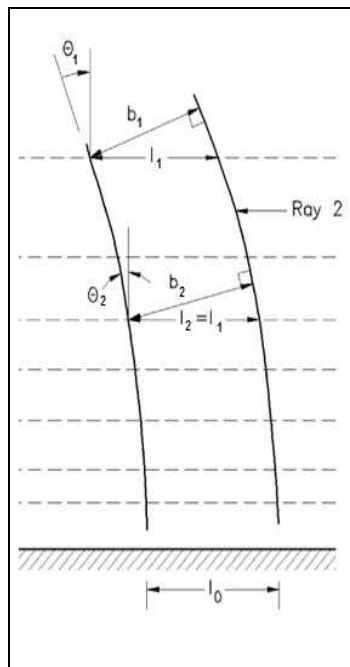


Figura 3-7 Esquema de ola refractada
(Fuente Ref. 2)

Si se considera la propagación del oleaje entre los puntos de la Figura 3-7 además que el flujo de energía entre ellos es constante, es decir, no existen términos disipativos.

$$\left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_1 b_1 = \left(\frac{1}{8}\rho g H^2 n C\right)_2 b_2 = cte$$

Ecuación 3-11

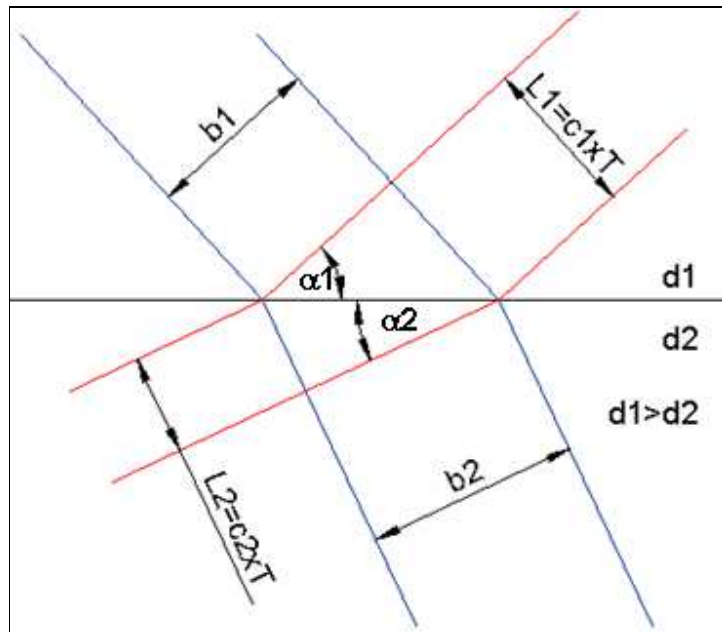
De donde se obtiene:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$

Ecuación 3-12

El término $\sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$ corresponde al coeficiente de refracción, este coeficiente depende de la separación entre rayos.

Para obtener b_1 y b_2 , se puede hacer una aproximación simple mediante la Ley de Snell, que se rige según la Ecuación 3-13 y es ilustrada en la Figura 3-8:



**Figura 3-8 Diagrama de Refracción
(Fuente Elaboración Propia)**

A partir de la Figura 3-8 se puede definir:

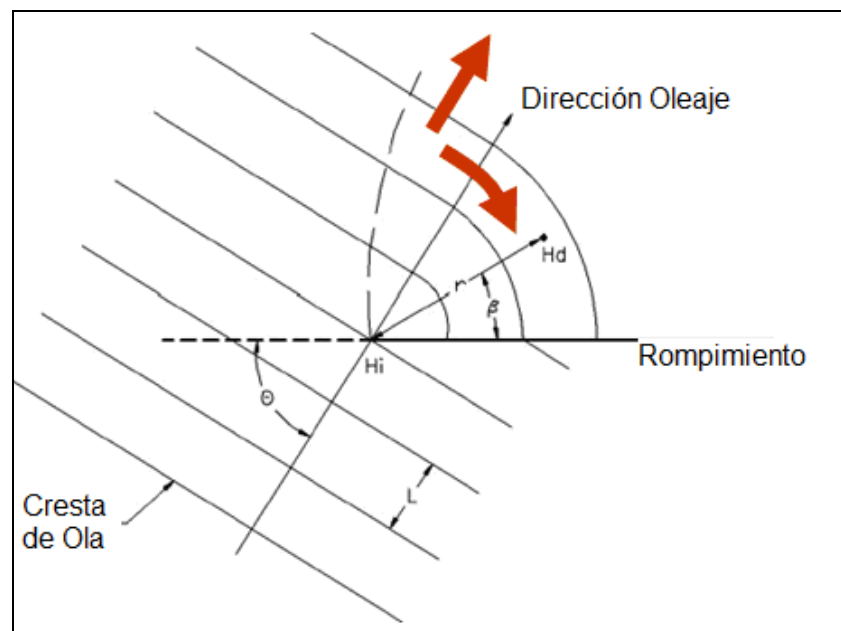
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{b_1}{b_2}$$

Ecuación 3-13

3.2.1.2 DIFRACCIÓN

La difracción es un fenómeno que consiste en la transferencia de energía de manera transversal a la dirección de propagación del oleaje (gradientes de altura de ola a lo largo del frente). Se observa cuando una ola llega al extremo de una estructura o formaciones rocosas que tienen dimensiones equivalentes a la mitad de la longitud de onda. También ocurre en concentraciones de energía entre ortogonales (puntos cáusticos en diagramas de refracción).



**Figura 3-9 Esquema de Onda Difractada
(Fuente Elaboración Propia)**

A partir de la Figura 3-9 se obtiene la siguiente expresión:

$$H_d = K_d * H_i$$

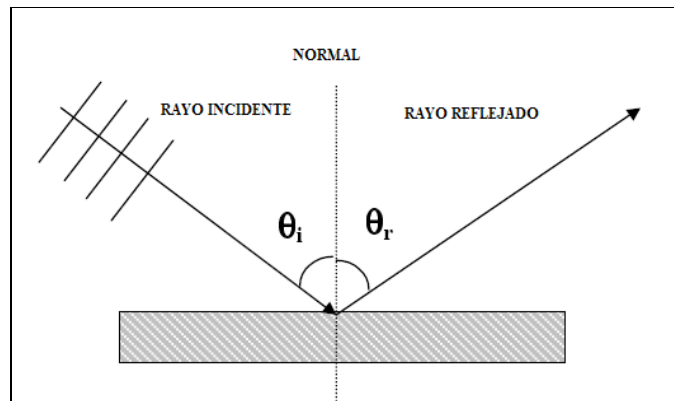
Ecuación 3-14 Altura de Ola Difractada

El coeficiente de difracción K_d se puede calcular teóricamente, pero en la práctica se recurre a datos empíricos tal como los diagramas de Wiegell (1962) o modelación numérica mediante técnicas no lineales.

3.2.1.3 REFLEXIÓN

La reflexión es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial.

Cuando un rayo se refleja en una superficie, se denominan: ángulo de incidencia, al formado por el rayo incidente y la normal; ángulo de reflexión, al formado por el rayo reflejado y la normal. Siendo la normal, la perpendicular a la superficie, esquematizado en la Figura 3-10:



**Figura 3-10 Reflexión
(Fuente Elaboración Propia)**

Cualquier estructura marítima o playa produce sobre el oleaje incidente un proceso de reflexión cuya intensidad depende entre otros aspectos del poder disipador que la obra o playa presente. Así, una estructura de paramento vertical es considerada como prácticamente reflejante total, por el contrario, una estructura en talud rugosa (como el dique de abrigo de un puerto) presenta una reflexión menor puesto que parte de la energía del oleaje incidente es disipada a través de los huecos generados por los elementos de la capa exterior que lo forman.

El coeficiente de reflexión, K_R , se define como el cociente entre la altura de la ola reflejada y la altura de ola incidente, como se señala en la Ecuación 3-15

$$K_R = \frac{H_{\text{Re flejada}}}{H_{\text{Incidente}}}$$

Ecuación 3-15

3.2.1.4 SHOALING (ASOMERAMIENTO)

A medida que un tren de onda se acerca a la costa, se observa un cambio en la altura y en la longitud de onda, a este proceso se le llama asomeramiento.

Para resolver esta transformación se asume que el proceso es bidimensional y que el periodo de la onda y el flujo de energía en la dirección de propagación son constantes.

Además de estas hipótesis se debe considerar que la variación del fondo sea suave para que no se produzca reflexión y disipación de energía por fricción en el fondo o aporte de energía por viento.

Si se considera una onda que se propaga de una profundidad mayor d_2 con altura de ola H_2 a una profundidad d_1 con altura de ola H_1 , esta puede ser definida como se indica en la Ecuación 3-16:

$$H_1 = H_2 \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}}$$

Ecuación 3-16

Por lo tanto el Coeficiente de Shoaling, K_s , se define como se muestra a continuación en la Ecuación 3.16, que es igual a la raíz de las celeridades de grupo

$$K_s = \frac{H_1}{H_2}$$

Ecuación 3-17

Definiendo el Coeficiente de Shoaling con respecto a aguas profundas, K_s se define como la Ecuación 3-18:

$$K_s = \left(\frac{1}{\sqrt{\left(2n \tanh \frac{2\pi d}{L} \right)}} \right)$$

Ecuación 3-18

Donde:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4\pi \frac{d}{L}}{\sinh\left(4\pi \frac{d}{L}\right)} \right)$$

Ecuación 3-19

3.2.1.5 ROMPIMIENTO

Cuando el oleaje se aproxima a profundidades relativas excesivamente bajas, hay aumento del peralte (H/L) y disminuye la celeridad de la onda lo que hace que el perfil de la misma vaya cambiando, hasta tornarse inestable y romper

En aguas profundas la rotura se produce esencialmente por pendiente inestable del oleaje, la cual se define de acuerdo a la Ecuación 3-20.

$$\frac{H_b}{L_{bo}} \cong \frac{1}{7} \cong 0.142$$

Ecuación 3-20

Para aguas intermedias, Miche (1944) propone la Ecuación 3.21 y para el caso de aguas poco profundas, la Ecuación 3-21 se reduce a la Ecuación 3-22

$$\frac{H_b}{L_{bo}} \cong 0.142 \times \tanh\left(\frac{2\pi d_b}{L_b}\right)$$

Ecuación 3-21

$$\frac{H_b}{d_b} \cong 0.89$$

Ecuación 3-22

Un criterio de rotura muy extendido por su simplicidad se obtiene asumiendo que la rotura del oleaje sobre playas de pendiente suave se puede asimilar a la rotura de una onda solitaria. El criterio de rotura para una onda solitaria, dado por McCowan (1891) es presentada en la Ecuación 3-23:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78$$

Ecuación 3-23

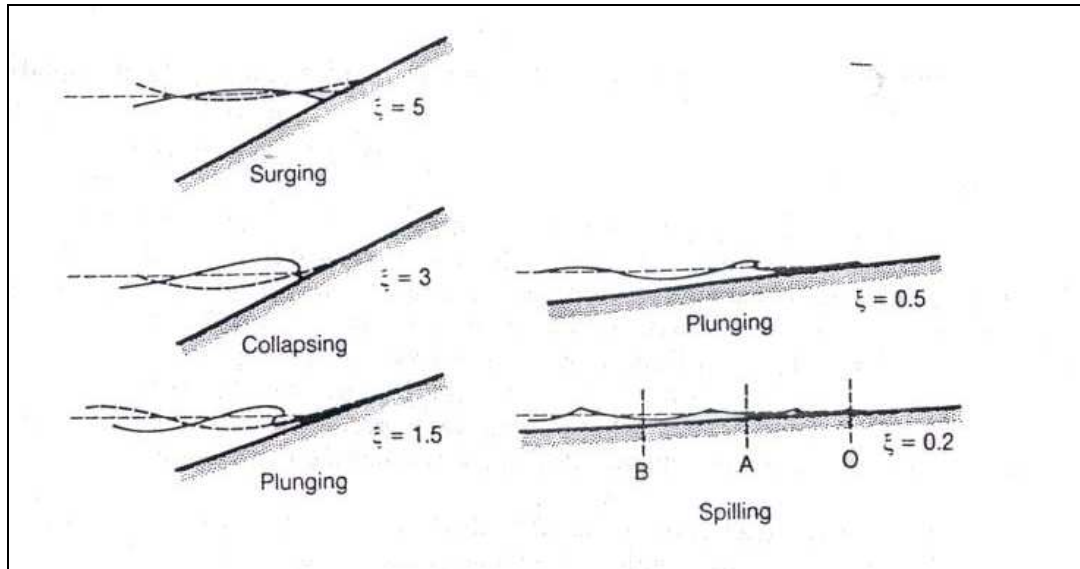
Para determinar la forma en que el oleaje rompe, el Número de Iribarren (I_r) o parámetro de similitud de surf (ξ) es comúnmente utilizado. Además describe la acción del oleaje con una estructura. En la Ecuación 3.24 se presenta la expresión general.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S}}$$

Ecuación 3-24

Donde α es la pendiente del talud y S el peralte del oleaje.

El Número de Iribarren define el tipo de rotura que tendrá lugar (si se produce) al interactuar el oleaje con un talud, indicando la forma en la que se disipará la energía sobre éste y por tanto dando una respuesta hidráulica distinta. En la Figura 3-11 se señalan los tipos de rotura debido a los parámetros antes definidos.



**Figura 3-11 Tipos de Rotura definidos a partir del Número de Iribarren
(Fuente Ref. 3)**

3.2.2 DEFINICIÓN ESPECTRAL DEL OLAJE

Dada la importancia del aporte energético del oleaje, el concepto de espectro es fundamental para su entendimiento y representación. El espectro es una de las formas más habituales y completas de describir las propiedades del oleaje irregular caracterizando la energía (o amplitud), frecuencia y dirección de propagación. Es necesario destacar que para muchas aplicaciones el carácter aleatorio de la superficie del océano puede ser representado por el espectro. El espectro de energía describe cómo la energía se reparte sobre un rango de frecuencias y direcciones. La distribución de energía (m^2/Hz) en el dominio de frecuencias se representa por el espectro, mientras que la distribución de la energía en el dominio de la dirección se representa por la función de dispersión direccional.

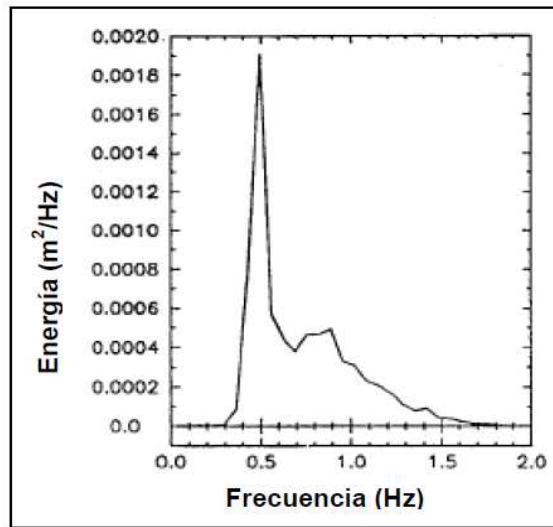


Figura 3-12 Ejemplo de Espectro de Frecuencias (Fuente Ref. 2)

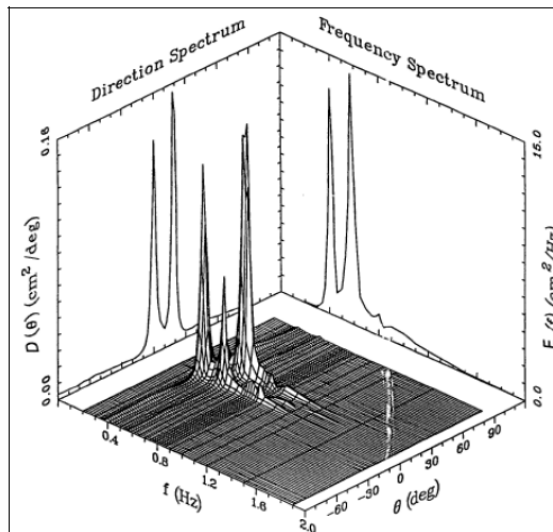


Figura 3-13 Ejemplo de Espectro Direccional (Fuente Ref. 2)

Para describir la desnivelación instantánea de un estado de mar¹ en un punto dado y en cualquier instante, se utiliza en la Ecuación 3-25:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn} [k_m (x \cos \alpha_n + y \sin \alpha_n) - 2\pi f_n t + \varepsilon_{mn}]$$

Ecuación 3-25

¹ Considerando que es una superposición lineal de infinitos trenes de onda sinusoidales

Donde α_{mn} son las amplitudes de las ondas sinusoidales, f_n las frecuencias, α_n las direcciones, ϵ_{mn} las fases y k_m corresponde al número de onda.

La densidad de energía para espectros bidimensionales se define como la Ecuación 3-26:

$$S(f, \alpha) * \Delta f * \Delta \alpha = \frac{E[\alpha_{mn}^2]}{2}$$

Ecuación 3-26

Para espectros de frecuencia la densidad de energía se define como la Ecuación 3-27:

$$S(f, \alpha) * \Delta f = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E[\alpha_{mn}^2]}{2}$$

Ecuación 3-27

Comúnmente la densidad de energía (S) se expresa en función de la frecuencia angular (ω). A partir de la densidad de energía, se puede obtener el momento espectral de orden n, de la forma expresada en la Ecuación 3-28:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

Ecuación 3-28

De la Ecuación 3-28 se obtiene el momento espectral de orden cero y con su resultado se puede determinar la altura significativa espectral, como se indica en la Ecuación 3-29:

$$H_{mo} \cong 4\sqrt{m_0}$$

Ecuación 3-29

3.2.3 ESPECTROS DE FRECUENCIAS MÁS UTILIZADOS

Para caracterizar los estados de mar la representación espectral es muy útil. Se puede tener espectros reales (muy útiles pero escasos) o sintéticos, siendo algunos ejemplos más comunes los nombrados a continuación:

- Pierson Moskowitz : oleaje completamente desarrollado
- Jonswap : para oleaje limitado por fetch
- Espectro TMA : mar de viento no desarrollado en aguas someras

A continuación se describen brevemente cada uno de los espectros sintéticos

3.2.3.1 ESPECTRO PIERSON MOSKOWITZ

En 1964 W.J Pierson y L. Moskowitz (Ref. 4) proponen una forma de espectro de energía para oleaje totalmente desarrollado, basado en la expresión obtenida por Kitaigorodskii a partir del análisis dimensional y en medidas directas del oleaje. El espectro propuesto se adjunta en la Ecuación 3-30

$$S(\omega) = 0.0081g^2 \omega^{-5} e^{-0.74\left(\frac{g}{\omega U}\right)^4}$$

Ecuación 3-30

Donde:

g: Aceleración de Gravedad
 ω : Frecuencia Angular
 U: Velocidad del viento a 19.5 [m] de altura

3.2.3.2 ESPECTRO JONSWAP

Mientras el espectro de Pierson-Moskowitz representa oleaje completamente desarrollado sobre el océano, las olas desarrolladas en un fetch limitado bajo fuertes vientos tienden a mostrar los espectros caracterizados por picos agudos. La forma de dicho espectro ha sido demostrada por un programa de observación de olas conocido con el nombre de Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Hasselman (1973) propone la siguiente ecuación para obtener la densidad de energía:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-0.125\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4} \gamma^\delta$$

Ecuación 3-31

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma_0^2 \omega_p^2}$$

Ecuación 3-32

Donde:

g: Aceleración de Gravedad
 ω : Frecuencia Angular
 α : Coeficiente de ajuste
 γ : Ancho espectral
 σ^2 : Coeficiente de ajuste

Donelan (1985) propone una forma espectral del JONSWAP para cuatro parámetros, como se indica en la Ecuación 3-33 adjunta:

$$S(\omega) = \beta g^2 \omega_p^{-1} \omega^{-4} e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4} \gamma^\delta$$

Ecuación 3-33

$$\delta = e^{\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma_0^2 \omega_p^2}}$$

Ecuación 3-34

Donde $\beta = 0.006\nu^{0.55}$, para $0.83 < \nu < 5.0$, además

$$\gamma = \begin{cases} 6.489 + 6 \log \nu & \text{para } \nu < 5 \\ 1.7 & \text{para } 0.83 < \nu < 1 \end{cases}$$

3.2.3.3 ESPECTRO TMA

Es una de las formas del espectro del oleaje más funcionales para ser usado en aguas de profundidad finita, Kitaigorodskii et al. (1975) derivó la forma funcional del espectro de equilibrio en aguas de profundidad finita. Bouws et al. (1985) lo probó con los datos de experimentos de oleaje llamados TEXEL, MARSEN y ARSLOE, y verificaron su aplicabilidad, proponiendo la siguiente forma espectral con el nombre de espectro TMA (Ref. 5):

$$S(f) = S_j(f) * \phi(kh)$$

Ecuación 3-35

Donde $S_j(\omega)$ es el espectro JONSWAP, ϕ es una función dando un límite más alto del rango de equilibrio de espectro de Kitaigorodskii et al. (1975) y k es número de ola de acuerdo con la relación de dispersión con la frecuencia f en las aguas de profundidad h . La función ϕ está dada por (Tucker 1994):

$$\phi(kh) = \frac{\tanh^3(kh)}{\tanh(kh) + kh - kh \tanh^2(kh)} = \frac{\tanh^2(kh)}{1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}}$$

Ecuación 3-36

El espectro TMA incluye implícitamente los procesos de atenuación del oleaje por la rotura del oleaje por profundidad limitada. Tucker (1994) demostró la atenuación del espectro TMA en aguas someras mediante ejemplos numéricos.

3.2.4 METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL

En esta sección, en el orden de comparar varias metodologías de transferencia de oleaje de aguas profundas hacia aguas someras, se entregará un resumen de 4 métodos los que se describen a continuación:

- TRANSFERENCIA POR MEDIO DE PARÁMETROS DE RESUMEN

La transferencia por medio de parámetros de resumen concentra toda la energía del oleaje en la dirección promedio de la energía (MWD²), utilizando además la altura significativa espectral, (Hmo) y el periodo Peak (Tp).

- TRANSFERENCIA ESPECTRAL CUASI-PURISTA

Consiste en simular un oleaje unitario (Hmo = 1[m]) utilizando combinaciones de direcciones y periodos de oleaje en aguas profundas, permitiendo esto la construcción de una función de transferencia, aplicando esta función a los espectros 2D se realiza la transferencia espectral en dos dimensiones (Tp y Dir) hacia aguas someras.

- TRANSFERENCIA ESPECTRAL CUASI-PURISTA MODIFICADA

Se realiza un proceso similar al anterior agregando la variable altura, resultando una transferencia espectral en tres dimensiones (Hs, Tp y Dir.)

- TRANSFERENCIA ESPECTRAL PURISTA

Se basa en la transferencia del espectro 2D de aguas profundas hacia aguas someras, es decir en la propagación del registro completo del oleaje.

3.2.4.1 COMPARACIONES Y RECOMENDACIONES DE LAS METODOLOGÍAS NOMBRADAS

El método de transferencia por medio de los parámetros de resumen subestima la altura significativa de la ola del espectro bimodal y en menor medida del espectro unimodal, con respecto a métodos espectrales, ya que al concentrar toda la energía en la dirección promedio del oleaje (MWD) se pierde información, lo que no sucede con métodos espectrales que consideran por completo el espectro 2D. Además el método de los parámetros de resumen no cumple con la norma SHOA N°3201.

Si el nodo donde se quiere transferir el oleaje se produce rompimiento, se debe realizar la transferencia por medio del método Cuasi Purista Modificado, ya que con el método Cuasi Purista se sobreestima la altura significativa en aguas someras del espectro en relación con los otros métodos, esto se debe a que con este método se transfieren olas unitarias, las que no rompen en 10 [m] de agua, por lo que este método extrae coeficientes y rearma el espectro 2D en aguas someras. Sin embargo, si en el nodo estudio no se produce rotura de oleaje los resultados de los métodos Cuasi Purista y Cuasi Purista Modificado son similares.

² Dirección promedio de la energía del oleaje

En resumen y como conclusión se puede decir que la mejor forma de transferir el oleaje es a través de los métodos espectrales, dependiendo de las características del oleaje en aguas profundas, la batimetría del nodo de estudio en aguas someras y la profundidad donde se requiera extraer el oleaje, ya que por medio de la transferencia por el método de los parámetros de resumen se subestima o sobreestima la altura de la ola, dependiendo de la batimetría y el lugar hacia donde se quiere transferir el oleaje, debido a que se concentra la energía del oleaje en una sola dirección por lo que se pierde información importante que se obtiene de un espectro de oleaje.

Por otra parte, las transferencias por medio de métodos espectrales estiman olas en aguas someras con mayor precisión, ya que consideran toda la información que entregan los espectros 2D en aguas profundas.

3.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

3.3.1 GENERALIDADES

La acción marina modela la forma y evolución de la franja costera, mediante procesos de erosión, transporte y acumulación. El principal motor de las transformaciones dinámicas de la costa es la energía del mar, a través de las mareas, olas y corrientes litorales.

Al acercarse a la orilla, los trenes de onda de las olas tienden a ponerse paralelos a la costa por el fenómeno de refracción. Debido a ello, convergen en las salientes aumentando su poder erosivo sobre ellas, mientras que en las bahías, las direcciones son divergentes y por efecto contrario, se atenúa el ataque sobre la costa.

Además, existen alteraciones locales, como las que plantean las obstrucciones de los muelles al avance del tren de olas. En este caso las olas giran hacia la zona que está al abrigo de la obstrucción, propagándose detrás de ella por un fenómeno de difracción de olas.

En una misma playa, las variaciones en la granulometría son indicadores de energía. El material más grueso se acumula en el lugar de la rompiente de las olas y en la barra más adentro (offshore). Las variaciones longitudinales muestran cambios en la energía del oleaje, con las arenas más finas, localizadas en áreas protegidas por salientes donde la refracción reduce la energía de la ola.

El transporte es el desplazamiento de los fragmentos erosionados a otras zonas por medio de corrientes de agua, viento, entre otros factores. Este se puede producir de formas diferentes:

- Flotación: en el agua, los materiales menos densos que ella son transportados por la superficie sin hundirse.
- Disolución: en el agua, algunos materiales viajan disueltos.
- Suspensión: los materiales no van disueltos, sino que se desplazan dentro de la masa del fluido, sea aire o agua.
- Saltación: los materiales se desplazan dando saltos empujados por el agua o por el viento.

El transporte de sedimentos en una costa abierta principalmente se debe a las olas (zonas sumergidas) o por viento (zonas emergidas)

- Por Olas: el esfuerzo dominante de las olas sobre el sedimento, es el movimiento oscilatorio. La percolación del agua en el lecho poroso ayuda a iniciar el movimiento y la suspensión del sedimento. El transporte inducido por olas produce un aumento en la pendiente de la playa hasta que se adquiere una condición de equilibrio, de acuerdo al ángulo de reposo de los sedimentos por su comportamiento estructural.
- Por Viento: el transporte eólico se hace por saltación y arrastre superficial de arena, dominando la saltación. Cabe destacar que el viento al ser una acción dinámica de un fluido poco denso, es altamente selectivo y generalmente mueve una fracción fina de sedimentos.

Las corrientes costeras o litorales son producto del rompimiento de las olas y pueden presentar dos patrones principales: a lo largo de la costa y perpendiculares a la costa. Cuando las olas rompen con ángulos significativos respecto de la línea de costa, se generan corrientes paralelas a la costa, confinadas entre la rompiente y la línea de costa. Cuando las olas rompen paralelas, se genera un patrón de corrientes en celdas de circulación con corrientes de retorno (undertow) fluyendo hacia el mar. Cabe destacar que estas corrientes de retorno son inducidas netamente por oleaje y son conocidas también como resaca.

La erosión de una costa ocurre si más arena deja la costa que la que llega, por tanto para considerar si hay erosión o acreción en una costa es importante hacer un cálculo del balance de sedimentos litorales, evaluando las contribuciones y pérdidas para calcular la pérdida o ganancia neta en un compartimiento de una costa.

El transporte de sedimentos a lo largo de la costa es uno de los procesos más importantes en el control de la morfología de las playas y determina en gran parte si la costa se está erosionando, está creciendo o es estable.

3.3.2 TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS

Se entenderá por transporte longitudinal de sedimentos como la cantidad de arena que se mueve de manera paralela a la costa en el tiempo.

La direccionalidad es de vital importancia para el transporte longitudinal, considerando únicamente el oleaje principal de un registro como su una única dirección de transporte de los sedimentos y su ángulo de incidencia en la playa afecta al balance de energía de un modo u otro.

La importancia del transporte longitudinal viene dada por ser el responsable principal de los cambios en planta en la playa y los cambios a largo plazo de la misma. Por lo general, los cambios del transporte longitudinal son irreversibles a no ser que se actúe sobre el sistema de transporte. El proceso viene dado por el oleaje que incide de forma oblicua y se genera una corriente longitudinal.

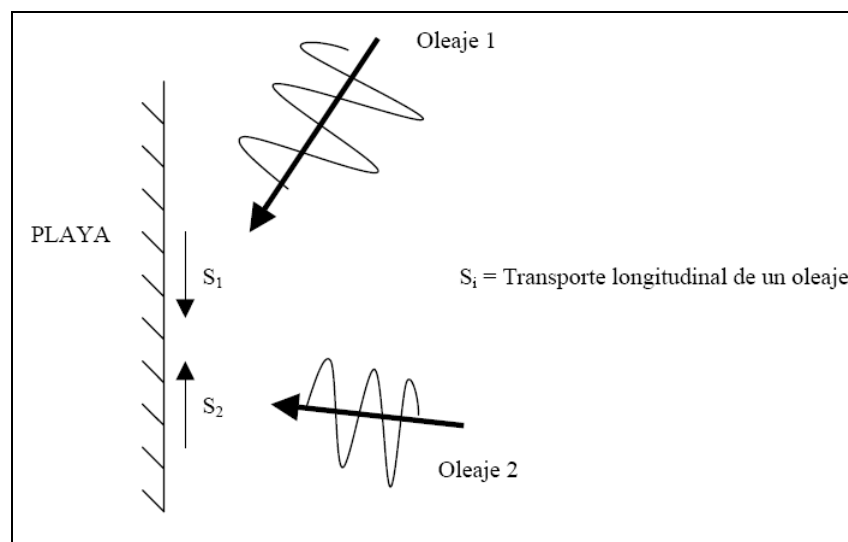


Figura 3-14 Esquema de transporte longitudinal de sedimentos en una playa
(Fuente Elaboración Propia)

Para los efectos del presente proyecto de título, la formulación utilizada para la estimación del transporte longitudinal será la fórmula del CERC (Coastal Engineering Research Center) o Método del Flujo de Energía (CERC, 1984).

Dicha fórmula consiste en estimar el potencial de transporte longitudinal sobre una costa conociendo las alturas de las olas, su ángulo de incidencia con respecto a la línea de orilla y las respectivas frecuencias a lo largo de un periodo. Esta fórmula empírica está basada en un ajuste experimental. Las principales ventajas de esta metodología son:

- Aplicable a trozos de costa
- Puede ser utilizada para diversos alineamientos de playa dentro de un área de estudio
- No requiere levantamientos detallados de las características locales sólo un conjunto de datos estadísticos de las ondas o alineamientos de la costa.

La Ecuación 3-37 muestra la fórmula del CERC a utilizar en el desarrollo del presente proyecto de título.

$$Q_1 = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k^{1/2} (\rho_s - \rho)(1-n)} \right) H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b)$$

Ecuación 3-37

Donde:

- Q_1 : Transporte longitudinal de sedimentos [m^3/s]
 K : Coeficiente de proporción
 ρ : Densidad del agua de mar [kg/m^3]
 g : Aceleración de gravedad [m/s^2]
 ρ_s : Densidad del sedimento [kg/m^3]
 k : Índice de rotura
 n : Porosidad del sedimento
 H_b : Altura de oleaje en rompiente [m]
 α_b : Ángulo de incidencia de la ola rompiente

La constante adimensional K relaciona directamente la cuantía longitudinal de transporte de sedimentos con el flujo de energía de las ondas.

La aplicación de una relación constante para playas distintas, no tiene en cuenta las propiedades hidráulicas del sedimento y del medio donde el transporte está ocurriendo.

Algunos autores como Thornton (1972), Dean (1973), Walton y Chiu (1979), Bailard (1981), Dean et al. (1982), Dean (1984) y CETN (1985), obtuvieron expresiones analíticas que indicaron que K no es constante, y depende del tamaño de sedimento y de su densidad, siendo ambos parámetros representados por la velocidad de decantación del grano. Por otro lado, Bruno et al (1984) y el CERC (1984) sugirieron un K de 0.385 (para alturas de ola significativa), basado en un estudio estadístico de las playas americanas (Ref. 6).

Además de la formulación del CERC (1984) para el transporte longitudinal de sedimentos, existen otras formulaciones ampliamente empleadas tales como Bagnol (1981), van Rijn (1986), Kamphuis (1990) (The Queen's Formula).

3.3.3 TRANSPORTE TRANSVERSAL DE SEDIMENTOS

Existen diferentes procesos que afectan y modifican el perfil de playa, y que normalmente suelen manifestarse en periodos de tiempo del orden de años. Sin embargo las playas pueden variar por la acción del oleaje su perfil transversal, y con ello su ancho visible, en pocas horas o días. Esto se debe a que cuando una playa es atacada por un temporal se produce una gran movilización del sedimento de manera transversal a la playa. De aquí se define transporte transversal como la cantidad de sedimentos que se mueve de manera perpendicular a la línea de costa.

El transporte transversal está asociado a diferentes fenómenos que tienen lugar cerca del perfil. Los agentes dinámicos que actúan en el litoral son principalmente el viento, el oleaje y las mareas, tal como se mencionó anteriormente. Estos agentes suministran energía al ambiente costero que es la causante de los cambios del perfil. El oleaje generado por el viento y que se propaga hacia la playa está considerado como la principal fuente de energía, pero, se reconoce el importante papel que juegan, además del oleaje incidente, las oscilaciones de baja frecuencia y los flujos inducidos en la zona de rompientes.

Debido a la tendencia del perfil de playa a modificar su morfología como respuesta a la intensidad de las condiciones del oleaje, los procesos a los que está sometida la costa generan cambios en el perfil de la playa que se traducen en dos estados principales. Estos fueron documentados por primera vez por Shepard (1950) y Bascom (1953) para la costa oeste de los Estados Unidos. En estas costas los oleajes de tormenta dominan en invierno, mientras que los oleajes de baja energía ocurren durante el verano. Debido a esta fuerte estacionalidad de los oleajes, Shepard se refirió a los perfiles con el nombre de: perfiles de verano y perfiles de invierno. Por otro lado, Johnson (1949) encontró una respuesta similar en función de la energía del oleaje en estudios en tanque. Para eliminar la estacionalidad aplicó los términos de: perfil de tormenta y perfil normal o de acreción. La Figura 3-15 muestra un esquema de los dos perfiles cuyas características principales son:

- Perfil de Tormenta: formado al incidir el oleaje de energía muy elevada, que produce la erosión del material de la parte emergida, y lo transporta hacia la parte sumergida. Este material se sitúa alrededor del punto de rotura en forma de barras sumergidas. Debido a la erosión de la berma y formación de la barra se produce un cambio de la pendiente haciéndola más tendida, provocando al mismo tiempo, un retroceso de la línea de costa.
- Perfil de Acreción: puede ser interpretado como la recuperación del perfil debido principalmente a la asimetría del oleaje. Este actúa sobre los depósitos sumergidos y los lleva hacia la línea de costa haciéndola avanzar, y aumentando la pendiente del perfil, por lo tanto se obtiene un perfil con una amplia berma.

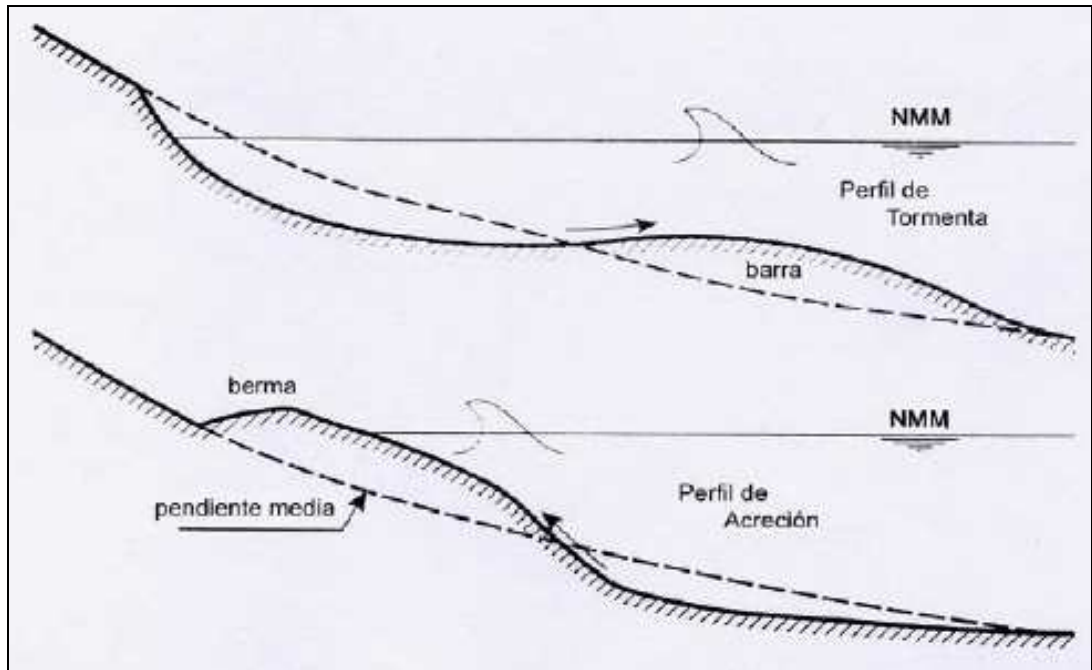


Figura 3-15 Perfil de Verano e Invierno (Van Rijn, 1998)
(Fuente Ref. 7)

La mayoría de las ecuaciones disponibles consideran las tensiones del fondo (esfuerzo de corte), pero se diferencia en cómo consideran el fondo, ya que algunas lo hacen de manera horizontal y otras con pendientes.

A continuación se presenta a modo de ejemplo una ecuación de cada tipo.

$$Q_T = 2.1 * 10^6 \rho \left(\frac{u_m d_0}{\nu} \right) (u_m - u_c) d_0 T$$

Ecuación 3-38: Sunamura et al (1978) para fondo horizontal

Donde:

- Q_T: transporte transversal neto por unidad de ancho [m³/s]
- u_m: velocidad máxima del fluido cerca del fondo [m/s]
- d₀: amplitud máxima del fluido cerca del fondo [m]
- T: periodo del oleaje [s]

$$\frac{Q_T}{\omega_f d} = A(\Psi_m - \Psi_c)$$

Ecuación 3-39: Watanabe et al. (1980) para fondo con pendientes

Donde:

- A: constante experimental (1 a 5 cm³/cm/s)
- Ψ_m : parámetro de Shields
- Ψ_c : parámetro de Shields critico para inicio de arrastre

3.4 OBRAS DE ABRIGO

3.4.1 CONCEPTO DE DIQUES

Un dique es un terraplén (o pedraplen) natural o artificial, por lo general de piedra, paralelo al curso de un río o al borde del mar.

Los diques artificiales pueden ser utilizados para:

- Prevenir la inundación de los campos aledaños a los ríos o mares; sin embargo también se utilizan para encajonar el flujo de los ríos a fin de darle un flujo más rápido. Son conocidos como diques de contención.
- Proteger determinadas áreas contra el embate de las olas.

La Figura 3-16 corresponde a la sección de un dique de contención en tierra, con núcleo impermeable, donde sus componentes principales son:

1. Coronamiento
2. Borde Libre
3. Nivel de Aguas del Proyecto
4. Talud de aguas arriba
5. Nivel del terreno aguas arriba
6. Corona
7. Cuerpo de apoyo aguas arriba
8. Núcleo Impermeable
9. Cuerpo de apoyo aguas abajo
10. Talud del lado de aguas abajo
11. Uña
12. Nivel del terreno del lado protegido
13. Nivel del terreno original
14. Nivel de fundación
15. Altura del dique
16. Ancho de la base de apoyo aguas arriba

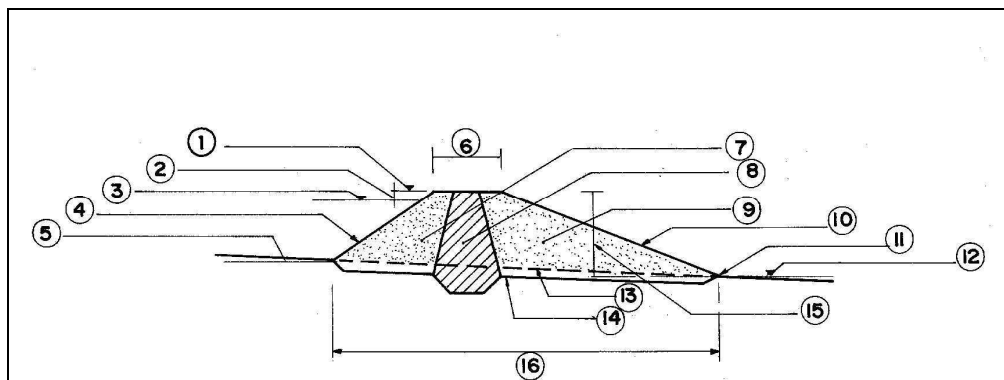


Figura 3-16 Componentes de un Dique de Contención
(Fuente Ref. 8)

De los diques artificiales, el más relevante en el presente estudio es el dique rompeolas, que es una estructura creada mediante la superposición de capas de elementos de diferentes granulometrías y materiales con el fin de proteger de la acción del oleaje distintas áreas e instalaciones o zonas de acceso, por ejemplo de un puerto.

Existen diferentes tipologías de diques rompeolas, tales como:

- En Talud
- Vertical
- Flotante
- Berma
- Etc.

Este estudio se centrará en los diques en talud y vertical, los cuales se muestran en las Figuras 3-17 y 3-18

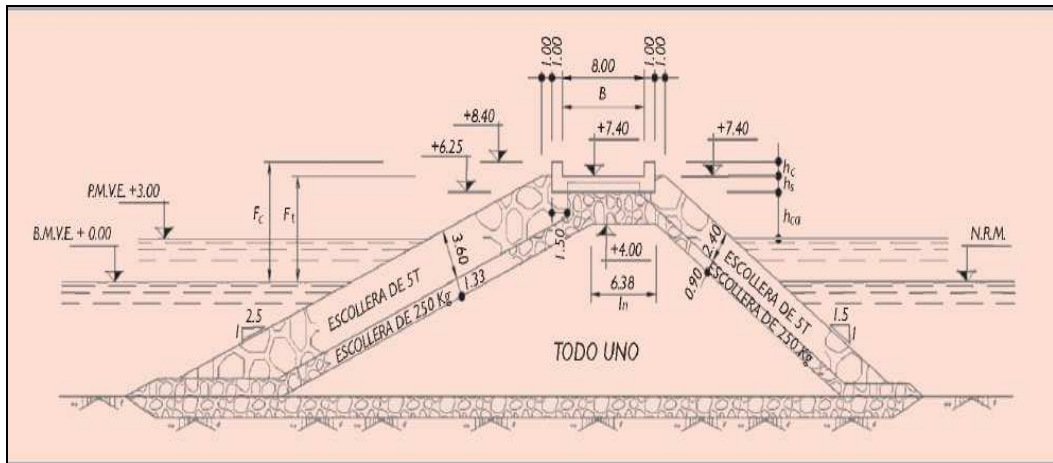


Figura 3-17 Dique en Talud
(Fuente Ref. 9)

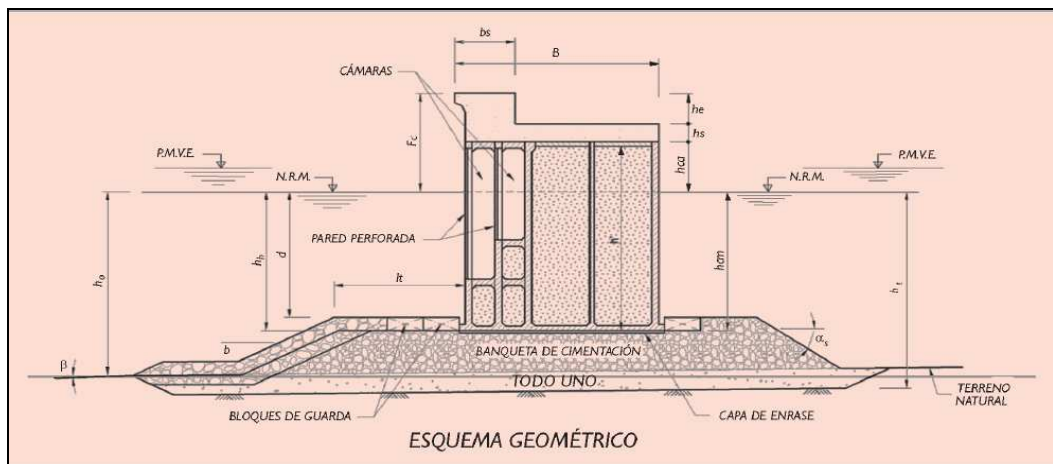


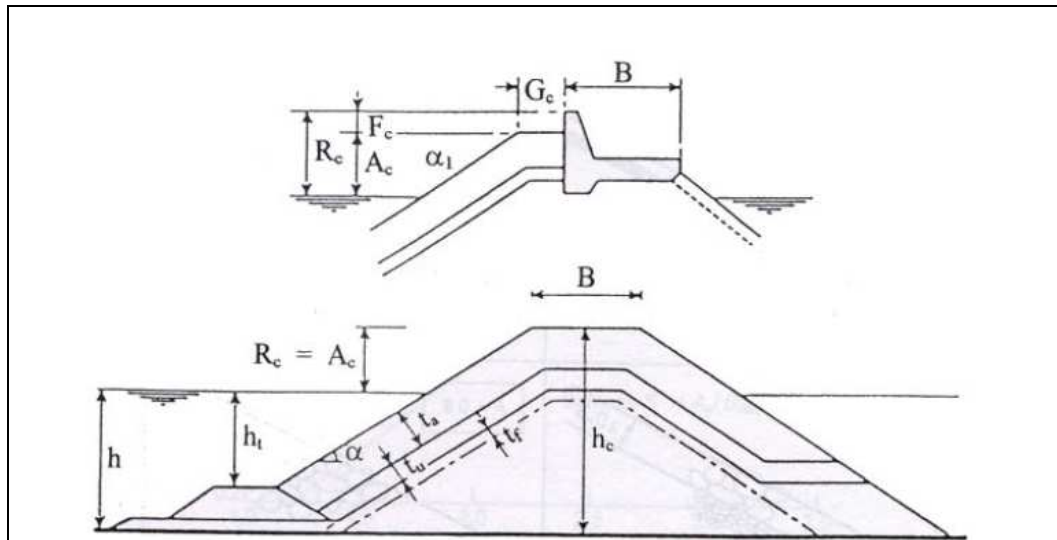
Figura 3-18 Dique Vertical
(Fuente Ref. 9)

3.4.1.1 PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL TIPO DE ESTRUCTURA

Por lo que se refiere a los parámetros que definen las características de la estructura, estas pueden básicamente agruparse en:

- Parámetros de las características geométricas.
- Parámetros de forma y rugosidad.
- Permeabilidad.

Se entiende por parámetros de las características geométricas a las propias dimensiones de la sección a evaluar (ver Figura 3-19), entre la gran cantidad de variables existentes cabe señalar la presencia o no de berma así como sus dimensiones como uno de los factores que intervienen más directamente en la respuesta hidráulica de la estructura.



**Figura 3-19 Parámetros geométricos de una estructura en talud
(Fuente Ref. 3)**

Los parámetros de forma y rugosidad están relacionados con el tipo de elemento de la capa exterior de la estructura en talud. Respecto a la forma, existe una gran variedad de tipos de elementos que responden de manera distinta al parámetro hidrodinámico a evaluar y básicamente pueden agruparse en macizos, huecos o multi-patas, como se adjunta en la Figura 3-20

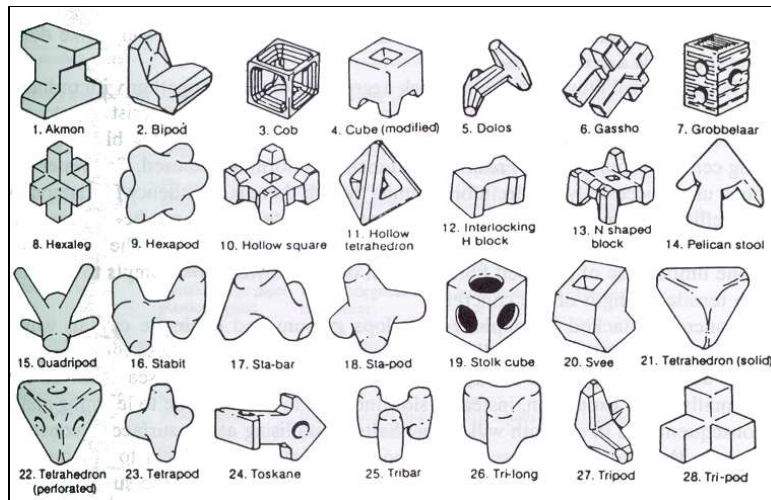


Figura 3-20 Tipos de elementos artificiales de una obra en talud (Fuente Ref. 3)

Respecto a la rugosidad, se diferencian 2 grandes tipos de estructuras, lisas o rugosas, las que son representadas en el diseño mediante la incorporación de coeficientes.

Finalmente la permeabilidad es otra de las variables a tener en cuenta y que dependerá del tipo de estructura a diseñar. Una de las clasificaciones comúnmente aceptadas se debe a Van der Meer (1993), tal y como se refleja en la Figura 3-21.

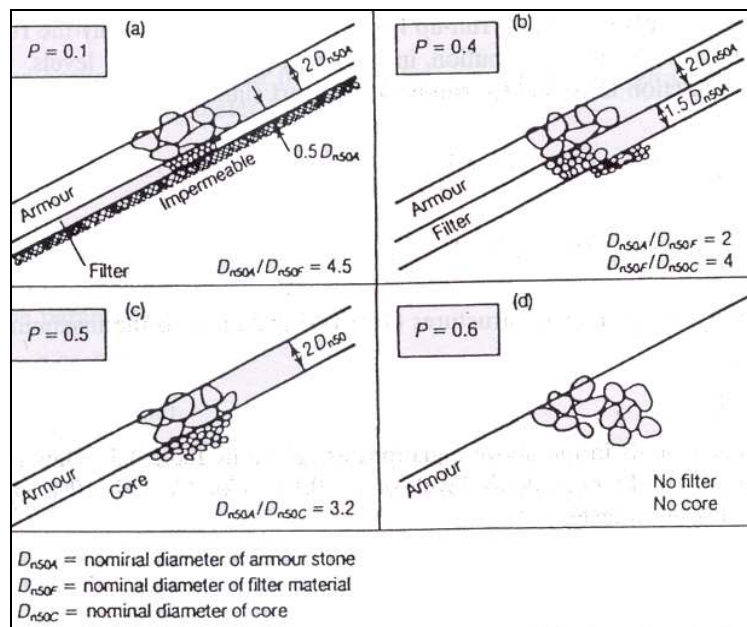


Figura 3-21 Permeabilidad de una estructura en talud según Van der Meer (1993). (Fuente Ref. 3)

3.4.2 DIQUE EN TALUD

El dique en talud es una de las tipologías más utilizada, establece un mecanismo que hace que el oleaje suba por el talud perdiendo energía por remonte con la consiguiente disipación de energía. La rugosidad del talud hace que el oleaje rompa.

Los diques en talud están compuestos en su zona interior por un núcleo, que es la zona central compacta, integrado por material granular, materiales sueltos que impiden el paso del oleaje. Sobre él se disponen capas de materiales, donde cada una impide que la interior se pierda hacia el exterior. Se trata de materiales sueltos que crecen de tamaño hacia fuera. Su diseño se basa en condiciones de filtro (graduación de tamaño de las partículas) que impide que el material de una capa se fugue hacia el exterior, puesto que los poros que ofrece la capa no dejan escapar el material que hay debajo. La capa exterior que corresponde al manto principal, que se compone de una serie de elementos también sueltos que resisten el oleaje por su peso y por el grado de encaje entre ellos. Estos elementos son escolleras, bloques de hormigón de tipo paralelepípedo o piezas especiales, habitualmente de hormigón con geometría singular que permite mayor unión entre los elementos adyacentes.

Para determinar el peso de los tipos de elementos de coraza, se describen a continuación distintas formulaciones:

- FÓRMULA DE HUDSON (1974)

La fórmula para calcular el peso de los diferentes elementos es la siguiente:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3}$$

Ecuación 3-40

Donde:

H : Altura de ola característica

D_{n50} : Diámetro nominal de pieza

ρ_s : Densidad de masa del elemento

ρ_w : Densidad de masa de agua

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)$$

α : Ángulo de pendiente

K_D : Coeficiente de estabilidad

- FÓRMULA DE VAN DER MEER (1988)

La fórmula para calcular el peso de los elementos tipo tetrápodos, para un talud de 1:1.5 es la siguiente:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = (3.75 N_{od}^{0.5} / N_z^{0.25} + 0.85) s_{om}^{-0.2}$$

Ecuación 3-41

Donde:

H_s : Altura significativa en frente del rompeolas

D_{n50} : Diámetro nominal de tetrápodos

ρ_s : Densidad de masa del elemento

ρ_w : Densidad de masa de agua

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)$$

N_{od} : Número de unidades desplazadas

N_z : Número de olas

S_{om} : Esbeltez

En tanto para los acrópodos, con un talud de 1:1.33 la fórmula es la adjunta:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = \begin{cases} 3.7 \text{ sin daño} \\ 4.1 \text{ falla} \end{cases}$$

Ecuación 3-42

Donde:

H_s : Altura significativa en frente del rompeolas

D_{n50} : Diámetro nominal de acrópodo

ρ_s : Densidad de masa del elemento

ρ_w : Densidad de masa de agua

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)$$

- FÓRMULA DE BURCHARTH AND LIU (1992)

La fórmula para calcular el peso de los elementos tipo dolo, para un talud de 1:1.5 es la siguiente:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = (47 - 72r)\phi_{n=2} D^{1/3} N_z^{-0.1}$$

Ecuación 3-43

Donde:

H_s : Altura significativa en frente del rompeolas

D_{n50} : Diámetro nominal de dolos

ρ_s : Densidad de masa del elemento

ρ_w : Densidad de masa de agua

r: Longitud del ala ($0.32 < r < 0.42$)

$\phi_{n=2}$: Factor de colocación de capas ($0.61 < \phi_{n=2} < 1$)

D: Nivel admisible de daño ($1\% < D < 15\%$, recomendado D hasta 2%)

Nz: Numero de olas activas, limitándose a 3,000

Talud recomendable cot $\alpha = 1.5$

Coefficiente de variación = 0.22

- FÓRMULA DE BURCHARTH (1998)

La fórmula para calcular el peso de los elementos tipo acrópodos, para un talud de 1:1,33 es la siguiente:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = A(D^{0.2} + 7.7) \quad \text{o} \quad D = 50 \left(\frac{H_s}{\Delta D_n} - 3.54 \right)^5$$

Ecuación 3-44

Donde:

H_s : Altura significativa en frente del rompeolas

D_n : Diámetro nominal de pieza

ρ_s : Densidad de masa del elemento

ρ_w : Densidad de masa de agua

D: Número relativo de unidades desplazadas más de D_n

A: Coeficiente con valor medio de $\mu = 0.46$ y coeficiente de variación $\frac{\sigma}{\mu} = 0.02 + 0.05(1 - D)^6$,

donde σ es la variación estándar.

- FORMULA DE MELBY AND TURK (1994)

La fórmula para calcular el peso de los elementos tipo core-loc, para un talud de 1:1,33 y 1:1,5 es la siguiente:

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad \text{o} \quad M_{50} = \frac{\rho_c H^3}{K_D \left(\frac{\rho_c}{\rho_w} - 1\right)^3 \cot \alpha}$$

Ecuación 3-45

Donde:

H : Altura de ola característica

D_{n50} : Diámetro nominal de pieza

ρ_c : Densidad de masa del elemento

ρ_w : Densidad de masa de agua

$$\Delta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)$$

M_{50} : Masa media del elemento, $M_{50} = \rho_c D_{n50}^3$

α : Angulo de pendiente

K_D : Coeficiente de estabilidad

Si no se realiza un diseño adecuado de la escollera, la obra de abrigo podría presentar fallas como socavación del borde exterior del cimientado del espaldón, filtración directa a través de la cimentación de flujos de agua originados por la rotura del oleaje, con velocidades de gran magnitud, que pueden provocar el arrastre de partículas del cimientado.

El cálculo del ancho de la berma se obtiene con la Ecuación 3-46 adjunta, en donde se ocupan 3 capas (según recomendación del CEM).

$$e = n K_{\Delta}^3 \sqrt{\frac{W_{50}}{\gamma}}$$

Ecuación 3-46

Donde:

γ : Peso específico de la unidad de coraza

n: Número de capas

K_{Δ} : Coeficiente de huecos

W_{50} : Peso de elementos de la coraza

Para el cálculo del peso de filtro, se suelen utilizar las recomendaciones de intervalos de peso de elementos de hormigón adjuntados en la Tabla 3-2, donde W es el peso del elemento.

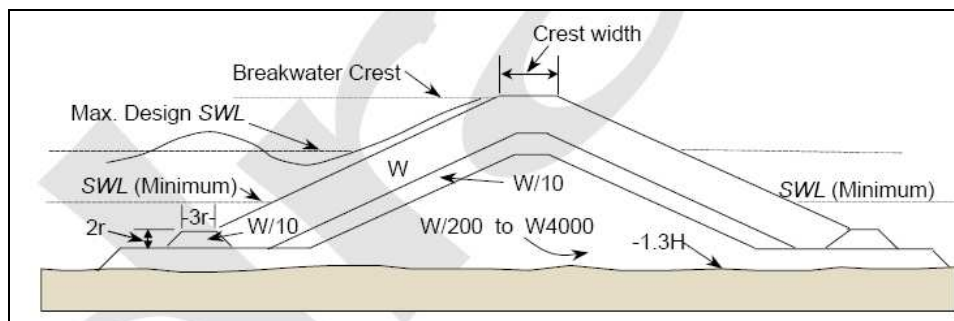
**Tabla 3-2 Recomendaciones de Pesos del Filtro para diferentes elementos
(Fuente Elaboración Propia)**

Elemento	Intervalo	Recomendación
Roca	$W/5$ a $W/10$	CEM
Dolo	$W/5$ a $W/10$	Vicente Negro
Tetrápodo	$W/10$ a $W/20$	Vicente Negro
Acrópodo	$W/7,5$ a $W/15$	Vicente Negro
Core-loc	$W/5$ a $W/10$	www.core-loc.com

El peso del núcleo de roca, se calcula de acuerdo a la recomendación otorgada por el Coastal Engineering Manual, en la cual el peso del núcleo viene dado por el intervalo entre $W/4000$ a $W/200$, donde W es el peso de los elementos de coraza.

En el caso del pie de apoyo, el peso se puede determinar con las recomendaciones otorgadas por el Coastal Engineering Manual y por el Shore Protection Manual, las cuales proponen que para todos los elementos, el cálculo del pie de apoyo sea $W/10$, donde W es el peso de los elementos de coraza.

Como recomendación también se propone que el ancho del pie sea de 3 capas y el alto sea de 2, como se observa en la Figura 3-22 adjunta.



**Figura 3-22 Recomendación de Coastal Engineering Manual
(Fuente Ref. 10)**

3.4.3 DIQUE VERTICAL

Los diques verticales constan de un parámetro vertical en el que se refleja parcialmente el oleaje. Su comportamiento estructural se basa en su propio peso y en fuerzas de rozamiento y el contacto con el fondo marino o una banqueta de apoyo.

Las condiciones que debe cumplir como estructura son que no exista deslizamiento y que no se produzca su vuelco.

El dique vertical tiene un comportamiento rígido, por lo que su rotura es instantánea y definitiva. El dique en talud en cambio tiene un comportamiento más elástico dada su flexibilidad y su rotura es progresiva.

Si se tiene un área de grandes profundidades, el dique vertical es el óptimo, ya que un dique en talud en grandes profundidades supone grandes volúmenes de materiales. Los diques verticales transmiten cargas más concentradas al terreno de cimentación. Su densidad es mayor a la de un dique en talud. Por ello, si el terreno no admite grandes cargas, hay que recurrir a soluciones de diques en talud

En estricto rigor no son totalmente reflejantes y en la actualidad se cuenta con diversos diseños que aceptan sobrepaso, en ocasiones se disponen de estructuras que disipan parte de la energía o cuentan con escolleras que inducen el rompimiento.

Estas obras se pueden fundar en una cama de apoyo protegida con escollera, siendo esta solución adecuada en aguas más profundas donde la acción del oleaje es menor.

Para evaluar el comportamiento hidráulico se puede recurrir a recomendaciones empíricas que permiten una aproximación al coeficiente de reflexión ($K_r = H_r / H_i$). Sin embargo, un diseño más detallado requiere de ensayos en modelo físico. Dependiendo del tipo de estructura, los coeficientes de reflexión pueden presentar diferentes valores, los cuales se muestran en la Tabla 3-3

**Tabla 3-3 Coeficientes de Reflexión
(Fuente Boussinesq Wave Module – User Guide)**

Tipo de Molo	Coeficientes de Reflexión K_r		
Tipo de Oleaje	Pared vertical	Compuestos con berma	Compuestos con coraza
Oleaje levemente rompiente sin sobrepaso	0.7 - 0.95		
Oleaje que rompe más fuerte	0.5 - 0.7		
Con altura moderada		0.5 - 0.7	
Dependiente del funcionamiento de la escollera			0.3 - 0.6

Otro aspecto hidráulico relevante es el sobrepaso del oleaje, que normalmente se expresa como un caudal por metro de ancho de la estructura ($m^3/s/m$).

El sobrepaso debe ser limitado tanto por efecto de la seguridad de embarcaciones como por daños a instalaciones en tierra o problemas de estabilidad de la obra. Su determinación es un proceso complejo y depende de numerosas variables, por lo general se requiere de ensayos en modelo físico, sin embargo, existen algunas aproximaciones empíricas que facilitan esta estimación.

Un diseño que busque eliminar el sobrepaso no es económicamente factible ya que las cotas de coronamiento son elevadas por lo que se debe establecer cuáles son los caudales admisibles.

4 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

4.1 OLEAJE

4.1.1 GENERALIDADES

Los factores de viento que generan las ondas son la velocidad, el fetch y duración. El fetch es la distancia lineal sobre la cual el viento sopla en el mar en un determinado periodo. Si el fetch aumenta, también lo hace la altura significativa de ola y el periodo de la onda.

La altura significativa de la ola es el promedio del tercio más alto de los valores observados (teniendo en cuenta que esta definición es dependiente de un Análisis de Cruces por cero).

En el caso particular de Chile, las olas que arriban a la costa pueden tener las siguientes características:

- Olas generadas en el lugar:

Los vientos locales pueden generar olas en las zonas inmediatas alrededor de la costa. Estas olas se caracterizan por periodos del orden de 4 a 10 segundos, y se les llaman “seas”, debido a que son generadas por sistemas de tormentas cercanas.

- Swell del hemisferio sur:

Los ciclones extra-tropicales en las latitudes del hemisferio sur pueden generar olas de gran magnitud, especialmente durante los meses de invierno, en Chile. Estas pueden propagarse hacia toda la costa chilena con una consecuente disminución de la altura y aumento en el periodo. Estas olas se caracterizan por periodos del orden de 10 a 16 segundos, y se les llaman “swell”, debido a que son generadas por sistemas de tormentas lejanas.

- Swell del hemisferio norte:

Al igual que los swells provenientes del sur, las olas se generan en las cercanías de las Islas Aleutianas durante los meses de verano, en Chile, se propagan hacia el sur hasta la costa chilena, viajando una distancia de 15000 [km] aproximadamente. Estas olas presentan periodos muy largos de 20 a 25 segundos.

Como el oleaje resulta clave en el diseño portuario y costero como por ejemplo que la altura de oleaje incide cúbicamente en el peso de los elementos de protección o coraza en los diques de abrigo, se debe estudiar el mismo y simular su propagación desde aguas profundas hasta las estructuras, con modelos numéricos adecuados que permitan contemplar entre otras características, las singularidades topobatimétricas de la zona de estudio.

4.1.2 METODOLOGÍA

4.1.2.1 BASE BATIMÉTRICA

La batimetría es la ciencia que mide las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar, actualmente las mediciones son realizadas por GPS diferencial para una posición, y con sondadores hidrográficos mono o multihaz para determinar la profundidad, todo ello se va procesando en un ordenador de abordo para confeccionar la carta batimétrica o náutica.

Una carta batimétrica o náutica es un mapa que representa la forma del fondo de un cuerpo de agua, normalmente por medio de líneas de igual profundidad, llamadas isobatas. Estas cartas son proporcionadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile y corresponden a la información base para la generación de las grillas de los modelos numéricos empleados.

Las cartas utilizadas en el presente Proyecto de Título fueron las siguientes:

- 5311 Rada Llico
- 5101 Caleta Matanza
- 5101 Caleta Tuman y Rada Topocalma
- 5100 Punta Pite a Puta Topocalma y Puertos Adyacentes
- 5000 Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco

Las cartas antes nombradas fueron digitalizadas con Didger, software que puede transformar puntos, líneas o áreas desde mapas en papel, gráficos, fotos, imágenes a un formato digital para que pueda usarse desde cualquier otro software.

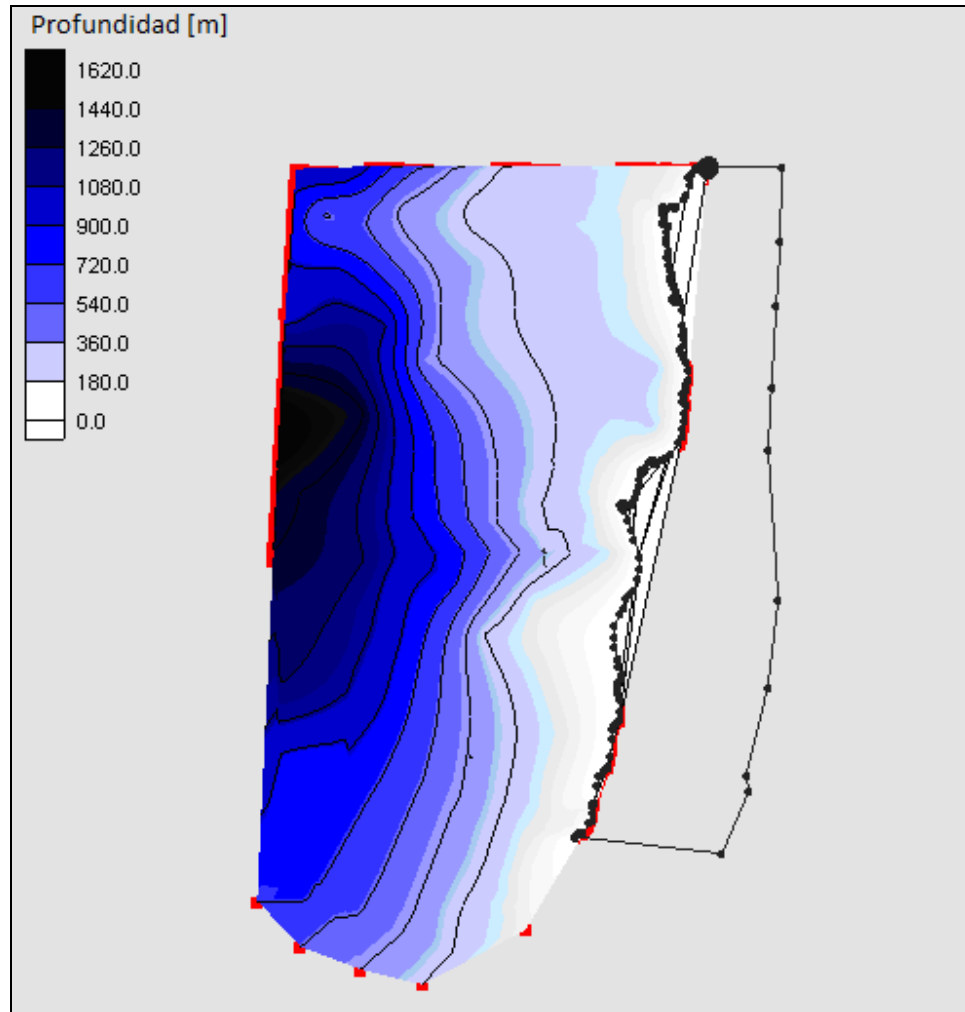
Para el sector de estudio, Bucalemu, no existen datos de batimetría ni tampoco cartas náuticas que representen las profundidades del sector por lo que a través del Programa Surfer se interpolaron las cartas antes nombradas para obtener datos de profundidad en el sector de estudio.

El método de interpolación utilizado fue Kriging, el cual asume que la distancia o la dirección entre puntos de la muestra reflejan una correlación espacial que puede ser usada para explicar la variación en la superficie, es decir, encaja una función matemática a un número especificado de puntos o todos los puntos dentro de un radio especificado, determinando el valor de salida para cada posición.

Kriging es un proceso de multipaso, esto incluye el análisis exploratorio estadístico de los datos, variograma del modelamiento, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de una superficie de discrepancia.

Esta función es apropiada cuando se sabe que hay una distancia espacialmente correlacionada o una tendencia direccional en los datos.

Aplicando este método de interpolación se obtuvieron datos de profundidad suficientes para modelar el sector de estudio, tal como muestra la Figura 4-1.



**Figura 4-1 Batimetría Final utilizada en Modelo Stwave
(Fuente Elaboración Propia)**

4.1.2.2 DEFINICIÓN DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Según el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, para caracterizar adecuadamente el clima de oleaje en aguas profundas, se debe contar con 20 años de estadística, información que puede ser obtenida a partir de modelos de hindcasting adecuadamente validados o mediciones de larga data, sin embargo, esta última opción resulta ser poco factible debido a que no hay registros continuos de esta magnitud.

Los datos en aguas profundas fueron otorgados por la Dirección de Obras Portuarias Regional, correspondiente al nodo ubicado en Constitución (35° S 74° W) de la base de datos de Olas Chile III. En la Figura 4-2 se muestra la ubicación del nodo utilizado.



**Figura 4-2 Ubicación nodo de estadísticas en aguas profundas
(Fuente Elaboración Propia)**

4.1.2.3 DEFINICIÓN DEL OLAJE EN AGUAS INTERMEDIAS

La propagación se realizó mediante un modelo numérico desde la profundidad de 500 [m] (para asegurar que se propaga desde aguas profundas) hasta la profundidad de 10 [m] con el programa de propagación espectral STWAVE.

- MODELO STWAVE

El modelo STWAVE fue desarrollado por Jane McKee Smith, Ann R. Sherlock y Donald T. Resio del Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg en el año 2001. STWAVE es un modelo robusto y muy flexible que simula el crecimiento, propagación y transformación de olas sobre la costa, incluyendo los siguientes efectos:

- Shoaling
- Refracción por profundidad y por corrientes;
- Difracción numérica;
- Interacción entre ola y ola;
- Generación de oleaje por el viento;
- Rotura, redistribución y disipación de la energía para un campo de olas en crecimiento.

El modelo opera sobre espectros de energía de ola, o sea que representa la distribución del oleaje tanto en frecuencia como en dirección alrededor de la dirección dominante y el período de pico del espectro, para cada ola individual.

Se pueden considerar espectros direccionales de energías más o menos amplias en función de las características de las olas incidentes, más estrechas en el caso de las olas oceánicas de largo período que en las olas generadas por vientos locales.

En el caso del modelo STWAVE es necesario especificar parámetros de forma para la generación del espectro.

- HIPÓTESIS DEL MODELO

Las hipótesis asumidas por el modelo son:

- Pendiente suave y reflexión de olas despreciable. La energía de las olas puede propagarse sólo de *offshore a nearshore* (tipo Mild Slope equation).
- Condiciones de oleaje offshore espacialmente homogéneas. La variación del espectro de olas en el límite offshore es raramente conocida. Por esto el espectro de entrada es constante a lo largo de esta condición de borde.
- Oleaje, viento y corrientes en estado permanente. STWAVE esta formulado como un modelo en estado permanente. Esto reduce el tiempo computacional y es apropiado para condiciones de oleaje que varían muy poco. Para la generación del oleaje, la hipótesis de estado permanente permite que la condición del viento sea tal que pueda generar condiciones de flujo y oleaje totalmente desarrollado
- Los procesos de refracción y shoaling se consideran lineales, por lo que el modelo no representa olas asimétricas.
- Corrientes uniformes a lo largo de la columna de agua. Considera los gradientes verticales constantes, por lo que el modelo no representa la refracción ni el shoaling en la dirección vertical.
- La fricción en el fondo es despreciable, como las distancias de propagación son cortas, la disipación por fricción con el fondo en la capa límite oscilatoria es pequeña, por eso se la puede despreciar.
- Considera la tensión de radiación lineal, puesto que se calcula basado en la teoría lineal de olas (tipo Airy)

Utilizando los datos en aguas profundas, se definió un dominio de cálculo exterior que incluyó la mayor cantidad de puntos, respetando la consistencia entre el alejamiento de la costa con la disponibilidad de datos de oleaje de aguas adentro (“offshore”).

Luego de combinar los datos disponibles, se dimensionaron dos grillas de cálculo en Stwave, para determinar los efectos desde aguas profundas hasta una zona de aguas someras de una profundidad de 10 [m].

Las dimensiones de las grillas es de $\Delta x = 150$, para la grilla denominada general y $\Delta x = 20$ para la grilla denominada detalle, la cual esta anidada a la grilla general.

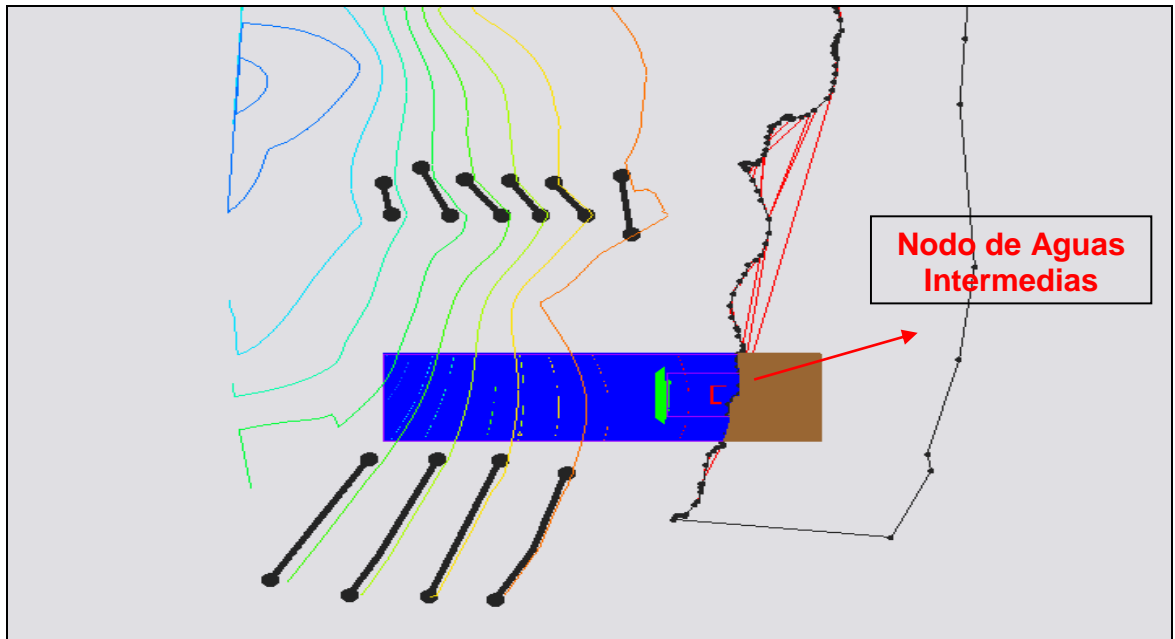


Figura 4-3 Malla Detalle anidada a Malla General en Modelo Stwave (Fuente Elaboración Propia)

Para las mallas antes nombradas, es donde se introduce el espectro de ondas incidentes, el cual se genera a partir de la combinación de valores de H_s y T_p para aguas profundas según las distintas recurrencias.

Las direcciones, para una altura unitaria y con espectro TMA, a propagar son los que en las Tablas 4-2 a 4-3 poseen las mayores frecuencias, las que se resumen en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Direcciones y Periodos de Propagación en Stwave (Fuente Elaboración Propia)

Direcciones a Propagar	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
Periodos de Propagación	6	6	6	6	6	6	6
	8	8	8	8	8	8	8
	10	10	10	10	10	10	10
	12	12	12	12	12	12	12
	14	14	14	14	14	14	14
	16	16	16	16	16	16	16
	18	18	18	18	18	18	18
	20	20	20	20	20	20	20
	22	22	22	22	22	22	22
	24	24	24	24	24	24	24

Los resultados obtenidos a partir de la modelación en Stwawe serán utilizados para la transferencia espectral con el método cuasi-purista para definir los coeficientes de transformación de altura y dirección, con esta información se realizó la propagación bin por bin de cada espectro de oleaje de los 20 años de base de datos.

Una vez que se conoce cada bin en el punto de extracción de los coeficientes, se re arma el espectro y posteriormente se determinan sus parámetros de resumen.



**Figura 4-4 Ubicación de punto de extracción de coeficientes, coordenadas 769715,860 E
6163756.940 S, profundidad 10 [m]
(Fuente Elaboración Propia)**

4.1.2.4 DEFINICIÓN DEL OLEAJE EN AGUAS SOMERAS

Para transferir los datos desde los 10 [m] de profundidad obtenidos mediante Stwawe hasta el sector de estudio (3 [m]) se empleó un software especializado denominado “sistema Mike21”, el cual consta de módulos específicos para el cálculo de la transformación del oleaje y de la hidrodinámica.

Para la modelación del oleaje dentro del recinto portuario se utilizó el modulo BW (Boussinesq Wave Model), el cual resuelve numéricamente las ecuaciones bidimensionales de Boussinesq. El modelo puede simular los efectos combinados de la refracción, difracción y reflexión parcial.

Éste modelo matemático reproduce los efectos combinados de la mayoría de los fenómenos del oleaje de interés en la ingeniería de costas tal como la refracción, difracción, asomeramiento por fondo y reflexión parcial de oleaje irregular de amplitud finita propagándose sobre batimetrías complejas. Sin embargo una de las restricciones que tiene es la de modelar oleaje rompiente, pero toma en cuenta este efecto con la disipación de energía. Además el modelo matemático es capaz de simular la reflexión parcial que producen algunos taludes y estructuras.

Para mayor detalle del Modelo Mike 21 BW, ver ANEXOS I

Como se mencionó anteriormente se aplica el modelo Mike 21 BW para transferir los espectros desde aguas intermedias que fueron obtenidos de la propagación realizada desde aguas profundas del espectro bidimensional mediante la aplicación de las funciones de transferencia determinadas con Stwave. Este nuevo nodo se ubica a una profundidad de 3 [m] aproximadamente.

El método utilizado en la transferencia espectral es similar al que se utilizó con Stwave, sin embargo se ha limitado el coeficiente de agitación para que sea capaz de simular la rotura del oleaje, es decir, el método cuasi-purista modificado, considerando sólo los casos de oleaje más significativos encontrados a partir del Clima Operacional de Olas en Aguas Intermedias.

4.1.3 ANÁLISIS DE CLIMA OPERACIONAL

4.1.3.1 OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

A continuación se adjuntan las tablas de incidencia de Periodo v/s Dirección, Altura v/s Dirección y Altura v/s Periodo para el nodo mostrado en la Figura 4-2, que representan las frecuencias de cada parámetro de resumen en condiciones de aguas profundas en costa afuera de Constitución.

Cada Tabla posee una base de datos de 20 años, desde el 1 de junio de 1985 hasta el 31 de diciembre del año 2004.

Tabla 4-2 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Periodo Offshore (Constitución)
(Fuente Ref. 11)

Alturas de Ola (m)	Periodo de Oleaje (s)											Totales	A (%)	C (%)	
	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0 +				
	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0					
0.0 - 0.5															
0.5 - 1.0					2	4	8	5		1		20		100.00	
1.0 - 1.5				9	99	309	457	210	54	6		1144	0.03	100.00	
1.5 - 2.0			14	35	391	2327	2304	946	415	74	7	6513	1.97	99.97	
2.0 - 2.5			56	270	525	4822	5272	1663	741	185	32	13566	11.19	98.00	
2.5 - 3.0			30	412	413	4370	7088	1952	706	142	19	15132	21.31	86.81	
3.0 - 3.5			2	311	377	2149	6098	1891	368	31	2	11220	26.00	63.49	
3.5 - 4.0				162	321	721	3010	1589	188	18		6009	19.28	37.49	
4.0 - 4.5				97	128	269	1106	856	90	8		2554	10.33	18.21	
4.5 - 5.0				27	130	118	419	373	82	2		1151	4.39	7.88	
5.0 - 5.5				3	93	51	163	153	49	1		513	1.98	3.50	
5.5 - 6.0					41	23	94	54	20			232	0.88	1.52	
6.0+					26	19	37	54	2			138	0.40	0.64	
Totales	0	0	102	1326	2546	15173	26056	9746	2715	468	60	58192	0.24	0.24	
A (%)	0.00	0.00	0.18	2.28	4.38	26.07	44.78	16.75	4.67	0.80	0.10		100.00		
C (%)	100.00	100.00	100.00	99.82	97.55	93.17	67.10	22.32	5.57	0.91	0.10				

Tabla 4-3 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Dirección Off Shore (Constitución)
(Fuente Ref. 11)

Direcciones	Alturas de Ola (m)													Totales	A (%)	C (%)
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0 +			
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0				
0.00				7	12	14	21	31	32	17	14	12	15	175	0.30	100.00
22.50				3				1	4	1				9	0.02	99.70
45.00				1	3	3								7	0.01	99.68
67.50			1			2	4							7	0.01	99.67
90.00					8	2	2							12	0.02	99.66
112.50				4	7	6	5	4	1	1	2			30	0.05	99.64
135.00			3	3	11	4	2	4		2				29	0.05	99.59
157.50			2	12	19	20	4	2	2					61	0.10	99.54
180.00			4	54	58	55	22	18	11					222	0.38	99.43
202.50		2	97	611	1784	2155	1784	1036	400	113	15	4	6	8007	13.76	99.05
225.00		6	560	3545	8134	9598	6667	3329	1268	485	220	85	12	33909	58.27	85.29
247.50		11	370	1705	2808	2416	1863	937	432	193	75	45	28	10883	18.70	27.02
270.00		1	75	419	411	475	451	305	163	108	57	27	27	2519	4.33	8.32
292.50			25	100	147	177	183	161	101	74	30	14	19	1031	1.77	3.99
315.00			4	37	104	130	119	100	78	82	56	19	14	743	1.28	2.22
337.50			3	12	60	75	93	81	62	75	44	26	17	548	0.94	0.94
Totales	0	20	1144	6513	13566	15132	11220	6009	2554	1151	513	232	138	58192		
A (%)	0.00	0.03	1.97	11.19	23.31	26.00	19.28	10.33	4.39	1.98	0.88	0.40	0.24		100.00	
C (%)	100.00	100.00	99.97	98.00	86.81	63.49	37.49	18.21	7.88	3.50	1.52	0.64	0.24			

Tabla 4-4 Tabla de Incidencia Dirección v/s Oleaje Off Shore (Constitución)
(Fuente Ref. 11)

Direcciones	Periodo de Oleaje (s)											Totales	A (%)	C (%)
	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0 +			
	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0				
0.00			13	78	65	15	4					175	0.30	100.00
22.50				5	1		2		1			9	0.02	99.70
45.00				4		1			2			7	0.01	99.68
67.50				6			1					7	0.01	99.67
90.00				8				4				12	0.02	99.66
112.50				17	5		2	5		1		30	0.05	99.64
135.00			1	6		10	4	7		1		29	0.05	99.59
157.50			2	5		19	13	17	5			61	0.10	99.54
180.00			6	25	22	43	74	42	9	1		222	0.38	99.43
202.50			9	499	708	2029	3553	987	191	29	2	8007	13.76	99.05
225.00			9	234	650	8356	16227	6602	1565	239	27	33909	58.27	85.29
247.50				7	373	3195	4799	1602	715	162	30	10883	18.70	27.02
270.00			1	18	192	902	895	329	157	24	1	2519	4.33	8.32
292.50			5	39	184	379	278	84	53	9		1031	1.77	3.00
315.00			20	136	184	177	160	50	14	2		743	1.28	2.22
337.50			36	239	162	47	44	17	3			548	0.94	0.94
Totales	0	0	102	1326	2546	15173	26056	9746	2715	468	60	58192		
A (%)	0.00	0.00	0.18	2.28	4.38	26.07	44.78	16.75	4.67	0.80	0.10		100.00	
C (%)	100.00	100.00	100.00	99.82	97.55	93.17	67.10	22.32	5.57	0.91	0.10			

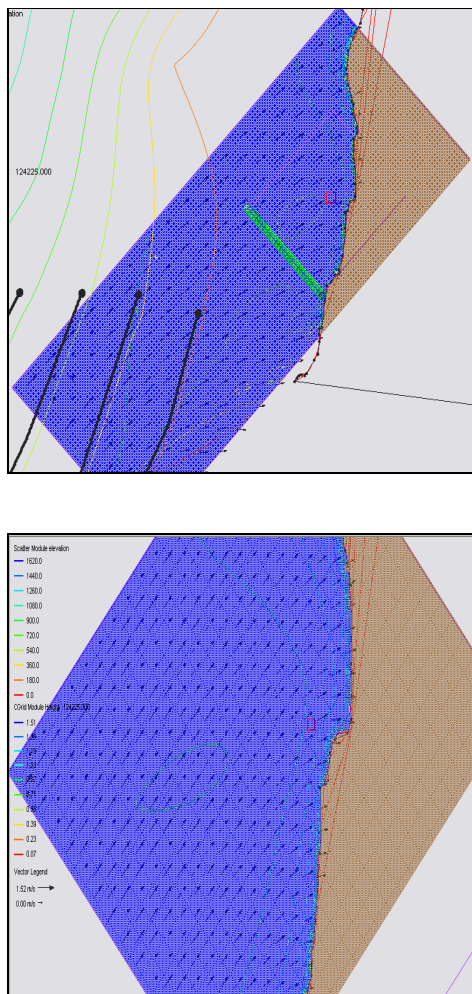
Al observar las Tablas 4-2, 4-3 y 4-4 se concluye que el oleaje es proveniente de las direcciones del 3° cuadrante, con su peak máximo en la dirección SW (225°), lo que coincide con el oleaje reinante en las costas de Chile.

También se puede observar que para el periodo, las mayores frecuencias se encuentran entre los 10 y 16 segundos, por ende se puede concluir que los datos representan un swell proveniente del hemisferio sur, en este caso del SW.

En cuanto a la altura de ola, esta se encuentra entre los 2 y 3.5 [m] concentrando su máximo en el intervalo 2,5 y 3 [m], las cuales son alturas de ola grandes asociadas a tormentas lejanas.

4.1.3.2 OLAJE EN AGUAS INTERMEDIAS

Los resultados obtenidos de las modelaciones con Stwawe para las direcciones³ 225°, 270° y 315° son adjuntados a continuación:



**Figura 4-5 Grilla General y Detalle Dirección 225°
(Fuente Elaboración Propia)**

³ Las direcciones restantes serán adjuntadas en ANEXOS II

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU, VI REGIÓN CHILE

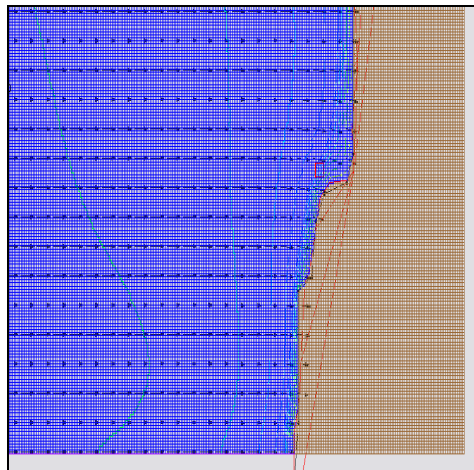
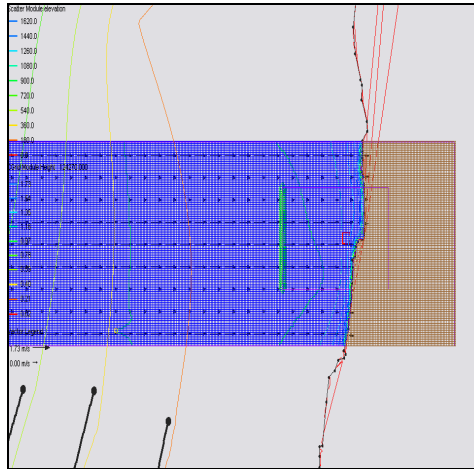


Figura 4-6 Grilla General y Detalle Dirección 270°
(Fuente Elaboración Propia)

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU, VI REGIÓN CHILE

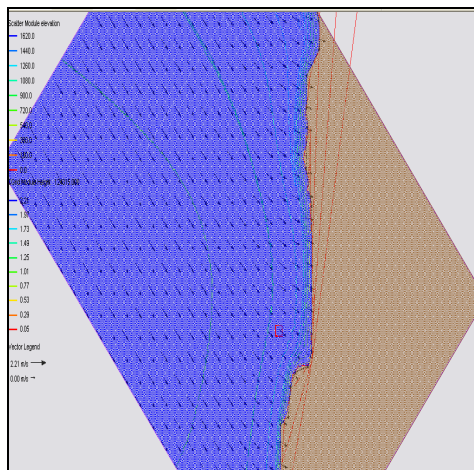
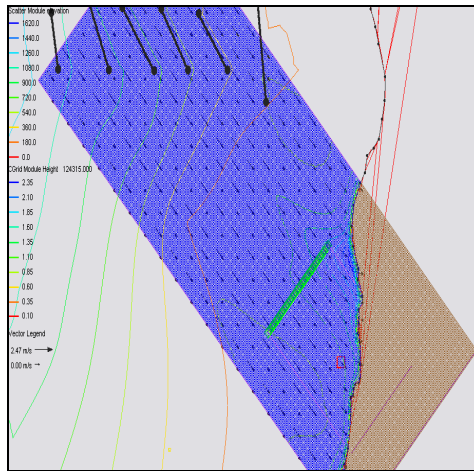


Figura 4-7 Grilla General y Detalle Dirección 315°
(Fuente Elaboración Propia)

Para conocer los resultados de la transferencia espectral con el método cuasi-purista, estos son mostrados en los Gráficos 4-1 y 4-2.:

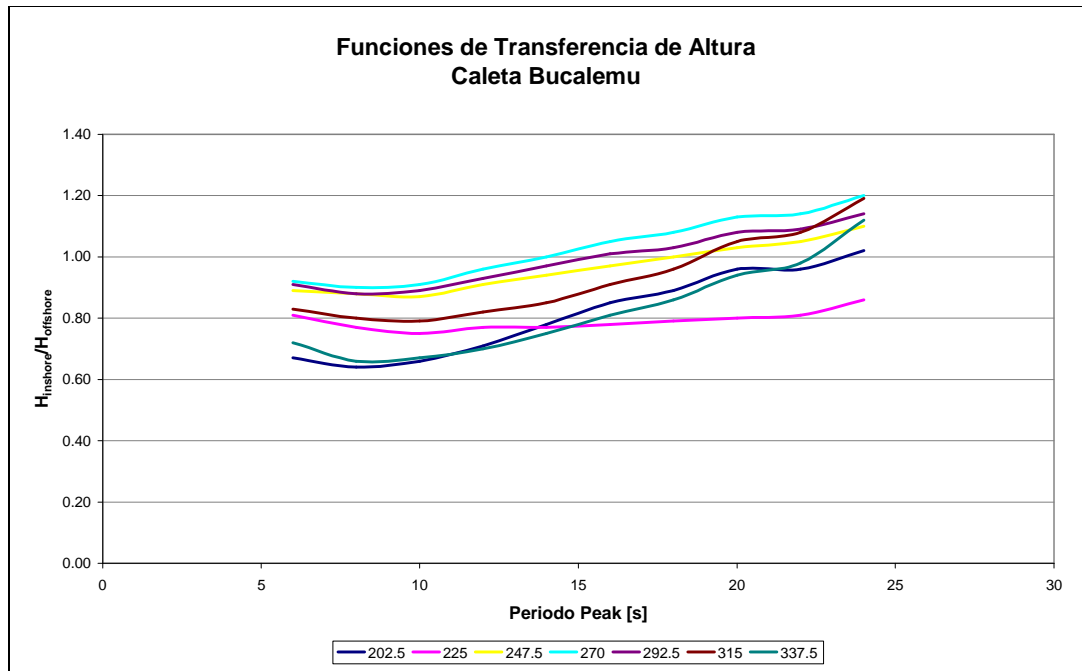


Gráfico 4-1 Funciones de Transferencia Altura de ola v/s Periodo Peak (Fuente Elaboración Propia)

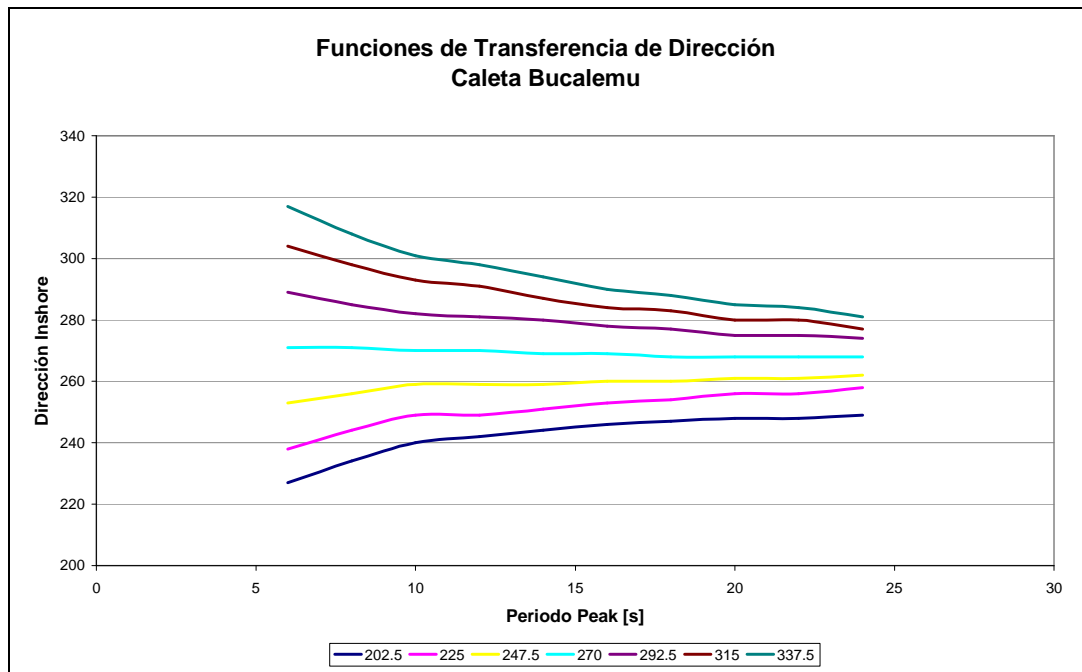


Gráfico 4-2 Funciones de Transferencia Dirección v/s Periodo Peak (Fuente Elaboración Propia)

Los datos en forma de tabla de incidencia se adjuntan en las Tablas 4-5 y 4-6:

Tabla 4-5 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Dirección a 10 [m] de Profundidad
(Fuente Elaboración Propia)

Direcciones	Alturas de Ola (m)													Totales	A (%)	C (%)	
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0 +				
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0					
0.00															0	0.00	100.00
22.50															0	0.00	100.00
45.00															0	0.00	100.00
67.50															0	0.00	100.00
90.00															0	0.00	100.00
112.50															0	0.00	100.00
135.00															0	0.00	100.00
157.50															0	0.00	100.00
180.00															0	0.00	100.00
202.50															0	0.00	100.00
225.00		12	68	51	3	2									136	0.21	100.00
247.50		683	6834	16037	15388	8276	2991	1114	431	141	36	5	1		51937	80.80	99.79
270.00	5	305	2275	3515	2385	1455	811	477	188	87	48	12	31		11594	18.04	18.99
292.50		7	76	94	124	117	80	54	13	4	4				573	0.89	0.95
315.00			10	15	15										40	0.06	0.06
337.50															0	0.00	0.00
Totales	5	1007	9263	19712	17915	9850	3882	1645	632	232	88	17	32	64280			
A (%)	0.01	1.57	14.41	30.67	27.87	15.32	6.04	2.56	0.98	0.36	0.14	0.03	0.05		100.00		
C (%)	100.00	99.99	98.43	84.02	53.35	25.48	10.16	4.12	1.56	0.57	0.21	0.08	0.05				

**Tabla 4-6 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Periodo a 10 [m] de Profundidad
(Fuente Elaboración Propia)**

Alturas de Ola [m]	Periodos [s]													Totales	A (%)	C (%)
	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.00 +			
	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	22.0	24.0				
0.00 - 0.50						3				2				5	0.01	100.00
0.50 - 1.00				9	59	286	364	206	72	10	1			1007	1.57	99.99
1.00 - 1.50			8	115	551	2831	3359	1458	749	163	25	4		9263	14.41	98.43
1.50 - 2.00			4	251	1042	6276	7736	2532	1399	401	64	7		19712	30.67	84.02
2.00 - 2.50			1	130	777	3957	8985	2908	955	180	22			17915	27.87	53.35
2.50 - 3.00				38	261	1531	4926	2662	388	41	3			9850	15.32	25.48
3.00 - 3.50				8	86	504	1645	1393	226	18	2			3882	6.04	10.16
3.50 - 4.00					56	207	657	554	164	6	1			1645	2.56	4.12
4.00 - 4.50					8	75	260	191	93	5				632	0.98	1.56
4.50 - 5.00					4	15	126	76	11					232	0.36	0.57
5.00 - 5.50						11	47	30						88	0.14	0.21
5.50 - 6.00							9	8						51937	0.03	0.08
6.00 +							2	30						32	0.05	0.05
Totales	0	0	13	551	2844	15696	28116	12048	4057	826	118	11	0	64280		
A (%)	0.00	0.00	0.02	0.86	4.42	24.42	43.74	18.74	6.31	1.29	0.18	0.02	0.00		100.00	
C (%)	100.00	100.00	100.00	99.98	99.12	94.70	70.28	26.54	7.80	1.49	0.20	0.02	0.00			

A partir de los resultados expuestos se concluye que la altura de ola es proporcional al periodo, es decir, a mayor periodo mayor es la altura de ola. , esto ocurre para todas las direcciones del 3° y 4° cuadrante exceptuando la dirección 225° en donde la altura permanece constante para periodos de 5 a 30 segundos.

Se observa además que el oleaje incidente a los 10 [m] de profundidad es proveniente del W y WSW (270° y 247.5° respectivamente), ubicándose en forma mas perpendicular a la costa.

En cuanto al periodo, se mantienen como dominantes los 10 a 16 segundos, por ende es el mismo swell de aguas profundas que se ha propagado.

4.1.3.3 OLAJE EN AGUAS SOMERAS

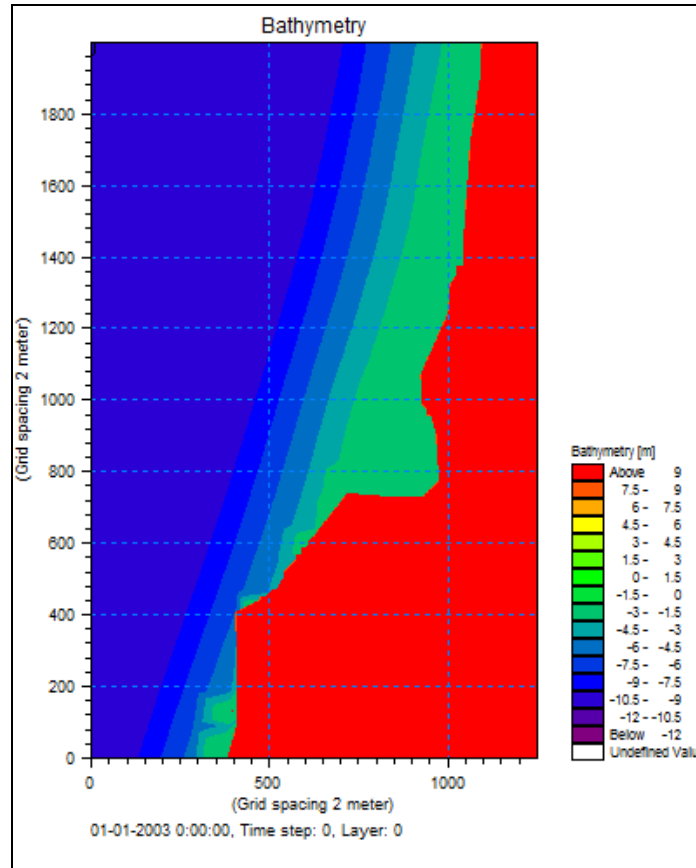
Los datos de la Tabla 4-7 son obtenidos a partir del análisis de las Tablas 4-5 y 4-6, con las cuales se definió un rango de altura, periodo y dirección que tuvieran un 95% de representación.

**Tabla 4-7 Combinatoria a propagar en Mike 21 BW
(Fuente Elaboración Propia)**

H	T	D
1.25	9	247.5
1.75	11	
2.25	13	
2.75	15	
3.25	17	
1.25	11	
1.75	13	
2.25	15	
2.75	17	
3.25	9	
1.25	13	
1.75	15	
2.25	17	
2.75	9	
3.25	11	
1.25	15	
1.75	17	
2.25	9	
2.75	11	
3.25	13	
1.25	17	
1.75	9	
2.25	11	
2.75	13	
3.25	15	

H	T	D
1.25	9	270
1.75	11	
2.25	13	
2.75	15	
3.25	17	
1.25	11	
1.75	13	
2.25	15	
2.75	17	
3.25	9	
1.25	13	
1.75	15	
2.25	17	
2.75	9	
3.25	11	
1.25	15	
1.75	17	
2.25	9	
2.75	11	
3.25	13	
1.25	17	
1.75	9	
2.25	11	
2.75	13	
3.25	15	

A continuación se adjunta en la Figura 4-8 la grilla de batimetría utilizada en el Modelo Mike 21 BW



**Figura 4-8 Grilla de Batimetría del Modelo Mike 21 BW
(Fuente Elaboración Propia)**

Los resultados obtenidos a partir de las modelaciones en Mike 21 BW, son expuestos en las Tablas 4-8 y 4-9 de a continuación:

**Tabla 4-8 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Dirección a 3 [m] de Profundidad
(Fuente Elaboración Propia)**

Direcciones	Alturas de Ola (m)																Totales	A (%)	C (%)
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0 +			
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0				
0.00 - 200																	0	0.00	100.00
210.00																	0	0.00	100.00
220.00																	0	0.00	100.00
230.00																	0	0.00	100.00
240.00																	0	0.00	100.00
250.00																	0	0.00	100.00
260.00																	0	0.00	100.00
270.00					1	2	1										4	0.01	100.00
280.00			7	18	74	27	47	33	26	16	5	5					258	0.40	99.99
290.00			5	99	378	873	1120	833	620	373	118	86	31				4536	7.06	99.59
300.00		2	31	195	836	1824	3396	3570	3399	1996	894	383	61				16587	25.81	92.53
310.00		13	62	248	850	1786	3230	4167	4500	3124	1754	884	277				20895	32.52	66.72
320.00			25	229	733	1505	2533	2746	3341	3144	2296	1519	634	3			18708	29.11	34.20
330.00		1	8	67	230	404	479	448	399	403	278	319	226	6			3268	5.09	5.09
340.00			4														4	0.01	0.01
350.00																	0	0.00	0.00
Totales	0	16	142	856	3102	6421	10806	11797	12285	9056	5345	3196	1229	9	0	0	64260		
A (%)	0.00	0.02	0.22	1.33	4.83	9.99	16.82	18.36	19.12	14.09	8.32	4.97	1.91	0.01	0.00	0.00		100.00	
C (%)	100.00	100.00	99.98	99.75	98.42	93.59	83.60	66.79	48.43	29.31	15.22	6.90	1.93	0.01	0.00	0.00			

**Tabla 4-9 Tabla de Incidencia de Oleaje v/s Periodo a 3 [m] de Profundidad
(Fuente Elaboración Propia)**

Alturas de Ola [m]	Periodos [s]																	Totales	A (%)	C (%)
	0.0 - 5.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.00 +			
		6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0	20.0				
0.00 - 0.20																		0	0.00	100.00
0.20 - 0.40							6	4	1	1		3		1				16	0.02	100.00
0.40 - 0.60			5		1	13	18	21	26	37	12		2	5	1	1		142	0.22	99.98
0.60 - 0.80			4	10	33	48	138	154	172	122	106	32	29	9	3	4	1	865	1.35	99.75
0.80 - 1.00		3	22	36	98	243	548	590	600	447	259	85	110	31	5	5		3082	4.79	98.41
1.00 - 1.20		15	32	97	182	471	999	1372	1234	919	625	180	193	62	19	19	2	6421	9.99	93.61
1.20 - 1.40		5	48	156	249	629	1521	2702	2361	1656	919	235	174	100	33	17	1	10806	16.81	83.63
1.40 - 1.60			15	76	202	568	1451	2801	2856	2045	1070	304	222	123	32	28	4	11797	18.35	66.82
1.60 - 1.80				30	124	347	945	2473	3365	2714	1464	427	231	122	29	12	2	12285	19.11	48.47
1.80 - 2.00				4	30	102	433	1338	2448	2531	1588	385	162	63	6	4	2	9096	14.15	29.36
2.00 - 2.20					1	15	96	552	1307	1519	1199	453	145	51	1	4	2	5345	8.31	15.21
2.20 - 2.40						3	15	144	558	952	785	439	224	55	9	10	2	3196	4.97	6.90
2.40 - 2.60							1	18	150	369	380	154	100	46	6	4	1	1229	1.91	1.93
2.60 - 2.80											2	7						9	0.01	0.01
2.80 - 3.00																		0	0.00	0.00
3.00 +																		0	0.00	0.00
Totales	0	23	126	409	920	2439	6171	12169	15078	13312	8409	2704	1592	668	144	108	17	64289		
A (%)	0.00	0.04	0.20	0.64	1.43	3.79	9.60	18.93	23.45	20.71	13.08	4.21	2.48	1.04	0.22	0.17	0.03		100.00	
C (%)	100.00	100.00	99.96	99.77	99.13	97.70	93.91	84.31	65.38	41.93	21.22	8.14	3.93	1.46	0.42	0.19	0.03			

Para un mejor análisis de los datos se adjuntan los gráficos 4-3 y 4-4

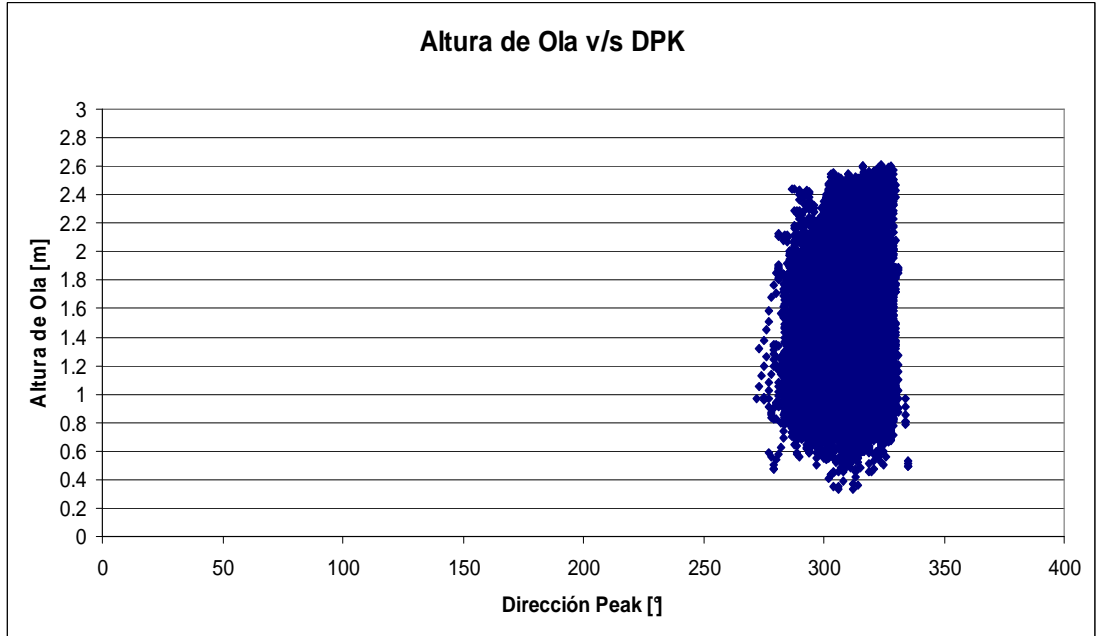


Gráfico 4-3 Altura de Ola v/s Dirección Peak en profundidad 3[m]
(Fuente Elaboración Propia)

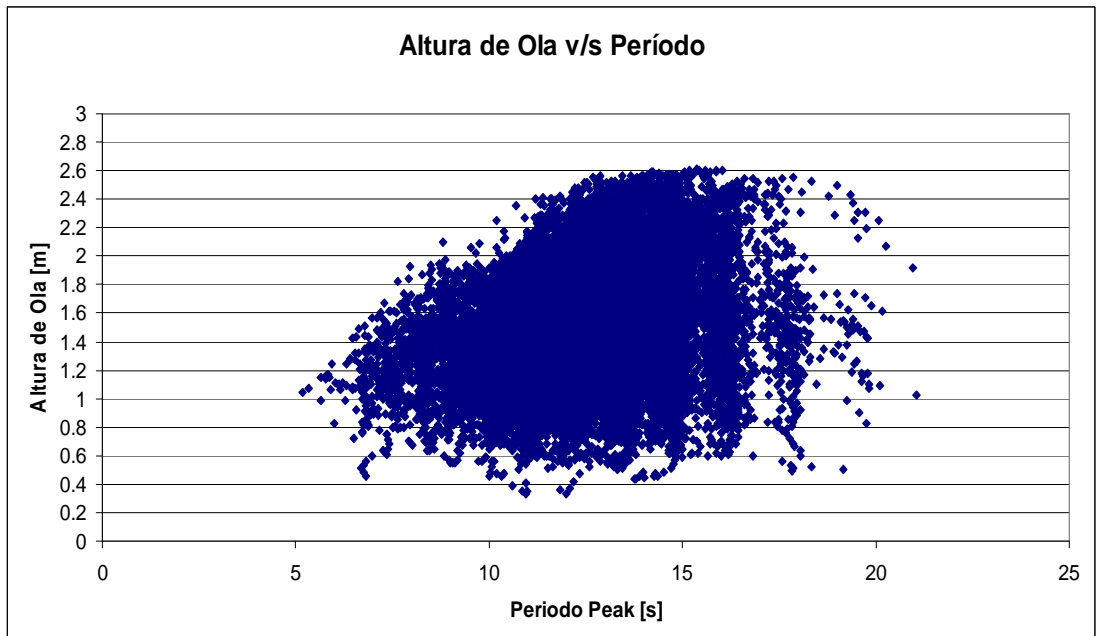


Gráfico 4-4 Altura de Ola v/s Período Peak en profundidad 3[m]
(Fuente Elaboración Propia)

A partir de las Tablas 4-8 y 4-9 se observa que las direcciones con la que llega el oleaje a la costa se encuentran entre los 250° y 350° teniendo una máxima frecuencia en los 310° (NW), y volviéndose cada vez más perpendicular a esta.

Las alturas de ola son de mayor magnitud que en aguas intermedias, como es de esperar ya que el oleaje aumenta a medida que la profundidad disminuye y se concentran entre los periodos 5 y 20 segundos, concentrando las mayores frecuencias entre los 10 y 16 segundos, al igual que en aguas profundas e intermedias, por conclusión se puede decir que el swell se propagó hasta la profundidad de 3 [m], sin embargo se observa la presencia de un pequeño sea, con periodos entre 5 y 9 segundos, generado normalmente por vientos locales.

4.1.4 ANÁLISIS CLIMA EXTREMO

4.1.4.1 OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS

La descripción estadística del oleaje extremal trata de reproducir el clima o comportamiento del fenómeno en las condiciones de mayor intensidad o dominantes. El régimen extremal corresponde a la función de distribución de los valores extremos de una determinada variable que expresa la probabilidad de que cierto valor no sea superado, o minorado, en un periodo de tiempo prefijado.

En el presente estudio, se utilizó el análisis de la muestra total, la cual representa las alturas de ola versus los periodos costa afuera.

Las funciones de distribución utilizadas fueron Gumbel y Weibull, cuyos resultados se adjuntan en el Gráfico 4-5:

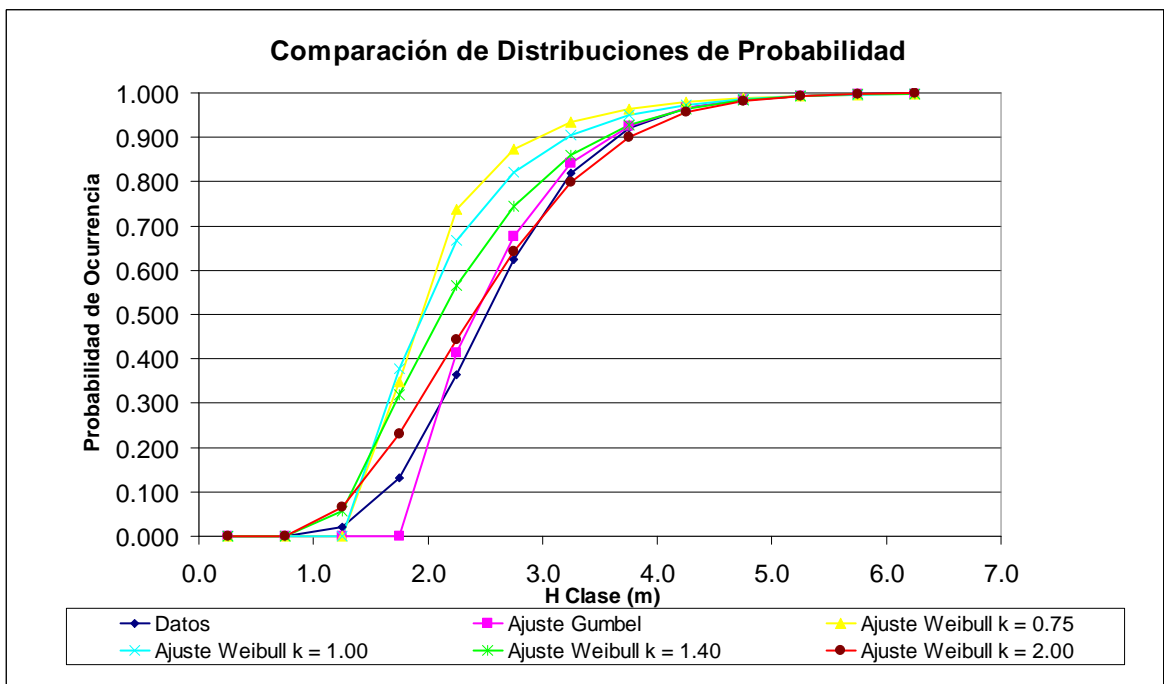


Gráfico 4-5 Comparación de Distribuciones de Probabilidad
(Fuente Elaboración Propia)

A partir de la función de distribución Gumbel se calcularon las bandas de confianza de un 95% (que implica un 95% de probabilidad de que los datos de altura estimada estén dentro de la banda), y se obtuvo las alturas de ola significativa para los periodos de retorno 5, 10, 25, 50, 75 y 100 años.

Los resultados obtenidos son adjuntados en la Tabla 4-10:

Tabla 4-10 Resultados de Alturas Significativas y Bandas de Confianza de 95%
(Fuente Elaboración Propia)

Periodos de Retorno [años]	Hmo Estimada [m]	Banda Inferior de Hmo [m]	Banda Superior de Hmo [m]
5	3.09	1.37	4.81
10	3.55	1.71	5.40
25	4.14	2.12	6.15
50	4.57	2.43	6.70
75	4.82	2.61	7.03
100	5.00	2.73	7.26

Los resultados de la Tabla 4-10 son mostrados de forma más explícita en el Gráfico 4-6:

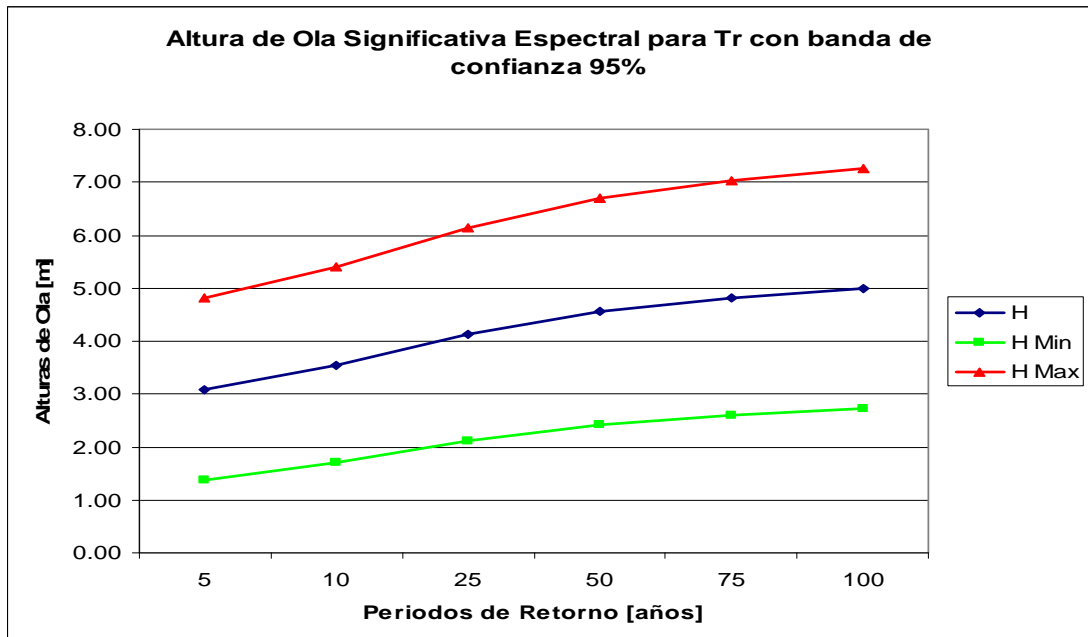


Gráfico 4-6 Resultados de Altura Significativa con Banda de Confianza 95%
(Fuente Elaboración Propia)

4.1.4.2 OLEAJE EN AGUAS INTERMEDIAS

Para caracterizar el clima extremal en aguas intermedias, se utilizó el modelo de propagación Stwave para transferir las condiciones de oleaje extremal de aguas profundas hacia aguas más someras.

Las dimensiones de las grillas son las mismas que en el ítem 4.1.2.3 y el punto de control también se sitúa a 10 [m] de profundidad, sin embargo en este caso las alturas a propagar no serán unitarias sino que se propagarán las alturas obtenidas como resultados del análisis extremal a las cuales se les asoció un periodo y dirección, que se obtuvieron a partir de las tablas de incidencia adjuntadas en las Tablas 4-1 a la 4-3.

El periodo y dirección asociados son 13 [s] y 225°, los cuales fueron escogidos por medio de la siguiente metodología, para cada altura obtenida mediante el análisis extremal, se obtuvo, en las tablas de incidencia, en que intervalo estaba contenida dicha altura, conociendo el intervalo se observó la dirección y el periodo que tenía mayor frecuencia, siendo estos los escogidos y asociados a cada altura de ola extrema.

El espectro utilizado es el mismo que para oleaje operacional, TMA.

Por lo tanto, en modo de resumen, las alturas, direcciones y periodos a utilizar en la propagación de condiciones extremas en Stwave, son adjuntadas en la Tabla 4-11 de a continuación:

**Tabla 4-11 Alturas, Direcciones y Periodos de Propagación en Stwave
(Fuente Elaboración Propia)**

Altura Extremal	Dirección [°]	Periodo [s]
3.09	225	13
3.55	225	13
4.14	225	13
4.57	225	13
4.82	225	13
5.00	225	13

Los resultados obtenidos de la modelación en Stwave son los siguientes:

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU, VI REGIÓN CHILE

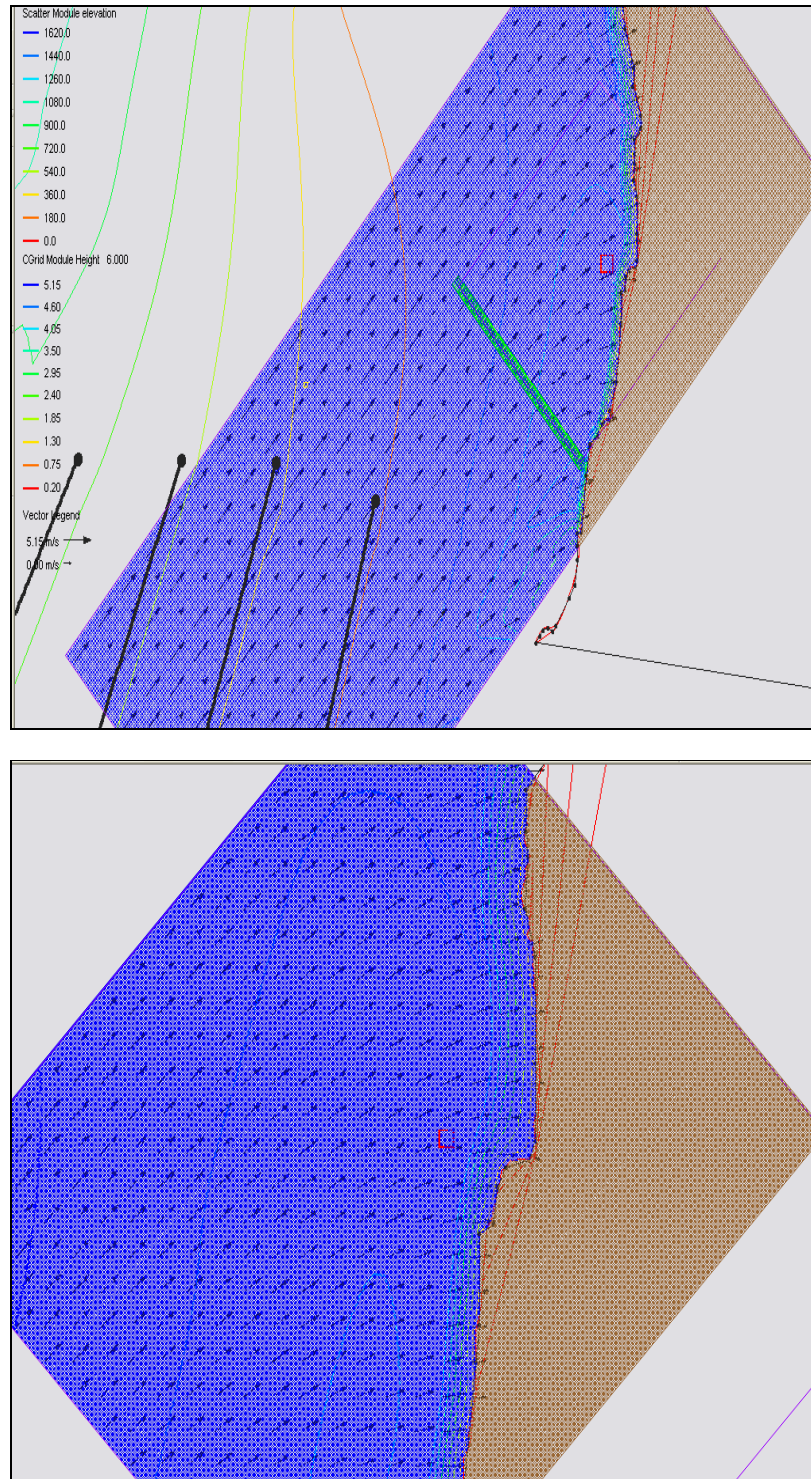


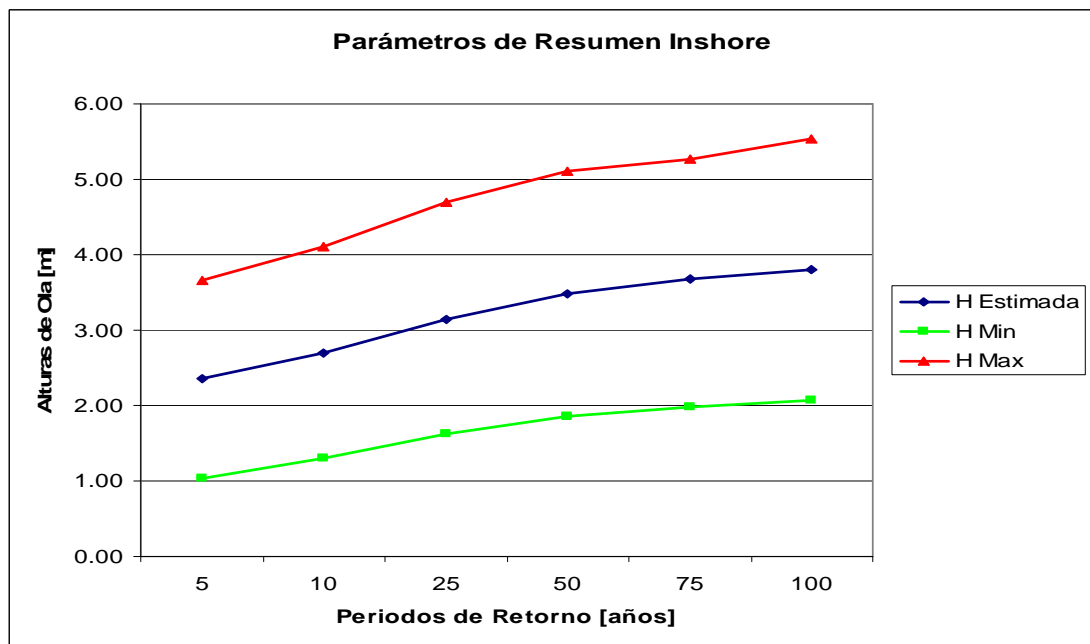
Figura 4-9 Grilla General y Detalle para Altura Extremal Estimada, D 225° y T 13 [s]
(Fuente Elaboración Propia)

En este análisis la transferencia del espectro es directa, en donde se obtuvieron los coeficientes de transformación de altura y dirección, en el mismo de punto extracción que se señala en la Figura 4-4.

Por lo tanto los parámetros de resumen obtenidos son los presentados a continuación:

**Tabla 4-12 Parámetros de resumen offshore e inshore
(Fuente Elaboración Propia)**

Offshore			Inshore					
Hmin	Hestimada	Hmax	Hmin	D	Hestimada	D	Hmax	D
1.37	3.09	4.81	1.04	249	2.35	249	3.66	249
1.71	3.55	5.40	1.30	249	2.70	249	4.11	249
2.12	4.14	6.15	1.62	249	3.15	249	4.69	249
2.43	4.57	6.70	1.85	249	3.48	249	5.10	249
2.61	4.82	7.03	1.99	249	3.67	249	5.26	249
2.73	5.00	7.26	2.08	249	3.81	249	5.53	249



**Gráfico 4-7 Parámetros Inshore
(Fuente: Elaboración Propia)**

4.1.4.3 OLEAJE EN AGUAS SOMERAS

Para obtener los datos de oleaje extremo en el pie de la obra se utilizó la fórmula de Goda (1985)

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' \rightarrow h/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 h), \beta_{\max} H_0', K_s H_0'\} \rightarrow h/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

$$\beta_0 = 0.028(H_0' / L_0)^{-0.38} \exp[20(\tan \theta)^{1.5}]$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta]$$

$$\beta_{\max} = \max\{0.92, 0.32(H_0' / L_0)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta]\}$$

Ecuación 4-1

Donde:

K_s = Coeficiente de Shoaling
 K_s' = Coeficiente de Shoaling Lineal
 H_0 = Altura de ola offshore [m]
 h = Profundidad [m]
 L_0 = Longitud de onda offshore [m]
 $\tan \theta$ = pendiente del fondo

La zona de estudio está a una profundidad de 3 [m], por que lo se asumirá una condición de ola rota obtenida por medio del criterio de Miche (1944) el cual resuelve la Ecuación 4-2

$$\frac{H_b}{d_b} \cong 0.89$$

Ecuación 4-2

Es decir, en aguas poco profundas las olas rompen en una profundidad de aproximadamente 10% mayor que la altura de la ola.

Por lo tanto para una profundidad de 3 [m], considerando la marea (1.52 [m]), la altura de ola extrema y por ende la de diseño es igual a 4.02 [m].

4.1.5 CONDICIONES ACTUALES DE OPERATIVIDAD

La estabilidad es uno de los factores más importantes en la seguridad de todo bote pesquero. Corresponde a la capacidad de un buque de volver a su posición de equilibrio después de una escora provocada por una fuerza externa como el viento, las olas o fuerzas generadas por las acciones de pesca.

Un bote pesquero se considera estable cuando posee suficiente estabilidad positiva para contrarrestar las fuerzas externas normales generadas por las condiciones meteorológicas y de pesca, y recuperar su posición adrizada.



Figura 4-10 Buque pesquero estable
(Fuente Guía para buques pesqueros – SNAME)

Conociendo los datos de olas a una profundidad de 3 [m], se realizó una comparación con la altura límite de oleaje, tanto longitudinal como transversal, que puede existir en la zona de estudio para que los botes permanezcan estables y realicen las operaciones pesqueras de manera óptima y segura.

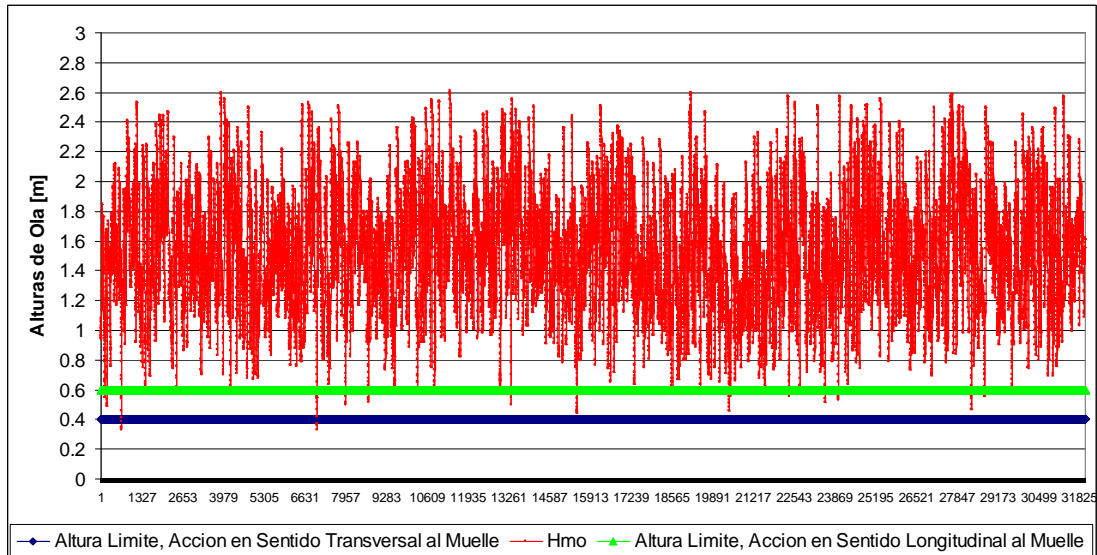
Las alturas límites son adjuntadas en la Tabla 4-13 de a continuación y han sido tomadas a partir de las Recomendaciones de Obras Marítimas Españolas (ROM)

**Tabla 4-13 Condiciones Límite de Operación de Buques en Muelles y Pantanales
(Fuente Ref. 12)**

	Velocidad absoluta del viento (m/s)	Velocidad absoluta de la corriente (m/s)	Altura de Ola (m)
1. Atraque de buques			
Acciones en sentido longitudinal al muelle	17	1	2
Acciones en sentido longitudinal al muelle	10	0.1	1.5
2. Paralización operaciones carga y descarga (para equipos convencionales)			
Acciones en sentido longitudinal al muelle			
<i>Petroleros</i>			
<30,000 TPM	22	1.5	1.5
30,000 - 200,000 TPM	22	1.5	2
>200,000 TPM	22	1.5	2.5
<i>Graneleros</i>			
Cargando	22	1.5	1.5
Descargando	22	1.5	1
<i>Transportadores de Gases Licuados</i>			
<60,000 m3	22	1.5	1.2
>60,000 m3	22	1.5	1.5
<i>Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores</i>	22	1.5	1
<i>Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries</i>	22	1.5	0.5
<i>Trasatlánticos y Cruceros</i>	22	1.5	0.5
<i>Pesqueros de pesca fresca</i>	22	1.5	0.6
Acciones en sentido transversal al muelle			
<i>Petroleros</i>			
<30,000 TPM	20	0.7	1
30,000 - 200,000 TPM	20	0.7	1.2

>200,000 TPM	20	0.7	1.5
<i>Graneleros</i>			
Cargando	22	0.7	1
Descargando	22	0.7	0.8
<i>Transportadores de Gases Licuados</i>			
<60,000 m3	16	0.5	0.81.0
>60,000 m3	16	0.5	1.5
<i>Mercantes de carga general, Pesqueros de altura y congeladores</i>			
	22	0.7	0.8
<i>Portacontenedores, Ro-Ros y Ferries</i>			
	22	0.5	0.3
<i>Trasatlánticos y Cruceros</i>			
	22	0.5	0.3
<i>Pesqueros de pesca fresca</i>			
	22	0.7	0.4

Para el caso de estudio la altura límite utilizada es de 0.4 [m] correspondiente a pesqueros de pesca fresca en sentido transversal al muelle y 0.6 [m] en sentido longitudinal al muelle también para pesqueros de pesca fresca.



**Gráfico 4-8 Altura Límite v/s Alturas de Oleaje
(Fuente Elaboración Propia)**

Como se observa en el Gráfico 4-8, el oleaje existente en la zona de estudio supera las alturas límites de operación tanto longitudinal como transversalmente la gran mayoría del tiempo, donde el downtime es de 99.73% y 99.98% respectivamente, a pesar de estas condiciones de oleaje desafortunadas para la maniobra, los pescadores deben operar de igual modo poniendo en riesgo su seguridad.

Es por ello que es válido el diseño de la estructura de abrigo en el sector para una óptima operatividad de las embarcaciones.

El diseño de la obra de abrigo se verá en mayor profundidad en el Capítulo 5 “MEJORAMIENTO CALETA BUCALEMU”

4.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA CONCEPTUAL DE LAS ROCAS DE BUCALEMU

4.2.1 DEFINICIONES

Una roca es una sustancia natural inerte, que está constituida por dos o más tipos de minerales o de mineraloides. En muchas rocas, las partículas de cada mineral son tan pequeñas que no se distinguen las unas de las otras a simple vista, por lo que parece que estén constituidas por un solo tipo de mineral. Pero si se hace un análisis o una observación con el microscopio se puede comprobar que hay varios tipos de minerales.

Las rocas se clasifican de acuerdo con el proceso de formación que han seguido y se distinguen tres grandes grupos de rocas: sedimentarias, magmáticas y metamórficas.

4.2.1.1 ROCAS SEDIMENTARIAS

Son las rocas formadas por la unión de partículas sueltas, denominadas sedimentos, que se acumulan en los fondos de los valles, de los mares y de los océanos. Teniendo en cuenta el origen de estas partículas, se distinguen cuatro tipos de rocas sedimentarias denominados: detríticos, químicas, bioquímicas y orgánicas.

4.2.1.2 ROCAS ÍGNEAS O MAGMÁTICAS

Las rocas magmáticas son las que se han originado a partir de un magma, que al enfriarse se ha solidificado. Teniendo en cuenta las condiciones en que se produce esta solidificación, se distinguen tres tipos de rocas magmáticas: plutónicas, filonianas o porfídicas y volcánicas.

4.2.1.3 ROCAS METAMÓRFICAS

Son las rocas formadas a partir de otras rocas ya existentes, cuando estas son sometidas a un aumento tal de presión o de temperatura, o de ambas variables a la vez, que a consecuencia de ello, sus minerales se transforman en otros minerales (sin llegar a fundirse), los cuales son capaces de soportar las nuevas condiciones. Debido a ello, la nueva roca presenta una apariencia y unas propiedades diferentes que la roca inicial. Según cual sea la roca inicial aparecen diferentes tipos de rocas metamórficas. Las más conocidas son las indicadas en la Tabla 4-14

**Tabla 4-14 Rocas Metamórficas según Roca Inicial
(Fuente Elaboración Propia)**

ROCA INICIAL	ROCA METAMÓRFICA
Arcilla	Pizarra
Arenisca	Cuarcita
Caliza	Marbre
Granito	Gneis

4.2.2 UTILIZACIÓN DE ROCAS

“Las rocas o piedra natural se tratan de uno de los más antiguos materiales de construcción empleados por el hombre. Este aprendió a trabajar y manejar la piedra natural como arma, como herramienta y como materia prima para la construcción de sus primeros refugios y monumentos. Muchos de estos objetos y construcciones primitivas han llegado hasta nosotros, gracias a las condiciones excepcionales del material con que fueron realizadas.

Las rocas se encuentran en la naturaleza en formaciones de grandes dimensiones, sin forma determinada y constituyendo el principal componente de la parte sólida de la corteza terrestre.

Por constituir un material natural, la piedra no precisa para su empleo más que la extracción y la transformación en elementos de forma adecuada. Sin embargo, es necesario que reúna una serie de cualidades que garanticen su aptitud para el empleo a que se destine. Estas cualidades dependen de su estructura, densidad, compacidad, porosidad, dureza, composición, durabilidad, resistencia a los esfuerzos a que estará sometida, etc.”⁴

De 4 maneras principales se utilizan las piedras en la construcción:

- Como elemento resistente (Se usa para la obtención de piezas naturales de obra de fábrica, cubiertas, etc.)
- Como elemento decorativo (En piezas para cubrir paredes y suelos)
- Como materia prima para la fabricación de otros materiales (Se utiliza para obtener productos conglomerantes para hacer morteros o pasta, piezas cerámicas (arcilla), materiales inertes para el hormigón, etc.)
- Como material de relleno

4.2.3 TIPO DE ROCA PRESENTE EN EL LUGAR DE ESTUDIO

En la Caleta Bucalemu existe una formación rocosa, la cual se pretende utilizar para el diseño de la estructura de abrigo y así mejorar la operatividad de la caleta.

Según el Servicio Nacional de Geología y Minería, el tipo de roca presente en la costa de la Sexta Región es una roca metamórfica del tipo silúrico-carbonífero (esquistos moscovíticos y metafasitas, metachert y serpentinitas con metamorfismo de alto gradiente P/T (Serie Occidental) y metamorfismo del carbonífero temprano)

Además, como complementación, se realizó una clasificación conceptual del tipo de roca de la zona de estudio, en colaboración con el Profesor Hernán Vergara, definiéndola como una roca metamórfica de tipo pizarra, lo que coincide con la clasificación del SERNAGEOMIN.

Para mayor detalle del mapa geológico de la Sexta Región, ver ANEXOS III.

⁴ Ref. 13



**Figura 4-11 Formación Rocosa presente en la Zona de Estudio
(Fuente Elaboración Propia)**



**Figura 4-12 Tipo de Roca en Macizo Rocoso, Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

4.2.3.1 DEFINICIÓN DE ROCA PIZARRA

La roca del tipo pizarra es metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas a grandes temperaturas. Su color es generalmente opaco azulado oscuro y se divide fácilmente en lajas u hojas planas.

El origen de la roca pizarra viene de la transformación de algunas rocas sedimentarias, como las arcillas, que son sometidas a fuertes presiones por movimientos tectónicos, y se forma cuando los minerales de la arcilla se transforman en mica o clorita.

Su principal característica es la división en finas láminas, llamada foliación o esquistosidad.

4.2.3.2 USOS DE LA PIZARRA

4.2.3.2.1 USOS HISTÓRICOS

“El uso de la pizarra en la construcción se remonta al principio de los tiempos. Sobre todo, se ha empleado en aquellos lugares donde se localiza a poca profundidad y se ha usado tanto para la impermeabilización de edificaciones como con fines estructurales.

Evidentemente, la pizarra empleada en construcciones antiguas era tosca y poco elaborada debido a las técnicas empleadas en su obtención y trabajo, pero recurre al principio de visibilidad característico de la pizarra y que la ha hecho tan apreciada.

Históricamente se han dado otros usos a la pizarra, entre los que cabe destacar los elementos decorativos y el arte funerario. En efecto, los antiguos pueblos que han poblado la península han utilizado lajas de pizarra a modo de lápidas y en la construcción de tumbas.”⁵

4.2.3.2.2 USO ACTUAL DE LA PIZARRA

En estos días la aplicación más común de la pizarra es en la construcción de cubiertas. La pizarra es impermeable y su facilidad para ser exfoliada en láminas de unos milímetros de espesor la convierte en un material idóneo para la confección de cubiertas, siendo este su uso más extendido.

Las cualidades físico-mecánicas de la pizarra y sus especiales formatos le permiten adaptarse a todo tipo de superficies, ya sean planas o curvas e independientemente del grado de inclinación; esta facilidad de adaptarse a todas las superficies y sus incomparables cualidades físicas, convierten a este material en la mejor opción como material de ornamentación.

⁵ Ref.14

4.3 MAREAS

La marea se define como un movimiento regular y periódico de las aguas del mar que cubren y abandonan sucesivamente la orilla, debido al ascenso y descenso alternativo del nivel del mar, por influencia de la atracción con la Luna y el Sol (componente astronómica). Las fases críticas del ascenso y descenso se denominan pleamar y bajamar, respectivamente. Sin embargo, también existe una marea más débil originada por variaciones periódicas de la presión atmosférica y de vientos (componente meteorológica), y su importancia relativa depende del año, latitud y de la proximidad de extensas áreas de aguas someras.

4.3.1 COMPONENTE ASTRONÓMICA

La Caleta Bucalemu como tal no está registrada en las Tablas de Marea del SHOA, por lo que se utilizaron los datos de la Rada Pichilemu, ubicada al Norte de Bucalemu. La Rada Pichilemu es un Puerto Secundario y de acuerdo a las indicaciones de las Tablas de Marea del SHOA su puerto patrón es Valparaíso, cuyas características no armónicas para el año 2010 corresponden a lo indicado en la Tabla 4-15.

**Tabla 4-15 Planos Maréales en Valparaíso, año 2010
(Fuente Elaboración Propia)**

NIVEL	Zm (m)
Nivel Medio de Marea	0.88
Altura Promedio Pleamar	1.35
Altura Promedio Pleamar Mayores	1.52
Altura Promedio Bajamar	0.42
Altura Promedio Bajamar Menores	0.37

La marea Astronómica presente en la zona de Valparaíso es una marea semidiurna con desigualdad diurna por no ser coincidentes los valores de las dos pleamares ni las dos bajamares, en el transcurso de un día lunar. Considerando que el día lunar tiene una duración de 24 [hr] 50 [min], teóricamente cada 6 [hr] 13 [min] se produce una pleamar o una bajamar.

Como corrección al puerto patrón, el SHOA propone aumentar 0.03 [cm] a las pleamares y restar 0.3 [cm] a las bajamares, al realizar dicho procedimiento, algunos datos quedan como valor negativo, por lo que se calculó el promedio entre los factores de corrección y el resultado obtenido (0.165) se restó al Nivel Medio del Mar de Valparaíso obteniéndose el Nivel Medio del Mar en Bucalemu registrando el valor de 0.72 [m].

Para obtener la Pleamar Máxima se utilizó el dato proporcionado en las Cartas Náuticas 5100 y 5101, en donde para la Caleta Matanza ubicada al Norte de Bucalemu, la Pleamar Máxima en Sicia es 1.52 [m], la cual coincide con el Promedio de las Pleamares Mayores.

Dichos datos se adjuntan en la Tabla 4-16 a continuación:

**Tabla 4-16 Planos Maréales en Bucalemu, año 2010
(Fuente Elaboración Propia)**

NIVEL	Zm (m)
Nivel Medio de Marea	0.72
Altura Promedio Pleamar Sicigia	1.52

4.3.2 COMPONENTE METEOROLÓGICA

4.3.2.1 EFECTOS DEL VIENTO

Para considerar el efecto del viento, éste debe ser capaz de perturbar la superficie del mar considerablemente de manera que se produzca un movimiento de la masa superficial del agua en la dirección del viento.

El cálculo del nivel del agua se realiza de acuerdo a la formulación presentada por Zeider Zee (2006), donde la desnivelación por efectos de los viento, es determinado como una función del largo del fetch, la profundidad promedio de la zona de generación y velocidad del viento.

Para el efecto del viento en la variación de marea se emplea la Ecuación 4.3, la que establece que:

$$S = \frac{U^2 F}{1400d}$$

Ecuación 4-3 Formulación de Zeider Zee (2006)

Donde:

S: wind setup [ft].

Fetch: largo del fetch en [mi].

U: velocidad del viento en [mph].

d: profundidad promedio del mar[ft].

De acuerdo a datos obtenidos del Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile, las condiciones de velocidad y fetch del viento son las indicadas en la Tabla 4-17:

**Tabla 4-17 Velocidades del viento con respecto a longitud del Fetch
(Fuente Elaboración Propia)**

Velocidad del viento [km/hr]	Fetch [km]
18	18
28	63
37	140
40	200
46	300
92	3600

Para los efectos del presente estudio se ha decidido utilizar los valores de fetch, velocidad del viento y profundidad promedio igual a lo indicado en la Tabla 4-18:

**Tabla 4-18 Datos de la carta de Superficie
(Fuente Elaboración Propia)**

Datos de la carta de superficie		
d	13123,3	ft
fetch	932,1	mi
U	44	mph

Con estos datos, se obtiene un aumento de la marea por efectos del viento de 0,03 [m].

4.3.2.2 EFECTOS DE PRESIÓN

La variación de la presión atmosférica provoca que se alcancen alturas mayores o menores a las estimadas, por lo que cuando la presión atmosférica es menor a la normal produce aumentos en los niveles del mar, mientras que altas presiones implican menores alturas que las pronosticadas.

Considerando lo anterior, se realiza una corrección de la marea por efectos de presión de acuerdo a la Tabla 4-19, obtenida del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada.

**Tabla 4-19 Corrección de los niveles de marea por efecto de presión
(Fuente Ref. 15)**

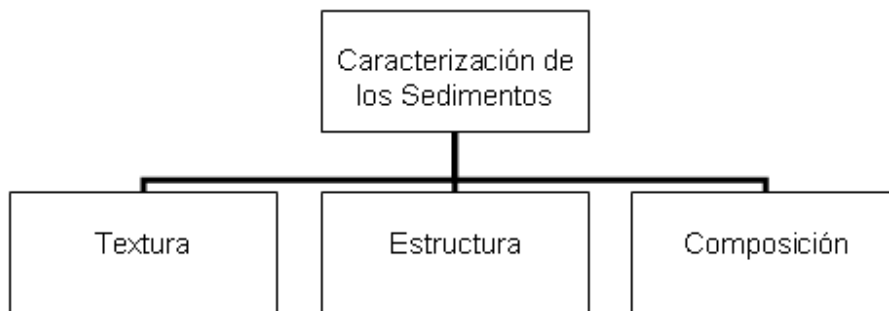
PRESIÓN ATMOSFÉRICA		CORRECCIÓN
En Milímetros	En Milibares	
722	963	+0.50
726	968	+0.45
730	973	+0.40
734	78	+0.35
738	983	+0.30
741	988	+0.25
745	993	+0.20
749	998	+0.15
752	1003	+0.10
756	1008	+0.05
760	1013	+0.00
764	1018	-0.05
768	1023	-0.10
771	1028	-0.15
775	1033	-0.20
779	1038	-0.25

Para el año 2010, la presión promedio es de 1014.7 [mb], por lo que la corrección a los niveles de marea es de -0.05 [m].

4.4 SEDIMENTOS

4.4.1 GENERALIDADES

La caracterización de los sedimentos se puede dividir de la siguiente forma, como se muestra en la Figura 4-13 adjunta:



**Figura 4-13 Caracterización de los Sedimentos
(Fuente Elaboración Propia)**

En donde la textura se refiere a la caracterización de las partículas sedimentarias y a la relación grano a grano entre ellas, la estructura es la caracterización del comportamiento en conjunto de las partículas y la composición es la caracterización de la estructura mineralógica y química del sedimento.

El presente estudio se enfocará en la caracterización de los sedimentos desde el punto de vista textural, ya que son los parámetros de interés para evaluar posteriormente el transporte de sedimentos. Los aspectos relacionados con estas propiedades son:

- Tamaño
- Forma
- Textura Superficial
- Redondez
- Esfericidad

El tamaño de las partículas es un atributo fundamental de las rocas sedimentarias.

Los sedimentos varían en tamaño desde las micras hasta los metros, la escala de clasificación más usada en sedimentología es la de Udden-Wentworth de 1992 (Figura 4-14), la cual propone una escala tanto para unidades phi (que relacionan el diámetro del sedimento como resultado de una potencia de 2 phi.) como para milímetros y clasifica el tipo de sedimento analizado en arcilla, limo, arena y grava.

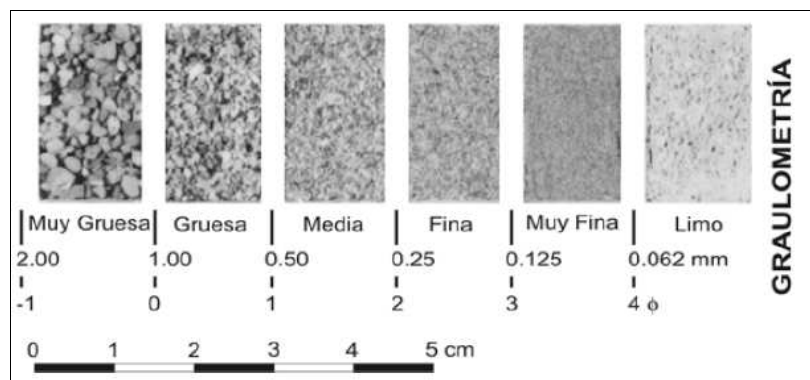


Figura 4-14 Escala de Granulometría Udden-Wentworth (1992)
(Fuente Manual de Sedimentología, Hernán Vergara)

Según Blatt (1980) el origen de los tamaños de grano y forma de los sedimentos está relacionado a cuatro factores principales:

- La naturaleza de la roca madre, incluyendo su mineralogía y textura
- La naturaleza e intensidad de la meteorización, incluyendo factores físicos, químicos y biológicos
- Corrosión química y mecanismos de abrasión durante el transporte sedimentario
- Selección hidráulica durante el transporte y depositación

En general se puede decir que la forma es heredada, aunque en cierto modo debe evolucionar, puesto que en un caso hipotético final todos los clastos⁶ serán esféricos.

La textura superficial se refiere a marcas de micro relieve de pequeña escala, como picaduras, rasguños y surcos que ocurren en la superficie de los granos y son indicadoras en cierto modo de las condiciones de transporte.

La esfericidad se define como el grado en que un clasto se aproxima en su forma a una esfera. Wadell (1932) propone que la esfericidad puede definirse como la razón entre la superficie del clasto y la de una esfera de igual volumen.

La redondez se refiere al grado de angularidad que presentan aristas y vértices de un clasto, esto es la suavidad o lisura de los granos. La redondez no corresponde a un concepto de forma como la esfericidad, sino de configuración del grano que tiende a la forma superficial esférica como estado final.

En el presente estudio se dará mayor énfasis en el tamaño de los sedimentos y su posterior clasificación de acuerdo a este.

⁶ Clasto: fragmento de roca que aparece en sedimentos de menos antigüedad, también es un fragmento de roca de cualquier tamaño, composición y procedencia

4.4.2 BITÁCORA DE MUESTREO

Para realizar el muestreo de la Caleta Bucalemu, se definió una grilla con un Δx de 3 [m], es decir se tomaron las muestras cada 3 metros, aproximadamente.

Se trazaron perfiles transversales imaginarios y se tomaron muestras del sedimento superficial en 4 puntos: comienzo de playa, playa trasera, zona intermareal y zona sumergida.

El muestreo se realizó el sábado 17 de abril del 2010, aproximadamente a las 10:00 [hr] alcanzando el periodo de bajamar.

La terminología utilizada es la siguiente, a la primera zona de muestreo se le denominará Sector 1 y a la primera muestra de dicho sector, correspondiente al inicio de la playa, se le denominará Muestra 1, a la segunda muestra ubicada en la playa trasera, Muestra 2 y así sucesivamente. El sector del estero presente en la zona de estudio se muestreó de forma independiente es por eso que su terminología es Sector Estero.

Los sectores muestreados son los presentados en la Figura 4-15:



**Figura 4-15 Sectores Muestreados, Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

Donde las coordenadas para las diferentes muestras de los distintos sectores con sus respectivos puntos de referencia son los adjuntados en la Tabla 4-20, cuyo datum es el sudamericano de 1969:

**Tabla 4-20 Coordenadas Georreferenciadas de los Sectores Muestreados
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTORES	COORDENADAS		REFERENCIA
Sector 1	Este	Sur	Bajo Oficina Pescadores
Muestra 1	770997	6162882	
Sector 2			Frente del Puente
Muestra 1	771075	6162882	
Muestra 2	771073	6162898	
Muestra 3	771969	6162906	
Muestra 4	771063	6162921	
Sector 3			Medio de Roca (lado del Puente)
Muestra 1	771087	6162907	
Muestra 2	771082	6162912	
Muestra 3	771081	6162918	
Muestra 4	771069	6162931	
Sector 4			Esquina Final Roca
Muestra 1	771112	6162923	
Muestra 2	771106	6162930	
Muestra 3	771101	6162935	
Muestra 4	771094	6162944	
Sector Estero			Frente Restaurant Bocamar
Muestra 1	771093	6162851	
Muestra 2	771086	6162845	
Muestra 3	771082	6162840	
Muestra 4	771074	6162836	
Muestra 5	771072	6162826	
Muestra 6	771060	6162814	

4.4.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Luego de realizado el tamizado de la muestra y pesadas las fracciones retenidas para cada tamiz, se puede realizar la primera parte del análisis, donde se calculan los porcentajes de excedencia de acuerdo al tamaño del sedimento.

La clasificación para cada muestra, respecto de su diámetro y a sus unidades phi, se realizó según la escala propuesta por Udden-Wentworth de 1922, mostrada en la Tabla 4-21:

**Tabla 4-21 Clasificación según Escala Udden-Wentworth
(Fuente Elaboración Propia)**

Nº TAMIZ	DIÁMETRO [mm]	UNIDADES PHI	CLASIFICACIÓN
Nº 5	4	-2	Grava Fina
Nº 10	2	-1	Grava Muy Fina
Nº 16	1	0	Arena Muy Gruesa
Nº 40	0.5	1	Arena Gruesa
Nº 60	0.25	2	Arena Mediana
Nº 115	0.125	3	Arena Fina
Nº 250	0.063	4	Arena Muy Fina

A partir de la curva granulométrica se pueden obtener los diámetros característicos de la muestra, los que al ser comparados con la clasificación de Udden-Wentworth (1922) definirán que tipo de sedimento se ha muestreado.

Algunos de los tamaños significativos del sedimento son:

- D_{90} = diámetro del sedimento que es excedido por el 90% de la muestra.
- D_{60} = diámetro del sedimento que es excedido por el 60% de la muestra.
- D_{50} = diámetro del sedimento que es excedido por el 50% de la muestra.
- D_{30} = diámetro del sedimento que es excedido por el 30% de la muestra.
- D_{10} = diámetro del sedimento que es excedido por el 10% de la muestra.

Los resultados, para cada sector, son los siguientes:

**Tabla 4-22 Diámetros Relevantes para Sector 1, Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
1	1	d90	0.49	
		d60	0.36	
		d50	0.32	Arena Mediana
		d30	0.23	
		d10	0.12	

**Tabla 4-23 Diámetros Relevantes para Sector 2, Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
2	1	d90	0.43	
		d60	0.23	
		d50	0.20	Arena Fina
		d30	0.14	
		d10	0.09	
	2	d90	0.44	
		d60	0.26	
		d50	0.23	Arena Fina
		d30	0.19	
		d10	0.14	
	3	d90	3.00	
		d60	1.66	
		d50	1.50	Arena Muy Gruesa
		d30	1.16	
		d10	0.68	
	4	d90	0.56	
d60		0.36		
d50		0.31	Arena Mediana	
d30		0.22		
		d10	0.14	

**Tabla 4-24 Diámetros Relevantes para Sector 3, Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
3	1	d90	0.45	
		d60	0.30	
		d50	0.25	Arena Fina
		d30	0.17	
		d10	0.10	
	2	d90	0.43	
		d60	0.24	
		d50	0.21	Arena Fina
		d30	0.14	
		d10	0.091	
	3	d90	0.42	
		d60	0.23	
		d50	0.20	Arena Fina
		d30	0.14	
		d10	0.09	
	4	d90	0.92	
		d60	0.67	
d50		0.59	Arena Gruesa	
d30		0.44		
d10		0.31		

Tabla 4-25 Diámetros Relevantes para Sector 4, Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
4	1	d90	0.48	
		d60	0.32	
		d50	0.27	Arena Mediana
		d30	0.18	
		d10	0.10	
	2	d90	0.44	
		d60	0.26	
		d50	0.23	Arena Fina
		d30	0.17	
		d10	0.10	
	3	d90	0.45	
		d60	0.26	
		d50	0.22	Arena Fina
		d30	0.15	
		d10	0.09	
	4	d90	1.00	
		d60	0.83	
		d50	0.78	Arena Gruesa
		d30	0.66	
		d10	0.55	

**Tabla 4-26 Diámetros Relevantes para Sector Estero, Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
ESTERO	1	d90	1.93	
		d60	1.59	
		d50	1.47	Arena Muy Gruesa
		d30	1.24	
		d10	1.01	
	2	d90	1.70	
		d60	0.94	
		d50	0.86	Arena Gruesa
		d30	0.69	
	3	d10	0.52	
		d90	1.78	
		d60	1.14	
		d50	0.95	Arena Gruesa
		d30	0.64	
	4	d10	0.26	
		d90	1.56	
		d60	0.81	
		d50	0.70	Arena Gruesa
	5	d30	0.49	
		d10	0.30	
		d90	1.92	
		d60	1.57	
		d50	1.45	Arena Muy Gruesa
	6	d30	1.21	
d10		0.88		
d90		2.47		
d60		1.66		
6	d50	1.53	Arena Muy Gruesa	
	d30	1.27		
	d10	1.01		

Los resultados son post tsunami del 27 de Febrero del 2010, por lo que los datos obtenidos no son tan representativos de la zona, sin embargo ayudarán para determinar si hay o no embancamiento con la presencia de la estructura de abrigo.

4.4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los valores obtenidos, se podrá obtener una visión general del comportamiento de la muestra, a través de indicadores estadísticos, entre estos factores se destacan los siguientes:

- Curtosis
- Asimetría
- Desviación Estándar
- Tamaño Promedio

4.4.4.1 CURTOSIS

En teoría de la probabilidad y estadística, la curtosis es el coeficiente de apuntamiento (concentrado en torno al pico máximo) de la distribución de probabilidad de una variable aleatoria de número real.

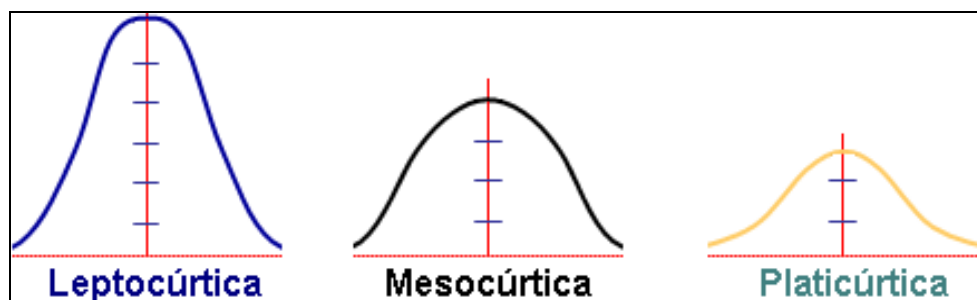
La curtosis se calculará de la siguiente forma:

$$K = \frac{d_{95} - d_5}{2.44(d_{75} - d_{25})}$$

Ecuación 4-4

La escala de clasificación de acuerdo a la curtosis se define como:

- Entre 0.76 y 0.90 = Platicúrtica
- Entre 0.90 y 1.11 = Mesocúrtica
- Entre 1.11 y 1.50 = Leptocúrtica
- Entre 1.50 y 3.00 = Muy Leptocúrtica
- Mayor que 3.00 = Extremadamente Leptocúrtica



**Figura 4-16 Escalas de clasificación por Curtosis
(Fuente Ref. 16)**

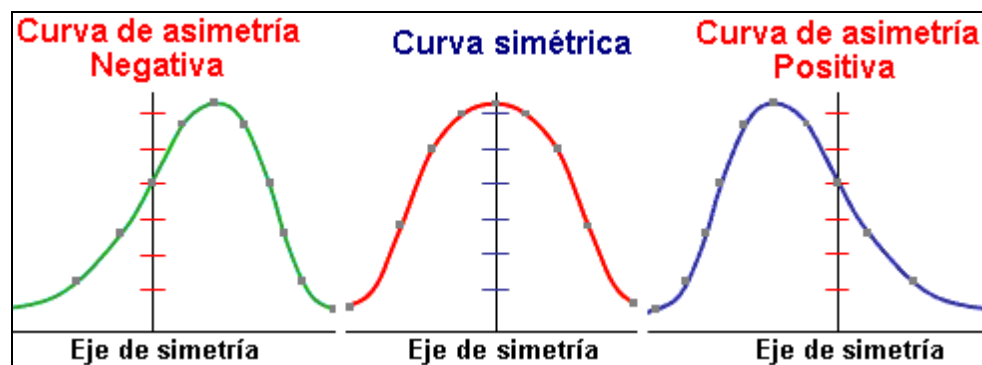
4.4.4.2 ASIMETRÍA

Esta medida permite identificar si los datos se distribuyen de forma uniforme alrededor del punto central. La asimetría presenta tres estados diferentes, cada uno de los cuales define de forma concisa como están distribuidos los datos respecto al eje de asimetría. Se dice que la asimetría es positiva cuando la mayoría de los datos se encuentran por encima del valor de la media aritmética, la curva es simétrica cuando se distribuyen aproximadamente la misma cantidad de valores en ambos lados de la media y se conoce como asimetría negativa cuando la mayor cantidad de datos se aglomeran en los valores menores que la media.

La asimetría se calculará de la siguiente forma, como se muestra en la Ecuación 4-5:

$$SK = \frac{d_{16} + d_{84} - 2d_{50}}{2(d_{84} - d_{16})} + \frac{d_5 + d_{95} - 2d_{50}}{2(d_{95} - d_5)}$$

Ecuación 4-5



**Figura 4-17 Tipos de Curvas de Asimetría
(Fuente Ref. 17)**

De acuerdo al valor que se obtenga de los cálculos, la muestra se puede clasificar en:

- Entre -1.00 y -0.30 = Altos excesos de gruesos
- Entre -0.30 y -0.10 = Moderado exceso de gruesos
- Entre -0.10 y +0.10 = Simétrica
- Entre +0.10 y +0.30 = Moderada exceso de finos
- Entre +0.30 y +1.00 = Alto exceso de finos

4.4.4.3 DESVIACIÓN ESTÁNDAR

La desviación estándar es un método de dispersión para variables de razón y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva. Es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que se necesita conocer también la desviación que representan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

Para calcular la desviación estándar se utilizará la siguiente formulación:

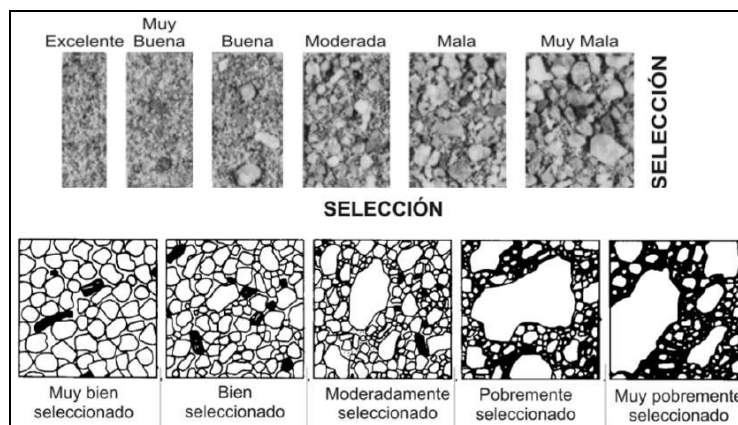
$$\sigma_1 = \frac{d_{84} - d_{16}}{4} + \frac{d_{95} - d_5}{6.6}$$

Ecuación 4-6

Con los resultados de la desviación estándar, se puede concluir que la muestra es:

- Resultados menores que 0.35 = Muy bien clasificada
- Entre 0.35 y 0.50 = Bien clasificada
- Entre 0.50 y 1.00 = Clasificación moderada
- Entre 1.00 y 2.00 = Poco clasificada
- Entre 2.00 y 4.00 = Mal clasificada
- Resultados mayores que 4.00 = Muy mal clasificada

Estos resultados se reflejan físicamente de acuerdo a lo ilustrado en la Figura 4-18:



**Figura 4-18 Resultados físicos de resultados de desviación estándar
(Fuente Manual de Sedimentología, Hernán Vergara)**

4.4.4.4 TAMAÑO PROMEDIO

El tamaño promedio se obtiene utilizando la siguiente fórmula:

$$M = \frac{d_{16} + d_{50} - d_{84}}{3}$$

Ecuación 4-7

4.4.5 RESULTADOS DE INDICADORES ESTADÍSTICOS

Aplicando las fórmulas del apartado anterior, los resultados son los siguientes:

**Tabla 4-27 Indicadores Estadísticos, Sector 1
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
1	1	Curtosis	1.32	Leptocúrtica
		Desv. Estándar	0.19	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.13	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.31	

**Tabla 4-28 Indicadores Estadísticos, Sector 2
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
2	1	Curtosis	0.86	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.13	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.31	Alto exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.23	
	2	Curtosis	0.81	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.11	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.42	Alto exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.26	
	3	Curtosis	1.45	Leptocúrtica
		Desv. Estándar	0.84	Clasificación Moderada
		Asimetría	0.26	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	1.59	
	4	Curtosis	1.47	Leptocúrtica
		Desv. Estándar	0.20	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.29	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.32	

**Tabla 4-29 Indicadores Estadísticos, Sector 3
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
3	1	Curtosis	0.74	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.14	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.15	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.26	
	2	Curtosis	0.77	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.13	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.29	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.25	
	3	Curtosis	0.93	Mesocúrtica
		Desv. Estándar	0.13	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.33	Alto exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.23	
	4	Curtosis	0.72	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.24	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.08	Simétrica
		Diámetro Promedio	0.60	

**Tabla 4-30 Indicadores Estadísticos, Sector 4
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
4	1	Curtosis	1.14	Leptocúrtica
		Desv. Estándar	0.18	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.28	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.28	
	2	Curtosis	0.82	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.13	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.27	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.25	
	3	Curtosis	0.76	Platicúrtica
		Desv. Estándar	0.14	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.26	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.25	
	4	Curtosis	1.43	Leptocúrtica
		Desv. Estándar	0.24	Muy Bien Clasificada
		Asimetría	0.24	Moderado exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.78	

**Tabla 4-31 Indicadores Estadísticos, Sector Estero
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	MUESTRA	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
ESTERO	1	Curtosis	0.91	Mesocúrtica
		Desv. Estándar	0.39	Bien Clasificada
		Asimetría	-0.10	Simétrica
		Diámetro Promedio	1.47	
	2	Curtosis	1.02	Mesocúrtica
		Desv. Estándar	0.46	Bien Clasificada
		Asimetría	0.86	Exceso de Finos
		Diámetro Promedio	0.69	
	3	Curtosis	0.78	Mesocúrtica
		Desv. Estándar	0.58	Bien Clasificada
		Asimetría	0.11	Exceso de Finos
		Diámetro Promedio	1.00	
	4	Curtosis	1.17	Leptocúrtica
		Desv. Estándar	0.47	Bien Clasificada
		Asimetría	0.34	Alto exceso de finos
		Diámetro Promedio	0.78	
	5	Curtosis	0.94	Mesocúrtica
		Desv. Estándar	0.41	Bien Clasificada
		Asimetría	-0.11	Moderado exceso de gruesos
		Diámetro Promedio	1.45	
6	Curtosis	1.62	Muy Leptocúrtica	
	Desv. Estándar	0.60	Clasificación Moderada	
	Asimetría	0.18	Moderado exceso de finos	
	Diámetro Promedio	1.53		

Para el Sector 1 los resultados obtenidos muestran datos muy bien clasificados, con un exceso moderado de finos, ya que este Sector se encuentra bajo el agua, por lo que se espera material de este tipo.

En el Sector 2, la mayoría de las muestras están bien clasificadas, las muestras 1 y 2 presentan alto exceso de finos, resultado que llama la atención, ya que en la mayoría de las playas se encuentra material más grueso. La presencia de material fino en este sector se debe al tsunami que afectó a la región provocando la desembocadura del estero presente en la zona que por lo general posee este tipo de material.

El mismo patrón ocurre tanto para el Sector 3 como 4, en los cuales el comienzo de playa está afectado por el estero

Los resultados para el Sector Estero son esperados, sin embargo la muestra 5 presenta un moderado exceso de gruesos, esto se debe a la presencia de una pequeña escollera la cual libera material rocoso al estero.

4.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

4.5.1 ANÁLISIS PREVIOS

En el apartado anterior (Sedimentos) se obtuvo el análisis sedimentológico de diferentes sectores de la Caleta Bucalemu, sin embargo en el presente se utilizarán sólo las muestras de la Zona Sumergida.

Para caracterizar el total de muestras sumergidas a lo largo de la playa, se promedió cada valor de porcentaje de peso retenido, a partir de dicho resultado se obtuvo el porcentaje de peso pasante. Los resultados se muestran en la Tabla 4-32:

**Tabla 4-32 Análisis Estadístico Zona Sumergida Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

PESO DE CADA MUESTRA APROXIMADAMENTE 100 [grs]				
ZONA SUMERGIDA				
Nº TAMIZ	DIÁMETRO [mm]	PESO RETENIDO [grs]	% PESO RETENIDO	% PESO PASANTE
Nº 5	4	0.000	0.000	100.0000
Nº 10	2	0.000	0.000	100.0000
Nº 16	1	4.760	4.760	95.2403
Nº 40	0.5	52.252	52.252	42.9880
Nº 60	0.25	29.674	29.674	13.3137
Nº 115	0.125	10.447	10.447	2.8670
Nº 250	0.063	2.108	2.108	0.7593
TOTAL		99.241		

Donde la curva granulométrica es la siguiente:

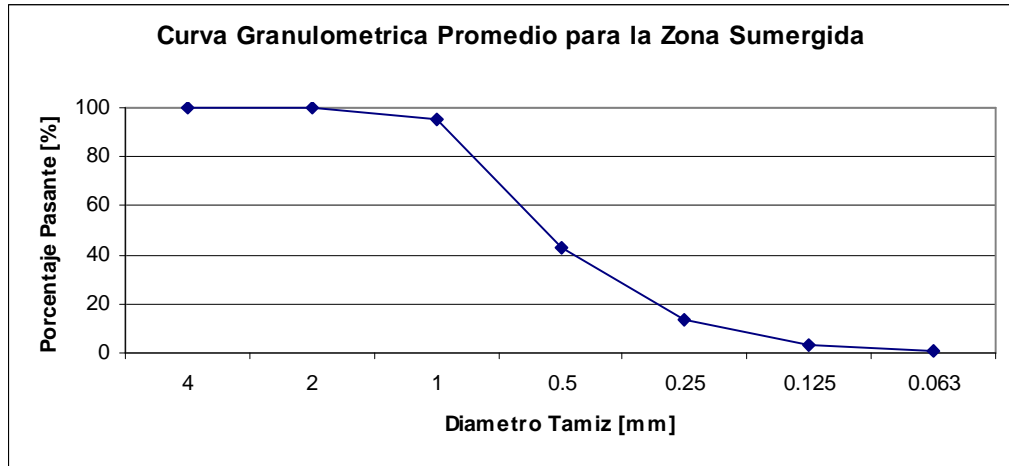


Gráfico 4-9 Curva Granulométrica para Zona Sumergida, Caleta Bucalemu (Fuente Elaboración Propia)

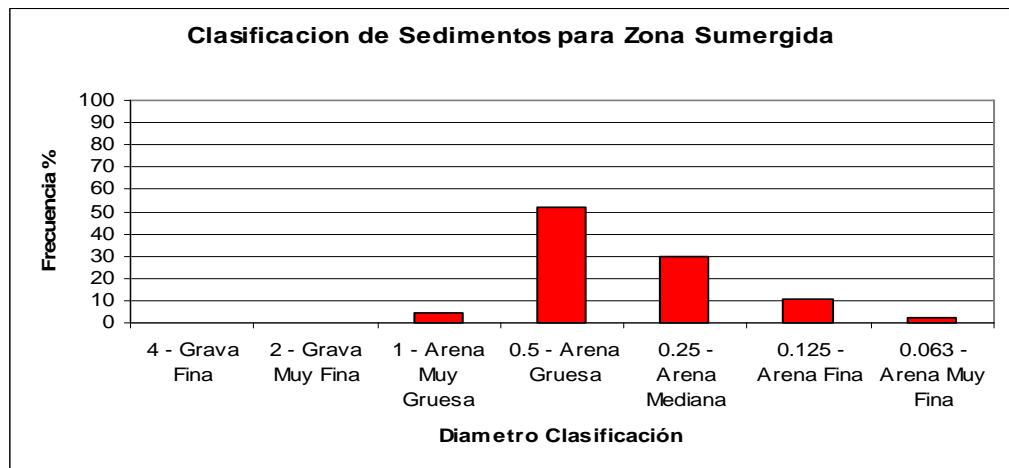


Gráfico 4-10 Clasificación del Sedimento para Zona Sumergida, Caleta Bucalemu (Fuente Elaboración Propia)

A partir de la curva granulométrica se pueden obtener los diámetros característicos de la playa, los que al ser comparados con la clasificación de Udden-Wentworth (1922) definirán que tipo de sedimento se ha muestreado.

**Tabla 4-33 Diámetros Relevantes Zona Sumergida Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

SECTOR	DIÁMETROS RELEVANTES	RESULTADOS [mm]	CONDICIÓN
ZONA SUMERGIDA	d90	0.83	
	d60	0.62	
	d50	0.56	Arena Mediana
	d30	0.44	
	d10	0.33	

4.5.2 ESTUDIO DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL

Para determinar el transporte longitudinal se aplicó en primera instancia la formulación del CERC correspondiente a la siguiente ecuación:

$$Q_L = \frac{K}{(\rho_s - \rho)(1 - p)} \frac{1}{8} \rho H_b^2 \sqrt{g d_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b}$$

Ecuación 4-8

Donde:

- Q_L: Transporte Longitudinal de Sedimentos [m³/s]
- K: Coeficiente de proporción
- ρ: Densidad del agua de mar [kg/m³]
- ρ_s: Densidad del sedimento [kg/m³]
- p: Porosidad del sedimento
- H_b: Altura de oleaje en rompiente [m]
- α_b: Angulo de incidencia de la ola rompiente

Existen diversas recomendaciones para el cálculo de la constante K, de las cuales se comentan algunas en el CEM y se resumen a continuación.

- Si se usa la altura significativa en rompiente, el SPM84 recomienda que K = 0.39
- Si se utiliza la altura rms en rompiente, el SPM84 recomienda que K = 0.92
- Si se utiliza la altura rms en rompiente, Korman & Inman (1970) recomiendan que K = 0.77

Bailard (1981, 1984) desarrolló un estudio basado en modelos para relacionar la constante K en función del ángulo de rompiente y la velocidad de sedimentación del grano, obteniendo la siguiente expresión:

$$K = 0.05 + 2.6 \sin^2(2\alpha_b) + 0.007 \frac{u_{mb}}{w_f}$$

Ecuación 4-9

$$u_{mb} = \frac{\gamma}{2} \sqrt{gb_b}$$

Ecuación 4-10

En donde w_f es la velocidad de sedimentación o de caída del grano, la cual se determina de la siguiente forma:

$$\text{Si } 0.5 < Re < 400 \quad \omega_f = \frac{d_{50}^2 g (\rho_s - \rho)}{18\nu}$$

$$\text{Si } 400 < Re < 200.000 \quad \omega_f = 1.6 \sqrt{gd_{50}(\rho_s - \rho)}$$

$$\text{Si } Re > 200.000 \quad \omega_f = 2.6 \sqrt{gd_{50}(\rho_s - \rho)}$$

Ecuación 4-11

Como generalmente se cuenta con una estadística de oleaje en aguas profundas, CERC propone una metodología para el cálculo del LST con datos offshore.

$$Q_L = \frac{K\rho\sqrt{gK_s}}{32\sqrt{\lambda}(\rho_s - \rho)(1-p)} H_0^{\frac{5}{2}} \cos^{\frac{1}{4}} \alpha_0 \sin(2\alpha_0)$$

Ecuación 4-12

Por lo tanto para obtener el transporte potencial longitudinal mediante la fórmula del CERC, a través del oleaje costa afuera, se utilizaron los siguientes parámetros:

$$K = 0.39$$

$$p = 0.4$$

$$\rho_s = 2650[\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$\rho = 1025[\text{kg} / \text{m}^3]$$

$$\gamma = 0.78$$

Para el Shoaling se utilizó un valor mayor a 1 ya que se debe adoptar un coeficiente pensando en que se está en rompiente.

El azimut de la playa es 36° .

Utilizando los parámetros antes mencionados y reemplazando en la Ecuación 4-10 propuesta por el CERC utilizando datos de aguas profundas, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 4-34 Tabla de Incidencia en Aguas Profundas, Constitución
(Fuente Elaboración Propia)**

Transporte Longitudinal de Sedimentos [m3/s]														
Direcciones	Alturas de Ola (m)													Totales
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	
306.00	0	0	0	-2E-05	-6.5E-05	-0.00012	-0.00028	-0.0006	-0.00085	-0.0006	-0.00063	-0.00068	-0.00104	
283.50	0	0	0	-3.3E-06	0	0	0	-7.3E-06	-4E-05	-1.3E-05	0	0	0	
261.00														
238.50														
216.00														
193.50														
171.00														
148.50														
126.00														
103.50														
81.00	0	4.86E-07	0.000163	0.002386	0.010262	0.019999	0.021093	0.015062	0.007845	0.003962	0.002308	0.00112	0.000195	
58.50	0	3.47E-06	0.000419	0.004474	0.01381	0.019623	0.022975	0.016525	0.010418	0.006146	0.003068	0.002311	0.001771	
36.00	0	3.76E-07	0.000101	0.001309	0.002407	0.004594	0.006622	0.006405	0.00468	0.004095	0.002776	0.001651	0.002033	
13.50	0	0	1.68E-05	0.000156	0.00043	0.000856	0.001343	0.00169	0.00145	0.001402	0.00073	0.000428	0.000715	
-9.00	0	0	-1.8E-06	-3.9E-05	-0.00021	-0.00043	-0.0006	-0.00072	-0.00076	-0.00106	-0.00093	-0.0004	-0.00036	
-31.50	0	0	-3.8E-06	-3.6E-05	-0.00033	-0.00069	-0.0013	-0.00161	-0.00169	-0.0027	-0.00203	-0.00151	-0.00122	
Totales	0	4.33E-06	0.000693	0.008226	0.026303	0.043828	0.049855	0.036742	0.021049	0.011237	0.005287	0.002926	0.002096	0.208246

De la Tabla 4-34, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 4-35 Transporte Longitudinal Neto y Bruto por Tabla de Incidencia
(Fuente Elaboración Propia)**

Transporte Neto	6,567,237.7	[m ³ /año]
Transporte Bruto	8,054,508.5	[m ³ /año]

El CERC además propone una fórmula para calcular la altura de ola en rotura a partir de los datos offshore del oleaje. Esta fórmula se basa en el cálculo de Shoaling lineal y Refracción por la ley de Snell además de que la disipación de energía es despreciable.

$$H_b = H_0^{\frac{4}{5}} (C_{go} \cos \alpha_0)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{g}{\lambda} - \frac{H_b g^2 \sin^2 \alpha_0}{\lambda^2 C_o^2} \right]^{-\frac{1}{3}}$$

Ecuación 4-13

Donde:

- H_b: Altura de ola en rotura [m]
- H₀: Altura de ola offshore [m]
- C_{go}: Celeridad de grupo offshore [m/s]
- α₀: ángulo de incidencia

A partir de la Ecuación 4-11 se obtiene el ángulo incidente en la zona de rompiente de la siguiente manera:

$$\sin \alpha_b = \sqrt{g \frac{H_b \sin \alpha_o}{\lambda C_o}}$$

Ecuación 4-14

El transporte longitudinal se describe en la Ecuación 4-15 adjunta:

$$Q_L = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16(\rho_s - \rho(1-p)\sqrt{\gamma})} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b)$$

Ecuación 4-15

Se obtuvieron transportes longitudinales para cada sector muestreados los que se indican en la Figura 4-15, por lo que para cada sector se calculó su respectivo azimut, ya que el Angulo offshore debe estar corregido por la desviación que tiene el sector estudiado con respecto del Norte.

Por lo tanto el transporte longitudinal para cada sector de estudio es adjuntado a continuación:

**Tabla 4-36 Transporte Longitudinal Sector 1
(Fuente Elaboración Propia)**

QI Neto	220,761,181.65	[m3/año]
QI Bruto	221,311,524.42	[m3/año]

**Tabla 4-37 Transporte Longitudinal Sector 2
(Fuente Elaboración Propia)**

QI Neto	271,821,802.52	[m3/año]
QI Bruto	272,570,297.54	[m3/año]

**Tabla 4-38 Transporte Longitudinal Sector 3
(Fuente Elaboración Propia)**

QI Neto	298,150,352.13	[m3/año]
QI Bruto	301,592,372.97	[m3/año]

**Tabla 4-39 Transporte Longitudinal Sector 4
(Fuente Elaboración Propia)**

QI Neto	231,856,379.95	[m3/año]
QI Bruto	232,061,958.47	[m3/año]

El transporte de sedimento es dominado por las olas que vienen del 3º cuadrante, por lo que se concluye que el transporte es de Sur a Norte, por lo que la presencia de una estructura de abrigo no implicaría un problema de embancamiento.

4.5.3 DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL

Para obtener la distribución transversal del transporte longitudinal se utilizó la base de la aplicación de un modelo de propagación basado en el flujo de energía, acoplado a otro de evolución post-rotura del tipo altura límite, incorporando una modificación al criterio de truncamiento de altura límite.

Los criterios de rotura utilizados son los siguientes:

- Sunamura (1980)

$$H_b = 1.1h_b \left(\frac{m}{\sqrt{\frac{H_o}{L_o}}} \right)^{\frac{1}{6}}$$

Ecuación 4-16

- Battjes and Stive (1985), modificada por Nairn (1990)

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.39 + 0.56 \tanh \left(33 \frac{H_o}{L_o} \right)$$

Ecuación 4-17

Por lo tanto para obtener la distribución se propagó con Teoría Lineal del Oleaje, considerando Shoaling y Refracción sobre un perfil batimétrico obtenido de las modelaciones en Stwave. Para los cuatro sectores muestreados se utilizó el mismo perfil de profundidades ya que los sectores tienen poca distancia entre ellos y las profundidades son similares.

Se compararon los resultados de las Alturas Progresivas (H_p , obtenida por TLO) versus las Alturas en Rotura (H_b , obtenidas por las formulaciones de Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985) y en donde la altura en rotura fuese menor que la altura progresiva se considera condición de ola rompiente, para el caso contrario condición de ola progresiva.

Para la mayoría de los datos de cada sector y tanto para los criterios de Sunamura como para Battjes-Stive la profundidad donde comienza a romper la ola es a los 3 [m].

Con dichas alturas de oleaje rompiente se calcula el Transporte Longitudinal a través de dos métodos, la fórmula de Queens y la fórmula del CERC.

La fórmula de Queens fue desarrollada por el Profesor Kamphuis en el año 1993, cambiando la fórmula del CERC integrando el diámetro del sedimento y el periodo del oleaje.

La fórmula es la siguiente:

$$Q_L = \frac{1.3 \cdot 10^{-3} \rho H_{sb}^3}{(1-p)\rho_s T_p} \left(\frac{H_{sb}}{L_{op}} \right)^{-1.25} m^{0.75} \left(\frac{H_{sb}}{d_{50}} \right)^{0.25} \text{sen}^{0.6}(2\alpha_b)$$

Ecuación 4-18

Donde:

- ρ: Densidad del agua de Mar [kg/m³]
- ρ_s: Densidad del sedimento [kg/m³]
- H_{sb}: Altura significativa rompiente [m]
- L_{op}: Longitud costa afuera asociada al peak [m]
- m: Pendiente media de la playa.
- p: Porosidad
- T_p: Periodo Peak [s]
- α_b: Angulo incidente en rotura
- d₅₀: Diámetro característico de la muestra [mm]

Por lo tanto el transporte longitudinal por medio de la fórmula de Queens para cada sector de estudio es adjuntado a continuación:

**Tabla 4-40 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 1
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
18,462,422	20,676,130	m3/año	18,462,422	20,676,130	m3/año

**Tabla 4-41 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 2
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
1,050,589.7	1,243,922.2	m3/año	1,050,589.7	1,243,922.2	m3/año

**Tabla 4-42 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 3
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
7,061,621.4	8,003,693.3	m3/año	7,061,621.4	8,003,693.3	m3/año

**Tabla 4-43 Transporte Longitudinal por Queens, Sector 4
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
19,953,313	22,146,292	m3/año	19,802,469	22,067,008	m3/año

El transporte longitudinal para cada sector de estudio por medio de la fórmula del CERC son los siguientes:

**Tabla 4-44 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 1
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
163,499,197	185,465,168	m3/año	163,499,197	185,465,168	m3/año

**Tabla 4-45 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 2
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
6,398,504.3	6,996,647.6	m3/año	6,398,504.3	6,996,647.6	m3/año

**Tabla 4-46 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 3
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
45,840,287	50,741,776	m3/año	42,899,290	47,946,388	m3/año

**Tabla 4-47 Transporte Longitudinal por CERC, Sector 4
(Fuente Elaboración Propia)**

Q NETO			Q BRUTO		
SUNAMURA	B&S		SUNAMURA	B&S	
178,024,027	203,745,624	m3/año	177,137,246	203,101,816	m3/año

De manera de comparar los resultados de las formulaciones utilizadas, se adjuntan gráficos explicativos a continuación:

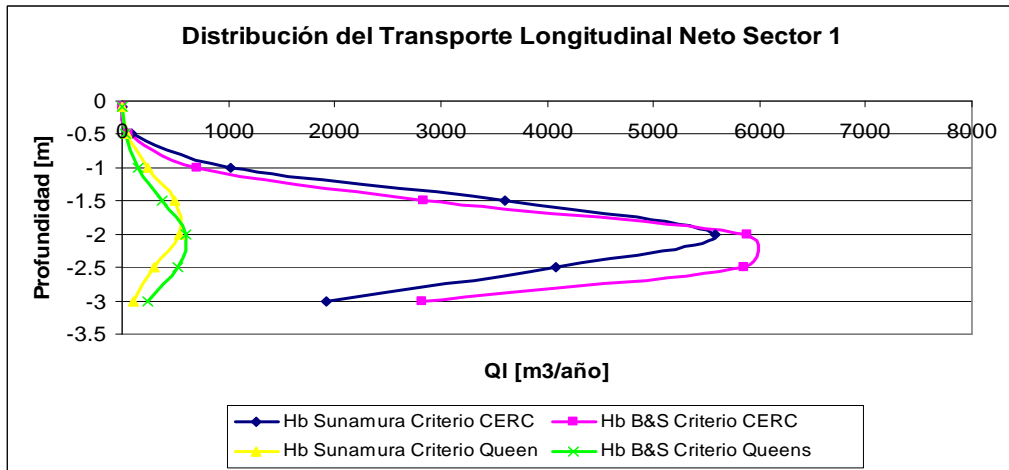


Gráfico 4-11 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 1
 (Fuente Elaboración Propia)

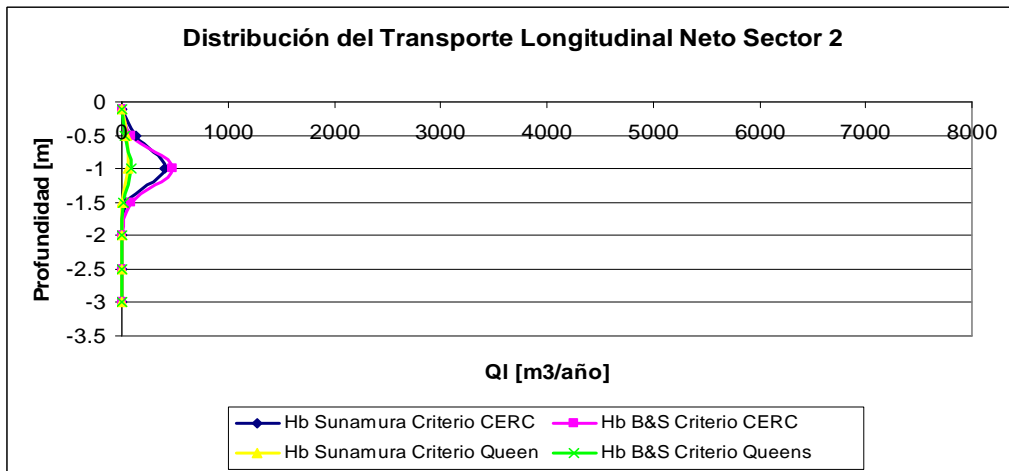


Gráfico 4-12 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 2
 (Fuente Elaboración Propia)

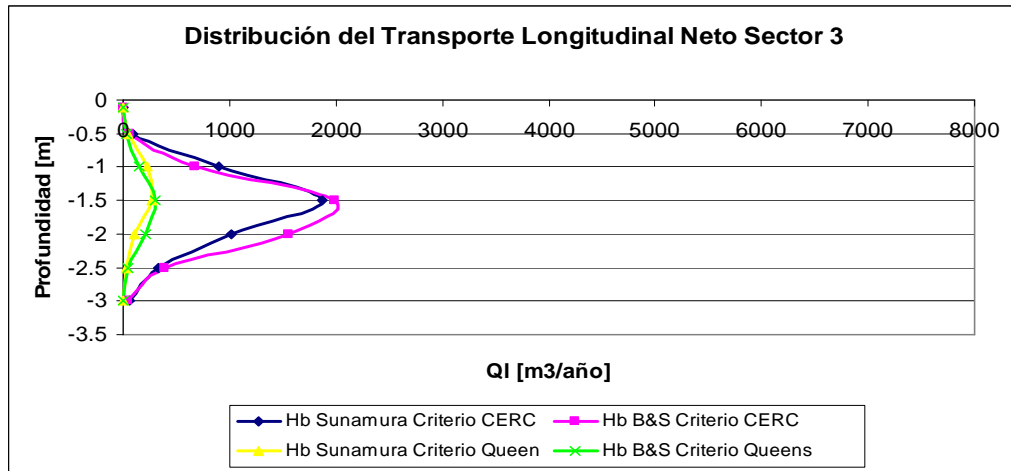


Gráfico 4-13 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 3
(Fuente Elaboración Propia)

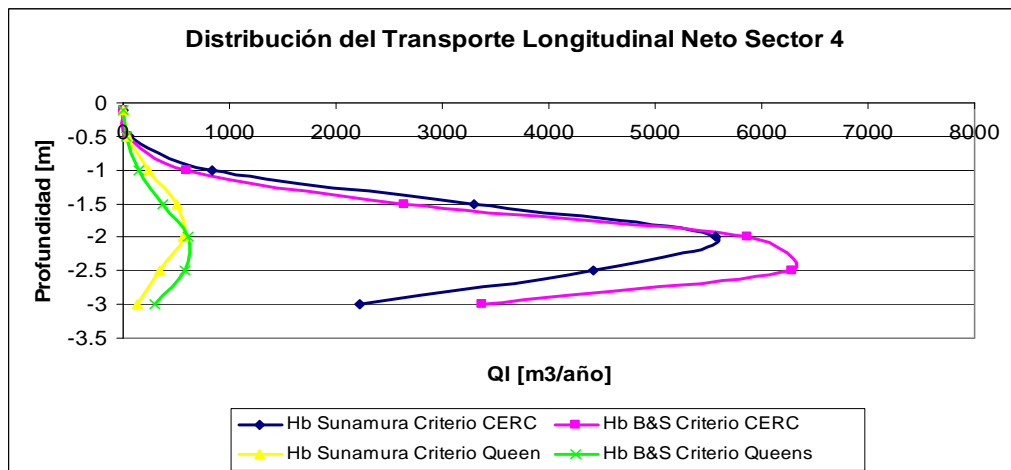


Gráfico 4-14 Distribución Transporte Longitudinal con Hb por Sunamura (1980) y Battjes and Stive (1985), Sector 4
(Fuente Elaboración Propia)

Para los 4 sectores los resultados de la fórmula del CERC son muchos mayores a los de la fórmula de Queens, siendo la fórmula de Queens más representativa ya que además de la altura en rotura considera la pendiente de la playa.

A partir de los gráficos anteriores se observa que en los sectores 1 y 4 hay mayor transporte longitudinal tanto para la fórmula de Queens como para la del CERC, donde sus máximos están entre los 2 y 2.5 metros de profundidad.

Como se mencionó anteriormente, el transporte es de Sur a Norte por lo que, aunque el máximo de la distribución se encuentre dentro de la zona de maniobras del proyecto a emplazar, el material arenoso no se acumularía.

5 MEJORAMIENTO CALETA BUCALEMU

5.1 GENERALIDADES

5.1.1 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Antes de escoger el tipo de obra de abrigo que se diseñará, se planteará el layout el cual debe proteger la zona de estudio del oleaje proveniente de las direcciones 250° a 350°.

El layout propuesto es el ilustrado en la Figura 5-1



**Figura 5-1 Propuesta de Layout en la Zona de Estudio en metros
(Fuente Elaboración Propia)**

En la Figura 5-1 se observa un rompeolas de forma paralela a la línea de costa, protegiendo a la zona del oleaje incidente, esta propuesta también cuenta con una zona de explanada y un muelle de atraque.

Este layout propuesto está sujeto a modificaciones, como por ejemplo la extracción de la formación rocosa, en las dimensiones de la explanada y de la misma obra de abrigo, como también en el emplazamiento o no del muelle propuesto. Sin embargo, esto comprenderá a un diseño de detalles y se necesita de un levantamiento topo-batimétrico en profundidad.

Para el layout propuesto, las alternativas del tipo de obra de abrigo que se diseñará en el sector son las siguientes:

- Dique en Talud
- Dique Vertical
- Dique Mixto

5.1.2 MEJORAS ESPERADAS EN EL FUNCIONAMIENTO

Las mejoras que se esperan en el sector es la disminución del downtime, el cual está asociado a la superación de la ola límite de operatividad, sin embargo los pescadores trabajan de igual forma poniendo en riesgo su vida, por lo que con el diseño de una estructura de abrigo se resguardará la vida de estos como también se disminuirá en gran magnitud el tiempo en desuso, ya que para las condiciones actuales el downtime, tanto para la altura límite transversal como longitudinal de operación, alcanza aproximadamente el 100%.

5.2 BASES DE DISEÑO

5.2.1 VIDA ÚTIL

La vida útil es la duración de la obra desde su instalación hasta su inutilización y el valor mínimo viene especificado en la Figura 5-2, en función del carácter general o específico y según su interés y el de sus instalaciones.

TIPO DE OBRA	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Infraestructura de carácter general	25(15)	50(25)	100(40)
De carácter industrial específico	15(10)	25(15)	50(25)

Leyenda:

INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:
Áreas de navegación o flotación de carácter general, no logadas a la explotación de una instalación industrial o de una sola terminal concreta.

DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO:
Áreas de navegación o flotación al servicio de una instalación industrial o de un solo terminal concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo...)

NIVEL 1:
Áreas de navegación o flotación en instalaciones de interés local o auxiliares. Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de accidente.
(Puertos menores sin tráfico de buques con productos contaminantes, inflamables o peligrosos, puertos deportivos, puertos auxiliares para equipos de construcción de obras o para embarcaciones que no tengan que operar en condiciones más desfavorables que las de diseño del puerto auxiliar, etc).

NIVEL 2:
Áreas de navegación o flotación en instalaciones de interés general. Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de accidente.
(Grandes puertos sin tráfico de productos contaminantes, inflamables o peligrosos o puertos menores que en caso de tener estos tráficos mantengan en todos los accesos y áreas de flotación accesibles a ellos, las distancias de seguridad a núcleos urbanos o espacios de elevado valor medioambiental especificadas en sus reglamentos particulares, etc).

NIVEL 3:
Áreas de navegación o flotación en puertos e instalaciones de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de accidente.
(Grandes puertos con tráfico de productos contaminantes, inflamables o peligrosos debiéndose adoptar los valores mayores de la Vida Útil si las áreas de navegación y flotación están situadas en zonas urbanas o de elevado valor medioambiental, etc).

**Figura 5-2 Vidas Útiles Recomendadas
(Fuente Ref. 18)**

La vida útil que se ajusta al proyecto de obra de abrigo es de 25 años, correspondiente al Nivel 1.

5.2.2 RIESGO

La probabilidad de que la altura de ola significativa supere la altura de ola de diseño, correspondiente a un periodo de retorno T, durante la vida útil de la obra, es lo que se define como Riesgo. Su máximo valor admisible viene dado en función de las repercusiones económicas y la posibilidad de pérdidas humanas en caso de falla, como se explica en la Figura 5-3.

a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS			
		Posibilidad de Pérdidas Humanas	
		Reducida	Esperable
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE FALLO (ELU) Índice: Coste de pérdidas/Inversión	BAJA	0.50	0.30
	MEDIA	0.30	0.20
	ALTA	0.25	0.15
a) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL			
		Posibilidad de Pérdidas Humanas	
		Reducida	Esperable
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE FALLO (ELU) Índice: Coste de pérdidas/Inversión	BAJA	0.20	0.15
	MEDIA	0.15	0.10
	ALTA	0.10	0.05

Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total atendiendo a la importancia de los daños sobre el o los buques afectados y a la incidencia que estos daños puedan ocasionar en la operación del área que se analiza o de otras zonas afectadas por ella.

En el caso de que los daños previsibles para los buques no afecten significativamente a su navegabilidad o cuando las consecuencias del fallo no conlleven la interrupción del tráfico marítimo general de la zona por periodos superiores a 2 días en el caso de puertos o instalaciones de carácter supranacional, 5 días en el caso de puertos e instalaciones de interés general o 10 días en el resto de los casos, podrán adoptarse los valores de riesgo correspondientes a iniciación de averías. En los demás casos se adoptarán los valores correspondientes al riesgo de destrucción total.

LEYENDA:

- POSIBILIDAD DE PERDIDAS HUMANAS
 - Reducida: cuando no es esperable que se produzcan pérdidas humanas en caso de accidente.
 - Esperable: cuando es previsible que se produzcan pérdidas humanas en caso de accidente.
- REPERCUSION ECONOMICA EN CASO DE FALLA

Índice r_0 = Coste de Pérdidas directas e indirectas/Inversión

 - BAJA: $r_0 \leq 5$
 - MEDIA: $5 < r_0 \leq 20$
 - ALTA: $r_0 > 20$

**Figura 5-3 Riesgos Recomendados Admisibles
(Fuente Ref. 18)**

El riesgo admisible que se ajusta a la estructura a diseñar es del 50%.

5.2.3 PERIODO DE RETORNO

En base al riesgo y la vida útil adoptadas, el periodo viene dado por la Ecuación 6-1, obteniendo un resultado de 36 años, utilizando un criterio conservador y para obtener mayor seguridad se ocupará un periodo de retorno de 50 años.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{Lf} \approx 1 - e^{-\left(\frac{Lf}{Tr}\right)} \Rightarrow Tr = -\frac{Lf}{\ln(1-R)}$$

Ecuación 5-1

Donde:

Tr: Periodo de Retorno [años]
Lf: Vida Útil [años]
R: Riesgo

5.2.4 NIVEL DEL MAR

El valor utilizado como Z_{marea} es de la Pleamar Máxima en Sicigia correspondiente a 1.52 [m], por lo tanto el $Z_{\text{diseño}}$ es 4.52 [m], ya que se considera la profundidad al pie de la obra.

5.2.5 OLEAJE DE DISEÑO

La altura de ola de diseño fue calculada por medio de la utilización de la fórmula de Goda (1985) y del criterio de rotura de Miche (1944), como se explicó en apartados anteriores, obteniendo como resultado 4.02 [m]

5.3 DISEÑO DE LAS SECCIONES TÍPICAS

5.3.1 DISEÑO HIDRÁULICO

5.3.1.1 DIQUE EN TALUD

El Run Up (R_u) es la cota que alcanza el oleaje al incidir sobre una estructura respecto el nivel del mar en reposo.

Cuando se asume una irregularidad en el oleaje, se está aceptando el hecho de que la altura de ola utilizada no es única sino que representa un conjunto de ellas que a su vez determinarán distintas respuestas del parámetro R_u , en este caso, el análisis se basa en determinar el comportamiento probabilístico del remonte (mediante el ajuste de alguna función de densidad de probabilidad) o bien determinar su comportamiento a partir de un cierto umbral de excedencia. Comúnmente se utiliza el 2% de excedencia ($R_{u2\%}$) como variable de diseño especialmente en estructuras tipo revestimiento. Estudios recientes sobre la distribución probabilística del R_u sugieren una distribución de tipo Rayleigh para estructuras simples y taludes entre 1:1.33 y 1:2.5.

El R_u depende principalmente del talud, rugosidad y porosidad de la estructura así como de la existencia de una berma y de su geometría y, de la altura de ola incidente, periodo, dirección y ancho espectral del oleaje.

La formula utilizada para el calculo del Run Up es la de Battjes de 1974, derivada de rompeolas impermeables.

$$\frac{R_{ui\%}}{H_s} = (A\xi + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta$$

Ecuación 5-2

Donde:

$R_{ui\%}$:	Run up del oleaje excedido por el i% de las olas incidentes [m]
ξ :	Parámetro de similaridad de rotura
A y C:	Coefficientes
γ_r :	Coefficiente de reducción por superficie rugosa, 1 para superficies lisas
γ_b :	Coefficiente de reducción por influencia de berma, 1 cuando no hay berma
γ_h :	Coefficiente de reducción por influencia de aguas someras
γ_β	Coefficiente de influencia por incidencia oblicua del oleaje

Luego, el Run Up para los datos de entrada de la Tabla 5-1 es de 6.2 [m] con respecto al NRS.

**Tabla 5-1 Datos de Entrada para calculo de Run Up
(Fuente Elaboración Propia)**

Definición	Nomenclatura	Valor	Unidad
Talud del Rompeolas	$\tan \alpha$	0.67	-----
Profundidad al pie de la Obra	d	3.00	m
Nivel de Marea	Zm	1.52	m
Ancho Berma	B	0.00	m
Profundidad de Diseño	db	4.52	m
Orientación del rompeolas	θ	45.00	°

5.3.1.2 DIQUE VERTICAL

En determinadas ocasiones, el oleaje es capaz de sobrepasar la obra marítima diseñada. Esta situación, que ocurre bajo la acción de oleajes muy severos, debe ser considerada como casi inevitable debiéndose prever en el diseño inicial de forma que los daños causados sean los menores posibles.

Para el cálculo del sobrepaso se utilizó la fórmula de Franco de 1999 y las propuestas por la Eurotop en su página <http://www.overtopping-manual.com/index.html>.

La fórmula de Franco para sobrepaso es para muros verticales permeables e impermeables, para ondas de crestas largas y/o cortas.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}} = 0.082 \exp\left(-3.0 \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_b \gamma_s}\right)$$

Ecuación 5-3

Donde:

- q : Caudal de Sobrepaso [m^3/s por m]
- H_s : Altura de ola significativa [m]
- γ_b : Coeficiente de reducción por influencia de berma, 1 cuando no hay berma
- γ_s : Coeficiente de geometría frontal

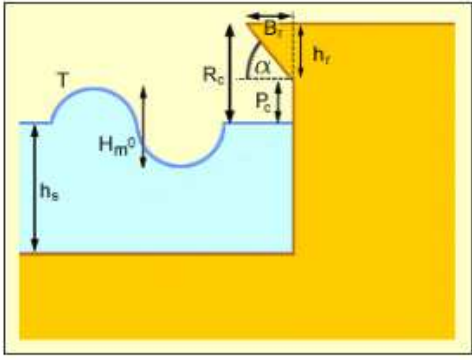
$V_B =$	$\begin{cases} \cos \beta & \text{for } 0^\circ \leq \beta \leq 37^\circ \\ 0.79 & \text{for } \beta \geq 37^\circ \end{cases}$	Long-crested waves
	$\begin{cases} 0.83 & \text{for } 0^\circ \leq \beta \leq 20^\circ \\ 0.83 \cos(20^\circ - \beta) & \text{for } \beta > 20^\circ \end{cases}$	Short-crested waves, $\sigma = 22^\circ$ y 28°
Front geometry		V_s
Plain impermeable wall		1.00
Plain impermeable wall with recurved nose		0.78
Perforated front (20% hole area) and deck		0.72 – 0.79
Perforated front (20% hole area) and open deck		0.58

Figura 5-4 Parámetros Fórmula de Franco 1999 (Fuente Ref. 10)

Con la opción Calculation Tool Empirical Method (Ref. 19) para pared vertical con retorno de oleaje, los resultados son los siguientes:

Vertical Wall with Wave Return

Method Selection Probabilistic Deterministic



Beta Results

Wave Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

0.71

T (wave period) s Tm Tp Tm-1,0

Hm0 (Wave Height at the Toe of the Structure) m

Pc (Height of vertical part of wall above still water level) m

Rc (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

hr (Height of wave return) m

Br (Horizontal extension of wave return) m

alpha (Angle of wave return) degrees

hs (Water depth at toe of structure) m

Figura 5-5 Cálculo de Sobrepaso de Dique Vertical (Fuente Ref. 19)

Los resultados para el sobrepaso son presentados en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2 Resultados de Sobrepaso para Dique Vertical
(Fuente Elaboración Propia)

Beta	CEM m3/s por m		EUROTOP m3/s por m
	Franco 1999 cresta larga	Franco 1999 cresta corta	Diseño Probabilístico
0	1.8E-03	4.1E-04	7.10E-04
20	1.1E-04	4.1E-04	
40	2.7E-04	1.5E-04	
60	2.7E-04	2.7E-04	
80	2.7E-04	3.8E-08	
100	2.7E-04	1.9E-14	

Comparando los resultados de la Tabla 5-2 con los de la Figura 5.-6, se observa que el sobrepaso obtenido para el dique vertical cumple con la seguridad estructural necesaria para el óptimo funcionamiento de la obra, ya que los caudales obtenidos son menores a 2 [litros/s por m], valor límite de funcionamiento para rompeolas, para evitar daño severo.

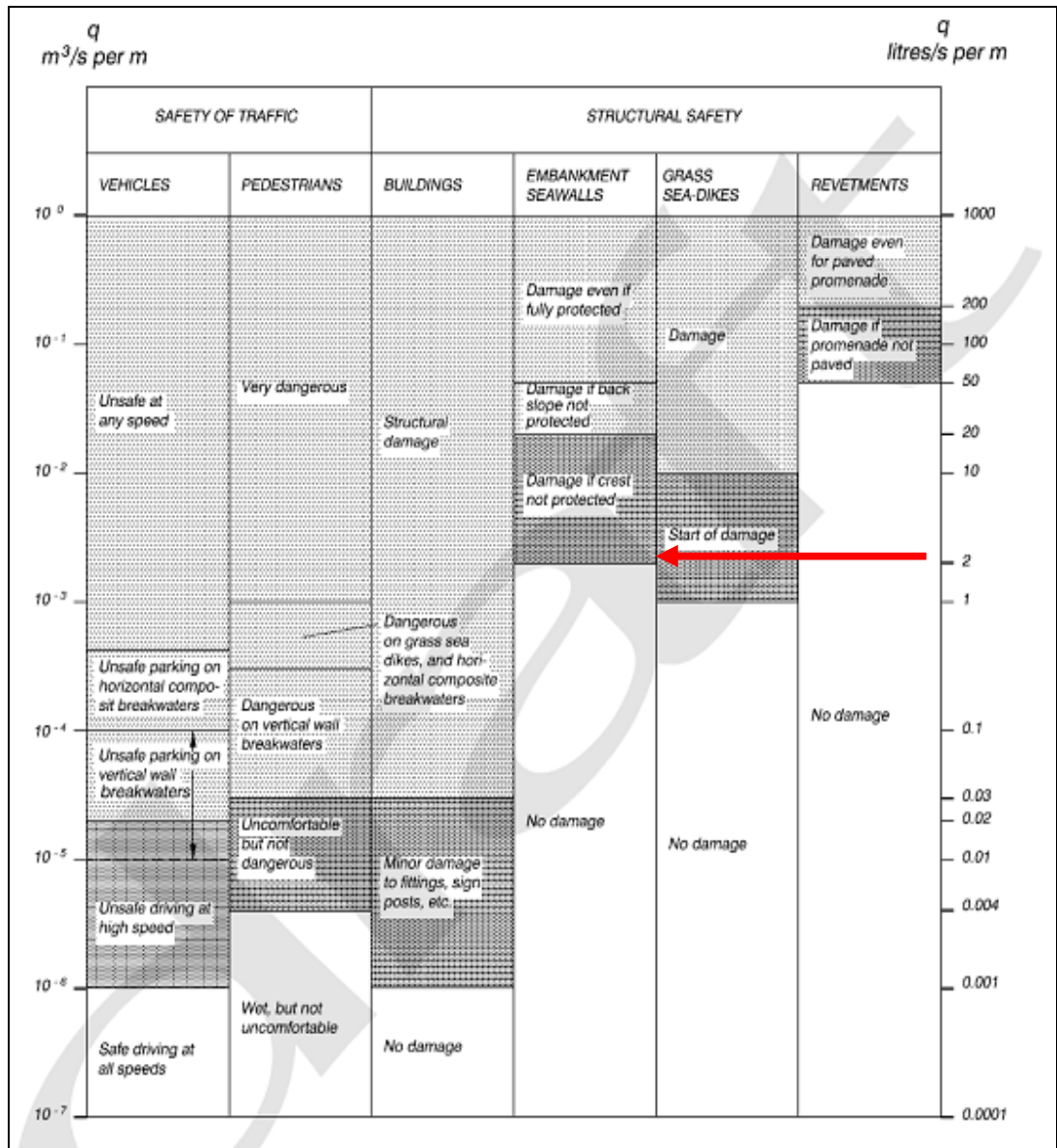


Figura 5-6 Valores Críticos de Caudales de Sobrepaso (Fuente Ref. 10)

5.3.1.3 DIQUE MIXTO

Para el dique mixto se utilizaron los resultados obtenidos para los diques antes mencionados.

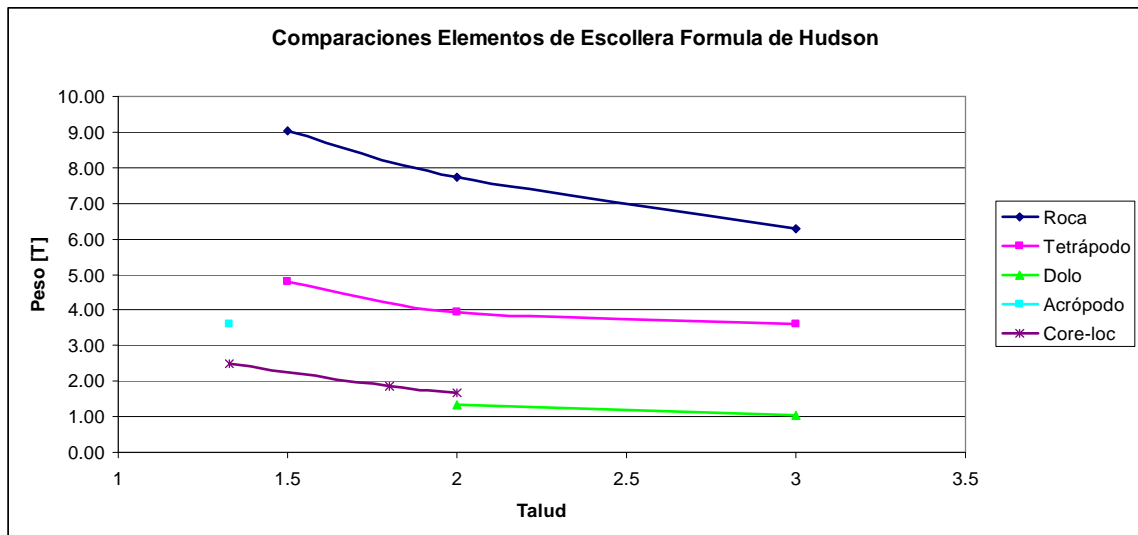
5.3.2 DISEÑO ESTRUCTURAL

5.3.2.1 DIQUE EN TALUD

Las ecuaciones empleadas son las adjuntas en el Capítulo 3 “REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA”

5.3.2.1.1 Escollera

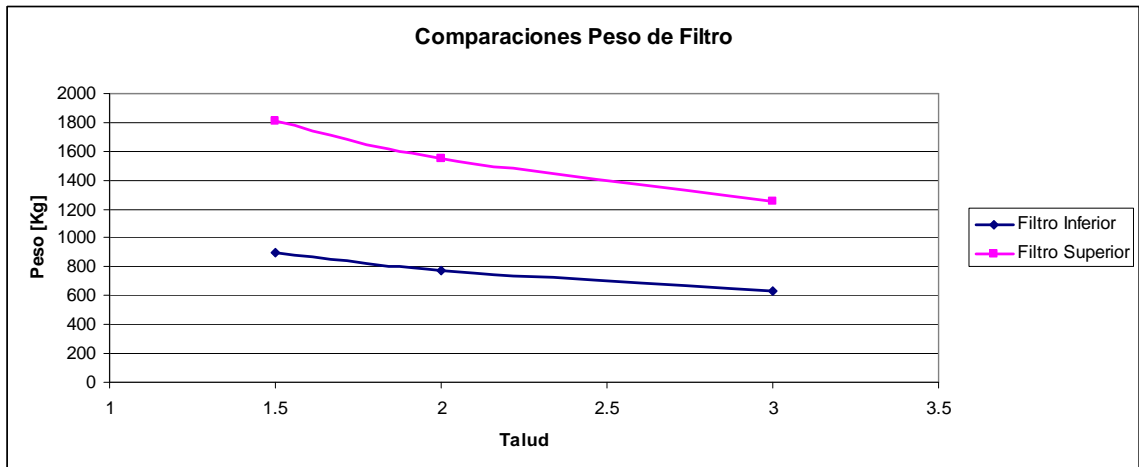
Los elementos de escollera del dique en talud, fueron calculados mediante la formulación de Hudson (1974), los resultados en formato de gráficos son adjuntados a continuación:



**Gráfico 5-1 Comparación Elemento Roca Formula de Hudson
(Fuente Elaboración Propia)**

5.3.2.1.2 Filtro

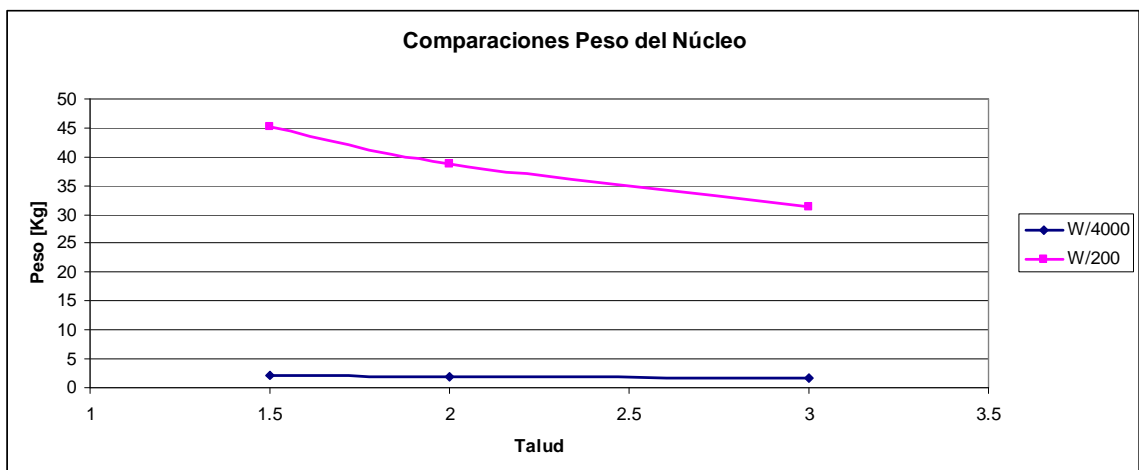
Los resultados del peso del filtro tanto inferior como superior son los siguientes:



**Gráfico 5-2 Comparación Peso de Filtro Inferior y Superior
(Elaboración Propia)**

5.3.2.1.3 Núcleo

El peso del núcleo para las condiciones W/4000 y W/200 son los siguientes:



**Gráfico 5-3 Peso de Núcleo W/200
(Fuente 5-1Elaboración Propia)**

5.3.2.1.4 Pie De Apoyo

Los resultados para el peso del pie de apoyo como también su ancho y alto son adjuntados a continuación:

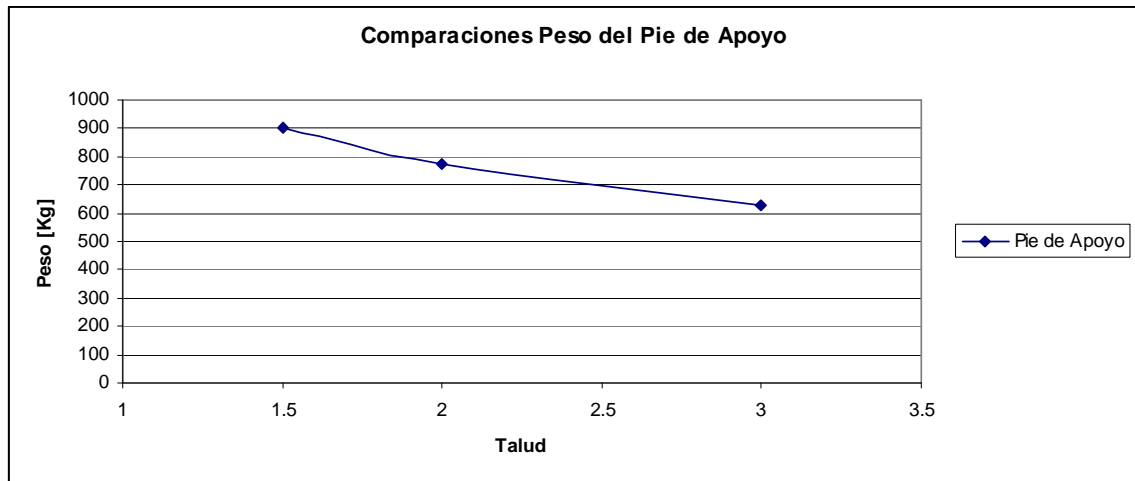


Gráfico 5-4 Pesos del Pie de Apoyo
(Fuente Elaboración Propia)

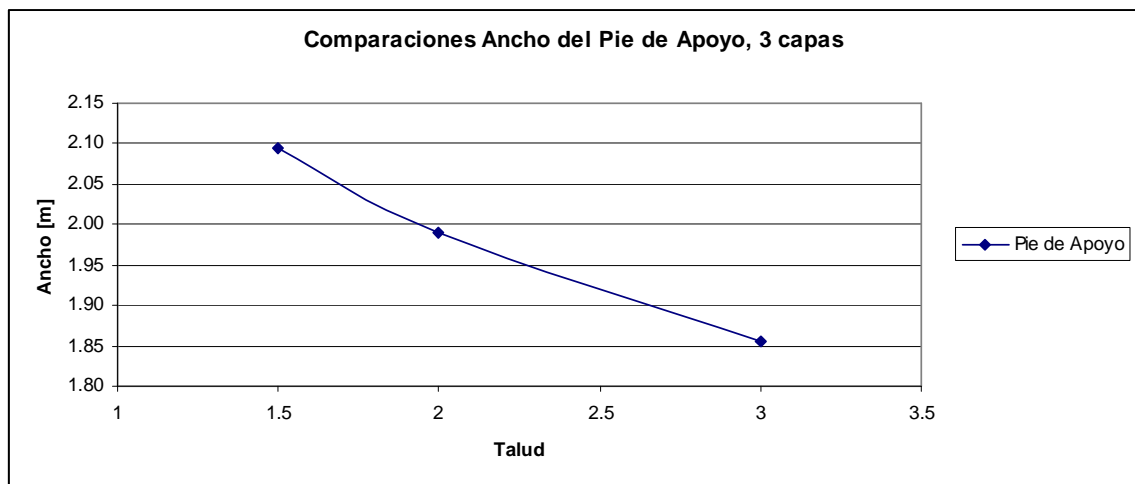
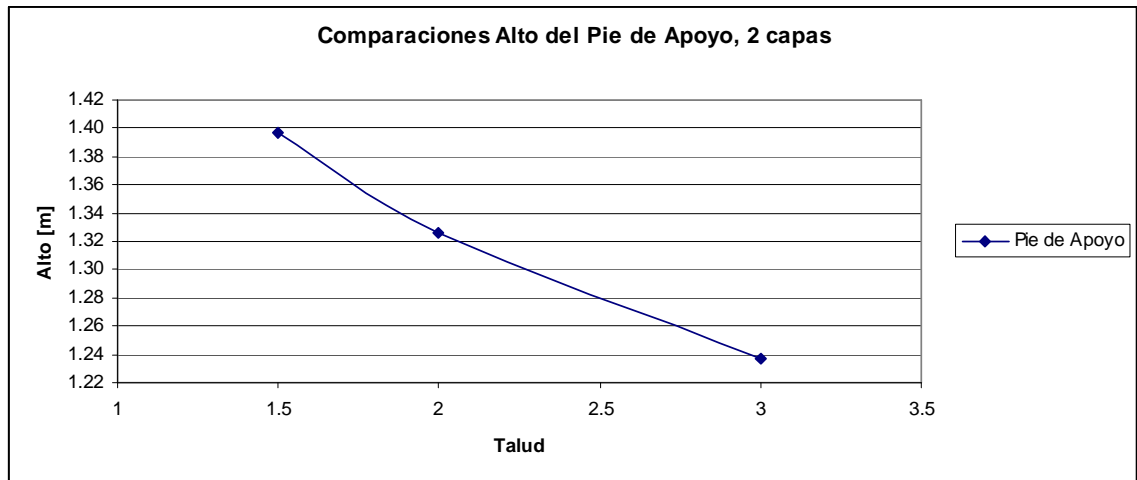


Gráfico 5-5 Ancho Pie de Apoyo
(Fuente Elaboración Propia)



**Gráfico 5-6 Alto Pie de Apoyo
(Fuente Elaboración Propia)**

Por lo tanto la sección transversal del dique en talud es la que se adjunta en la Figura 5-7

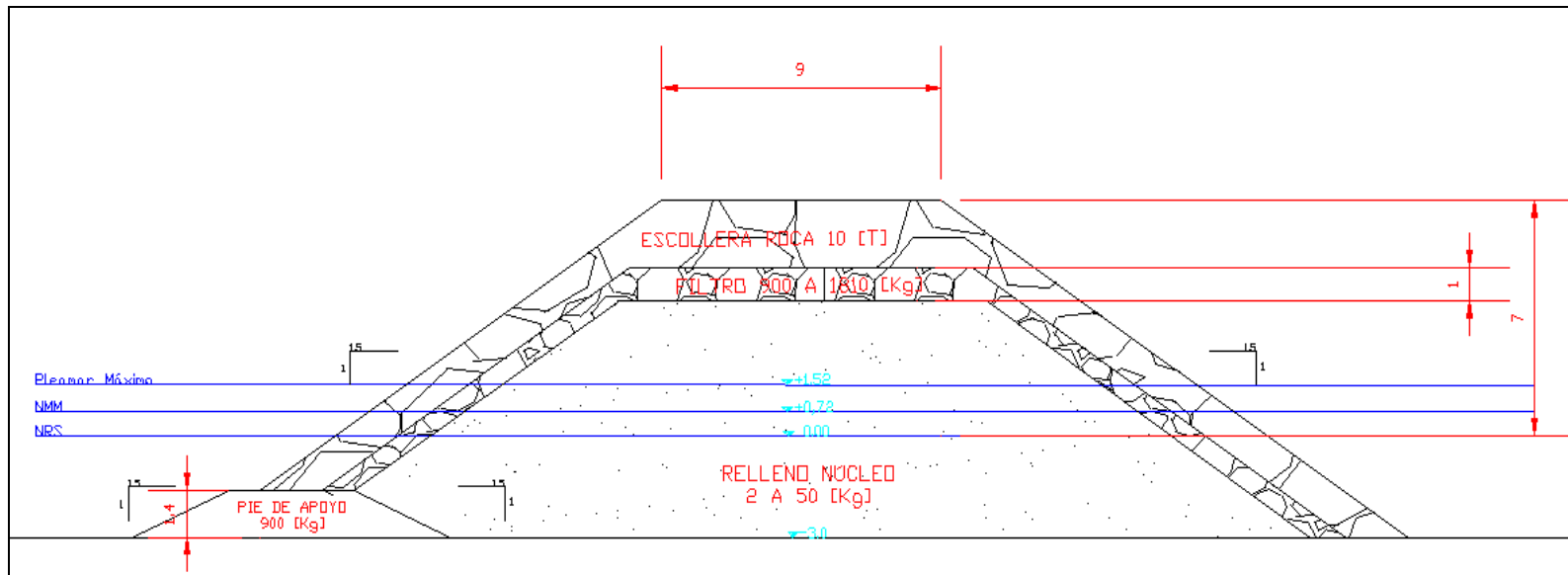


Figura 5-7 Sección Transversal Dique en Talud
(Fuente Elaboración Propia)

5.3.2.2 DIQUE VERTICAL

Para el diseño del dique vertical, se debe calcular la estabilidad de este, para lo cual se utilizó la fórmula de Sainflou de 1928.

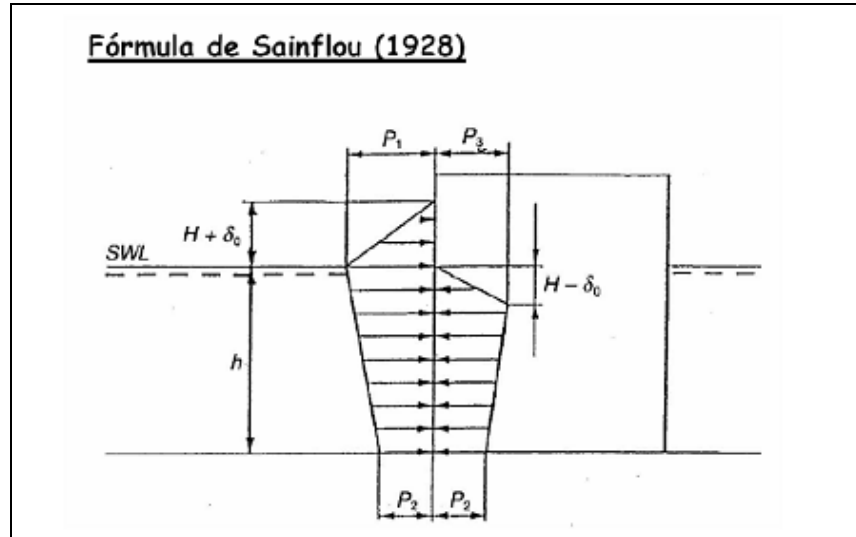


Figura 5-8 Formula de Sainflou (1928)
(Fuente Elaboración Propia)

Los datos de entrada del dique vertical son los siguientes:

Tabla 5-3 Datos de Entrada Dique Vertical
(Fuente Elaboración Propia)

Datos de Entrada		
H	4.02	[m]
h	4.52	[m]
ρ_w	1025,00	[T/m ³]
ρ_r	2650,00	[T/m ³]
ρ_h	2400,00	[T/m ³]
ancho	10,00	[m]
alto	12,00	[m]
alto sumergido	8.54	[m]

Los factores de seguridad tanto para el deslizamiento como para el vuelco son mayores o iguales a 1.5 y 2 respectivamente, con los datos de la Tabla 5-3 los resultados obtenidos son 5.2 como factor de seguridad de deslizamiento y 6.3 para el de vuelco, por lo tanto la estructura cumple con los parámetros de diseño.

Para mayor detalle ver ANEXOS IV.

El diseño estructural del dique vertical viene ligado con el diseño hidráulico de este, es decir, para poder calcular la estabilidad del cajón de hormigón se debe proponer una geometría que cumpla con los factores de seguridad.

Por lo tanto el perfil transversal para el dique vertical es el adjuntado en la Figura 5-9:

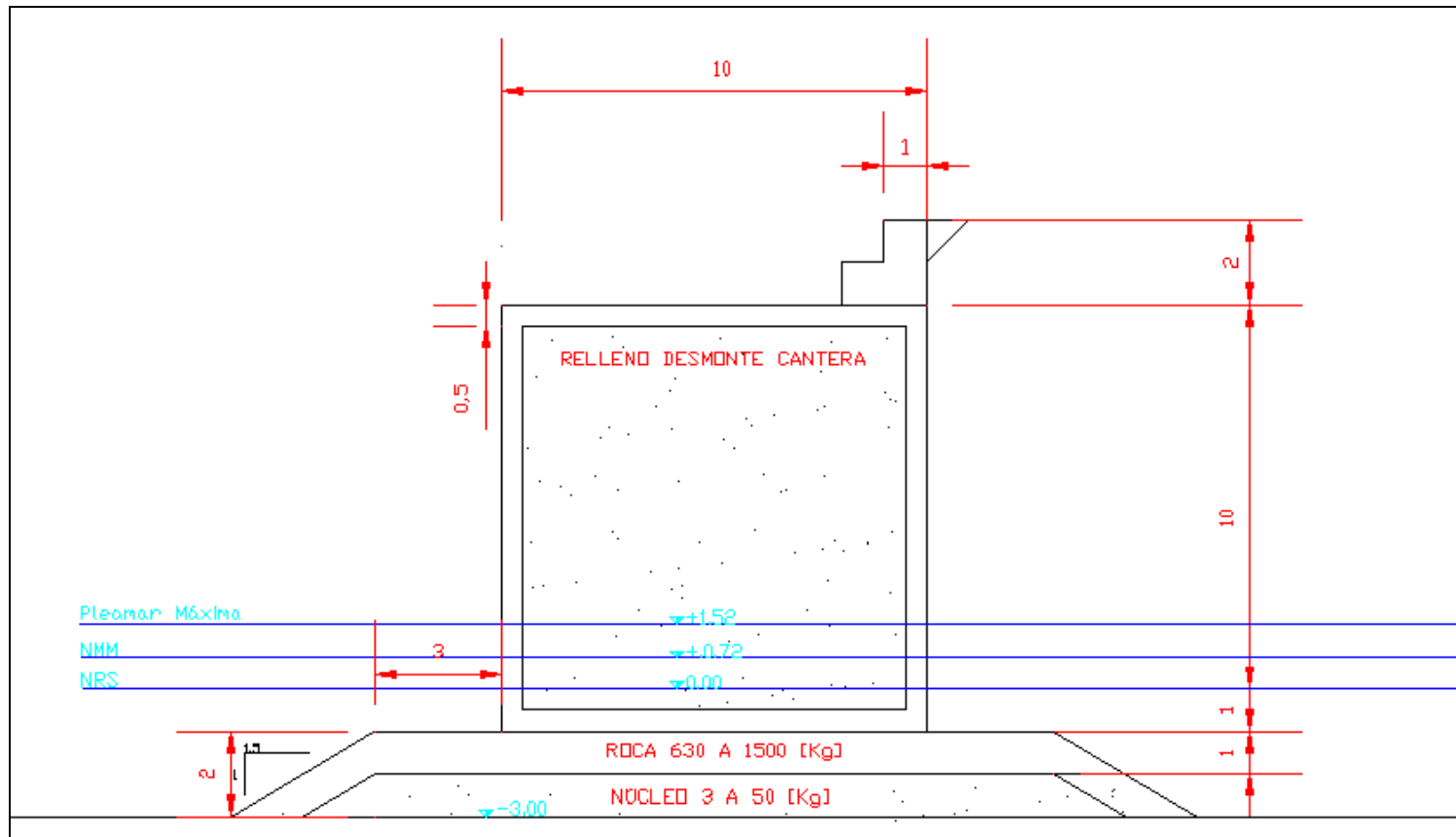


Figura 5-9 Sección Transversal Dique Vertical
(Fuente Elaboración Propia)

5.3.2.3 DIQUE MIXTO

Para obtener el perfil transversal del dique mixto se utilizaron los resultados obtenidos para los diques antes mencionados, la sección se adjunta en la Figura 5-10 de a continuación:

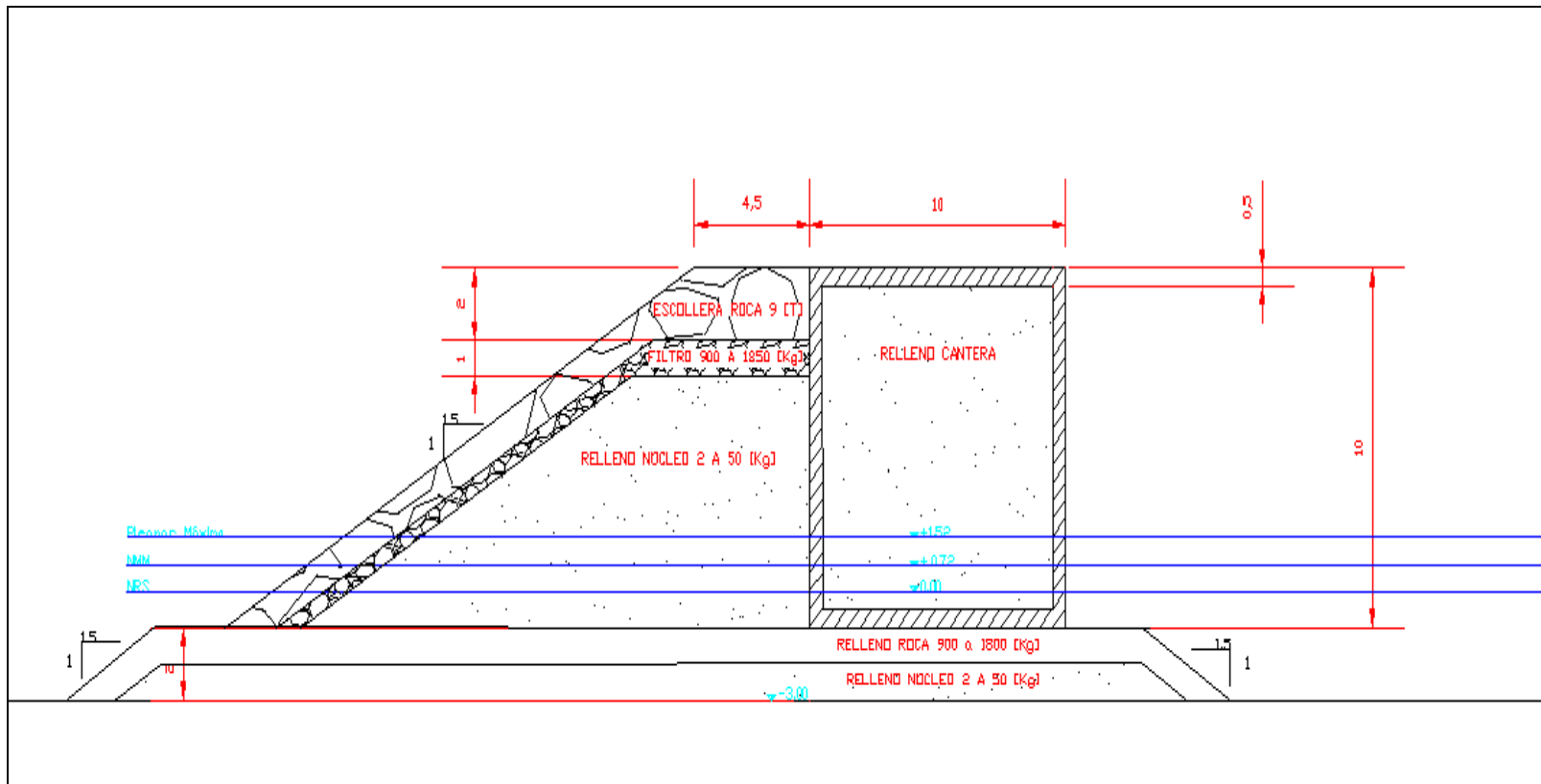


Figura 5-10 Sección Transversal Dique Mixto
(Fuente Elaboración Propia)

5.4 MODIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE AGITACIÓN

5.4.1 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Para modelar la situación en aguas someras con la estructura presente, se utilizó el programa Mike 21 BW. La forma de la obra en la grilla es la misma, lo que varía es la porosidad dependiendo del tipo de estructura, en talud, vertical o mixta.

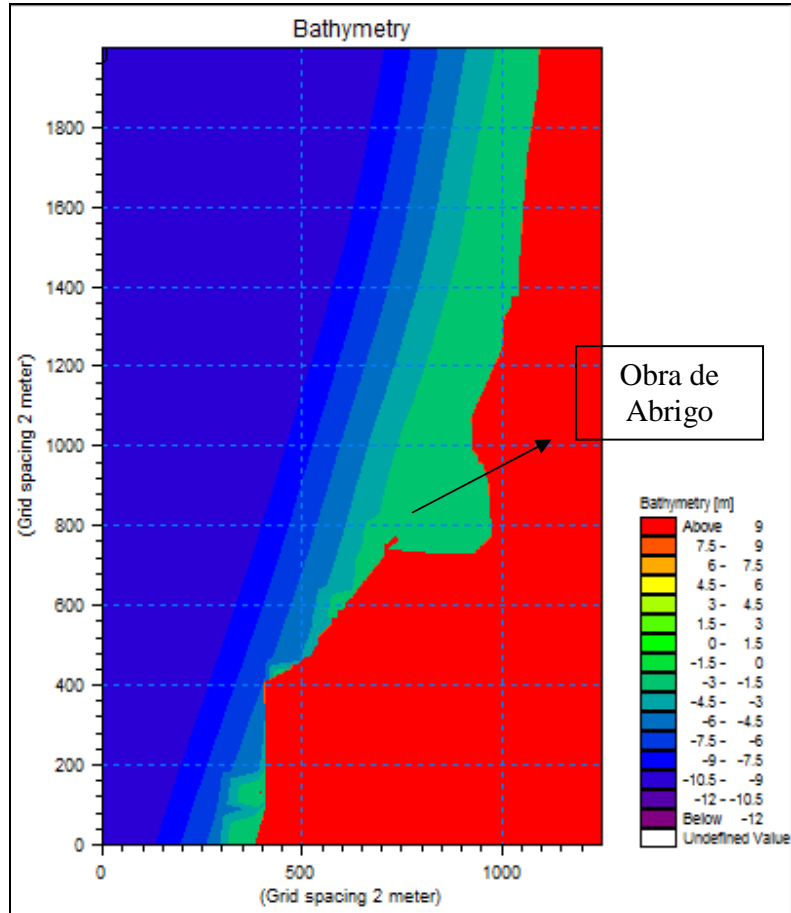


Figura 5-11 Grilla con estructura en Mike 21 BW
(Fuente Elaboración Propia)

Las combinatorias propagas son las mismas que presenta la Tabla 4-7, mientras que las porosidades utilizadas son obtenidas de la Figura 5-12

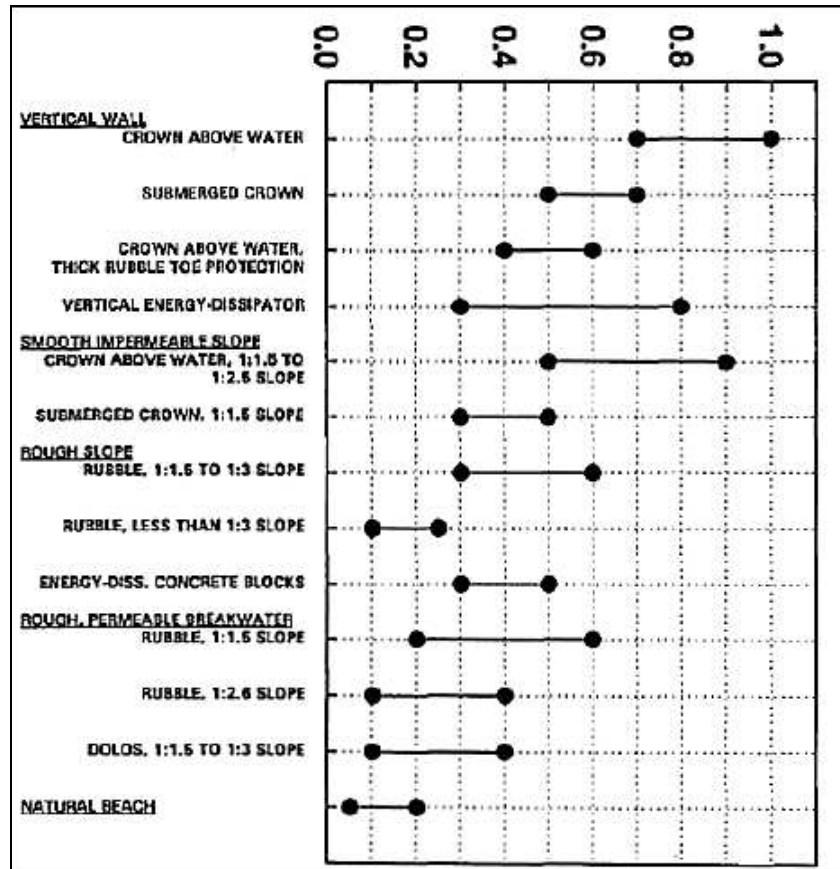


Figura 5-12 Coeficientes de Reflexión
 (Fuente Boussinesq Wave Module – User Guide)

Los resultados de altura de ola para la dirección y periodo más frecuente (247.5° y 13 segundos) son las adjuntadas en la Figura 5-13, 5-14 y 5-15.

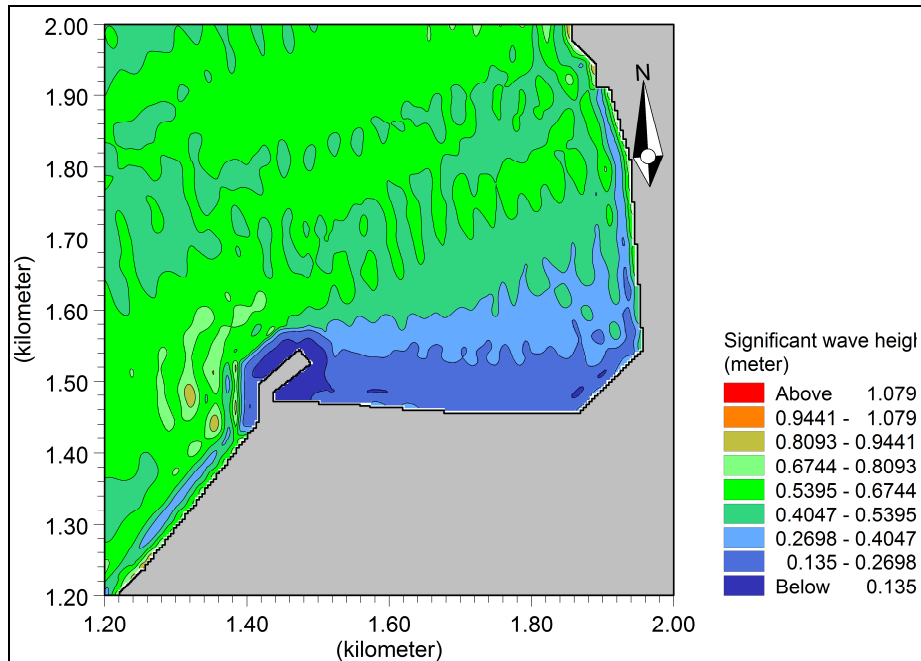


Figura 5-13 Resultado de altura de ola con dique en talud (Fuente Elaboración Propia)

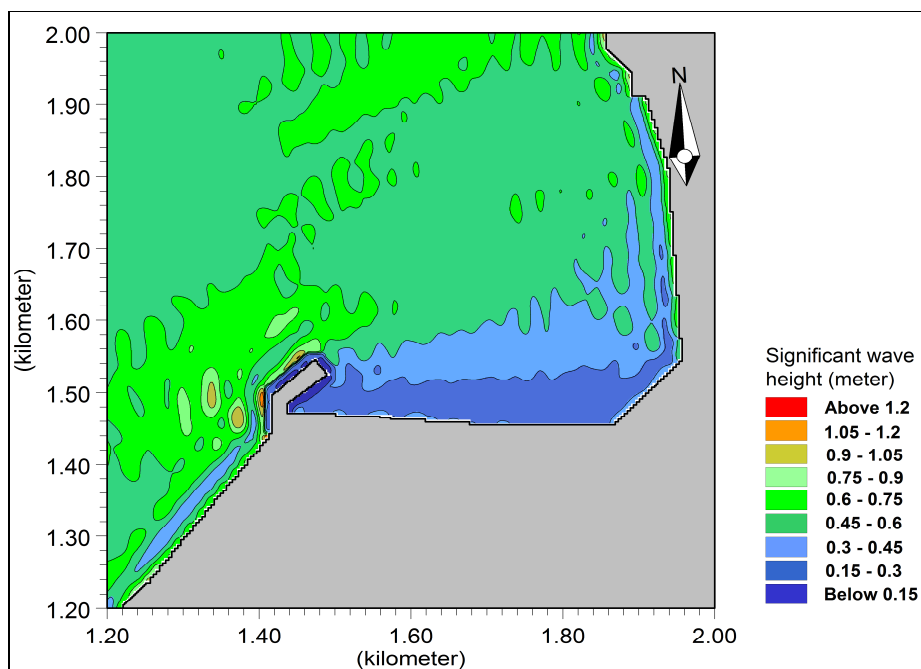
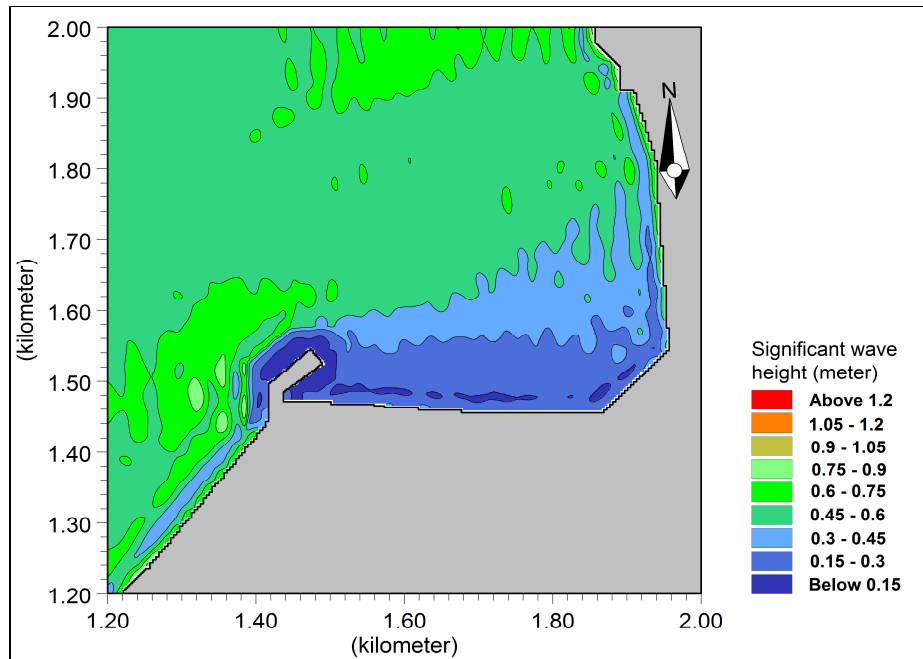


Figura 5-14 Resultado de altura de ola con dique vertical (Fuente Elaboración Propia)



**Figura 5-15 Resultado de altura de ola con dique mixto
(Fuente Elaboración Propia)**

5.4.2 OPERATIVIDAD ESPERADA

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo del diseño de la estructura es disminuir el porcentaje del downtime.

A través de la modelación realizada con Mike 21 BW se obtuvieron las alturas de ola con la presencia de las 3 diferentes tipologías de diques, con estos resultados, se comparó con las alturas límites propuestas por la ROM y se determinó el downtime para cada una de ellas.

**Tabla 5-4 Downtime en zona de estudio con y sin obra
(Fuente Elaboración Propia)**

DOWNTIME				
Altura Limite/Tipología	Sin Obra	Dique Talud	Dique Vertical	Dique Mixto
Transversal	99.98%	0.03%	1.31%	0.02%
Longitudinal	99.73%	0.00%	0.06%	0.00%

Como se observa en la Tabla 5-4 la disminución en del downtime es de gran magnitud, por lo tanto cualquier tipología elegida para el sector cumple con la función de bajar las horas sin trabajo además garantiza que la gran mayoría del tiempo la altura dentro la zona de maniobras es menor o igual a la altura límite tanto transversal como longitudinal.

Cabe señalar que los periodos en donde la altura de ola supera las alturas límites son en invierno, por lo que estas alturas mayores están asociadas a temporales, periodo en el cual los pescadores no trabajan, por lo tanto el downtime obtenido para las 3 tipologías no afectaría la productividad de la caleta

5.5 EVALUACIÓN Y ELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Una vez definidas las estructuras, estas se deben evaluar para luego elegir la definitiva que se emplazará en el sector de estudio.

Los métodos de evaluación serán el costo de la estructura y su funcionalidad, es decir, la que disminuya en mayor magnitud el oleaje incidente.

5.5.1 COSTO DE LA ESTRUCTURA

Para cada estructura se realizó una cotización de cada uno de sus componentes, los resultados son adjuntados en la Tabla 5-5:

**Tabla 5-5 Cotizaciones de Estructuras para Caleta Bucalemu
(Fuente Elaboración Propia)**

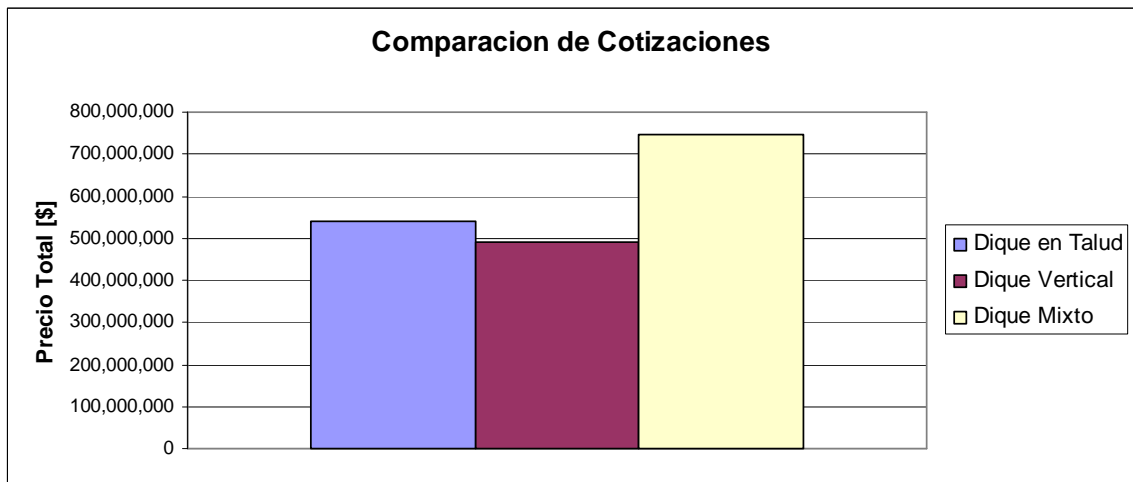
Descripción	Unidad	Cantidad	P.U (\$)	P. Total (\$)	P. Total (\$US)
OBRAS MARITIMAS					
OBRAS DE ABRIGO					
Dique en Talud					
Núcleo de Roca 2 a 50 [Kg]	m3	154.2562	10,855	1,674,451	3,590
Filtro de Roca (2 Capas) 0.9 a 1.8 [T]	m3	25.9687	28,000	727,124	1,559
Escollera de Roca (2 Capas) 10 [T]	m3	53.2433	58,500	3,114,733	6,678
Pie de Apoyo 0.9 [T]	m3	10.0059	40,500	405,239	869
TOTAL				5,921,547	12,696
Dique Vertical					
Núcleo de Roca Bajo Cajón 3 a 50 [Kg]	m3	17.6932	10,855	192,060	412
Filtro de Roca Bajo Cajón (2 Capas) 0.63 [T] a 1.5 [T]	m3	21.0638	28,000	589,786	1,265
Relleno Granular Cajón	m3	80.9712	20,000	1,619,424	3,472
Estructura de Hormigón (Protección Cajón)	m3	21.9052	83,300	1,824,703	3,912
Espaldón Hormigón	m3	12.0202	83,300	1,001,283	2,147
Parapeto Hormigón	m3	1.9932	83,300	166,034	356
TOTAL				5,393,289	11,564
Dique Mixto					
Núcleo de Roca 2 a 50 [Kg]	m3	89.988	10,855	976,820	2,094
Filtro de Roca (2 Capas) 0.9 a 1.8 [T]	m3	14.556	28,000	407,568	874
Escollera de Roca (2 Capas) 10 [T]	m3	28.8142	58,500	1,685,631	3,614
Núcleo de Roca Bajo Cajón 3 a 50 [Kg]	m3	39.9282	17,143	684,489	1,468
Filtro de Roca Bajo Cajón (2 Capas) 0.63 [T] a 1.5 [T]	m3	43.7531	28,000	1,225,087	2,627
Relleno Granular Cajón	m3	80.9712	17,143	1,388,089	2,976
Estructura de Hormigón (Protección Cajón)	m3	21.9052	83,300	1,824,703	3,912
TOTAL				8,192,387	17,565

Cabe señalar que para la obtención de estos resultados se utilizó como supuesto que todos los materiales de construcción necesarios para las obras están en el sector de estudio, por lo tanto los resultados finales solo corresponden a la obra gruesa.

Los resultados de la Tabla 5-5 fueron calculados por metro lineal, la Tabla 5-6 expone los valores reales, considerando el largo de la estructura, cuyo valor es 91 [m] (correspondiente solo al largo del rompeolas).

**Tabla 5-6 Resultados de Cotizaciones por Largo Real de la estructura
 (Fuente Elaboración Propia)**

Obra	P. Total (\$)	P. Total (\$US)
Dique en Talud	538,860,745	1,155,362
Dique Vertical	490,789,341	1,052,293
Dique Mixto	745,507,200	1,598,429



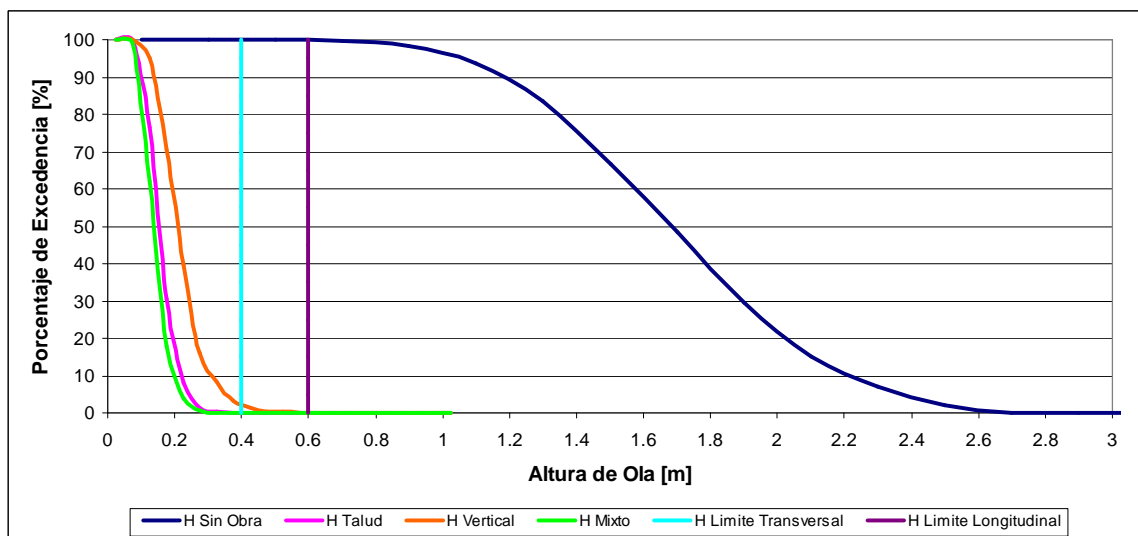
**Gráfico 5-7 Comparación de Cotizaciones para las 3 Tipologías
 (Fuente Elaboración Propia)**

5.5.2 FUNCIONALIDAD DE LA ESTRUCTURA

Como se mencionó anteriormente, la finalidad de las estructuras propuestas es disminuir las alturas de olas, para mejorar la operatividad de la Caleta Bucalemu.

Sin la presencia de alguna estructura de protección, el downtime de la Caleta es de 99.73% y 99.98% para límites de operación longitudinal y transversal respectivamente, como se expuso en capítulos anteriores.

Para comparar los datos sin obra y con las 3 obras propuestas, se adjunta el Gráfico 5-8 con las probabilidades de excedencias de cada una de ellas, como también las alturas límites de operación correspondiente a 0.4 [m] de forma transversal y 0.6 [m] de forma longitudinal.



**Gráfico 5-8 Probabilidades de Excedencia para Situaciones con y sin obra
(Fuente Elaboración Propia)**

Como se observa en el Gráfico 5-8, los 3 tipos de obras cumplen con las alturas límites de operación, la obra que posee una menor curva de excedencia es el dique mixto, casi similar a la del dique en talud. El dique vertical tiene una mayor curva de excedencia, ya que las alturas son mayores por el efecto de reflexión.

Las 3 estructuras fluctúan en un rango similar de costos, siendo la más económica el dique vertical, pero como se mencionó, es la estructura que tiene una curva de excedencia mayor en comparación con las otras 2 tipologías, por lo que se descartará, ya que se dará mayor importancia a la funcionalidad que al costo.

Las tipologías que restan son el dique en talud y el dique mixto, su curva de excedencia es bastante similar, por lo que la elección de la obra a emplazar, en este caso, será el costo.

El dique en talud es más económico que el dique mixto y su funcionalidad es aproximadamente la misma, consecuentemente la tipología que se instalará en la Caleta Bucalemu es el Dique en Talud.

5.6 DETALLES DE LA ESTRUCTURA ELEGIDA

En los capítulos anteriores, se evaluó y se escogió la tipología más conveniente y de mayor funcionalidad para la zona de estudio, la que corresponde al Dique en Talud (Figura 5-8)

En este apartado se expondrán detalles de la estructura como también una disposición en planta, de forma más detallada, del layout en la zona de estudio.

Los componentes del dique en talud son adjuntados en la Tabla 5-8

**Tabla 5-7 Datos de Entrada para cálculo de componentes del dique
(Fuente Elaboración Propia)**

Datos de Entrada			
Altura de Ola	H	4.02	m
Periodo	T	13	s
Gravedad	g	9.8	m/s ²
Longitud de Onda Offshore	Lo	217.95	m
Delta Marea	z	1.52	m
Peso específico del agua	gw	1025	kgf/m ³
Peso específico de la roca	gr	2650	kgf/m ³
Peso específico del hormigón	gh	2400	kgf/m ³
Talud de la Obra		1.5	

**Tabla 5-8 Resultados de Componentes del Dique en Talud
(Fuente Elaboración Propia)**

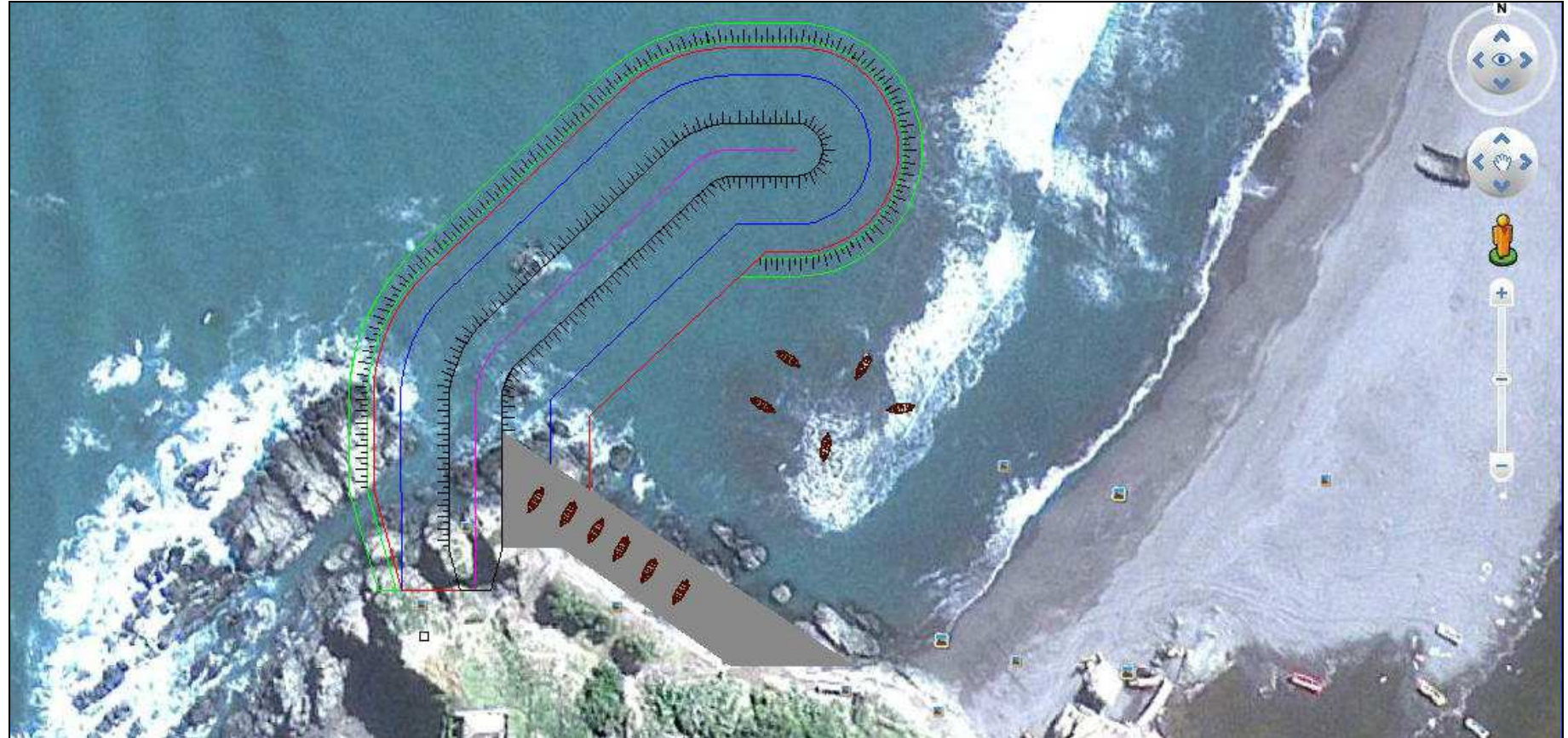
Resultados					
Estructura	Material	Capas	Ancho [m]	Alto [m]	Peso [T]
Pie de Apoyo	roca angular random	3 y 2	2.09	1.4	0.9
			Intervalo de Pesos [T]		
Escollera	roca angular random	2	9.02		
Filtro	roca angular random	2	0.902		1.804
Núcleo	roca angular random	2	0.002		0.045

Los resultados de la Tabla 5-8 se ven explícitamente en la Figura 5-8 que corresponde a la sección transversal del dique en talud.

Otra estructura del layout propuesto es la explanada, lugar donde se realizará la carga y descarga de mercancías, es por esta razón que el muelle propuesto no será emplazado.

El área de la explanada es de 701.05 [m²], variando su profundidad de 0 a 3 [m], donde el material de construcción será el hormigón.

La disposición en planta es la adjuntada en la siguiente Figura 5-16.



**Figura 5-16 Layout con Dique en Talud
(Fuente Elaboración Propia)**

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 RESPECTO DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

El oleaje medio en la Caleta Bucalemu tiene como parámetros de resumen más representativos, una componente en el 3° cuadrante con un Peak de 247.5°, para una altura de 1.75 [m] y un periodo de 13 [s].

Con dichos parámetros la operatividad no es óptima en la zona, teniendo un downtime del 99.98 % para la altura límite transversal y uno del 99.73% para la altura límite longitudinal, correspondiente para barcos pesqueros como los presentes en la caleta.

La durabilidad de la roca depende de la dureza de esta, como norma general, una navaja de acero solo debería poder “arañar” la piedra muy ligeramente, si la piedra se araña con facilidad, entonces no es adecuada para su utilización en el rompeolas. (Ref. 20)

La roca presente en el sector es del tipo pizarra, la cual a simples golpes se rompe, es por esta razón que no es utilizable en la estructura de abrigo, por lo que se utilizará para el relleno del núcleo de la obra.

En relación al sedimento presente en la zona, se observa que para los sectores 1, 2, 3 y 4 en las zonas de comienzo de playa hay presencia de arena Mediana y Fina y en la zona sumergida arena del tipo Gruesa, esto se debe al movimiento sísmico y posterior tsunami que modificó la dinámica litoral del sector, ya que en la mayoría de las playas en las zonas sumergidas se encuentra presencia de material fino mientras que en el área de solana arena más gruesa.

Además se debe considerar la presencia del estero, que anteriormente no desembocaba en el mar pero post terremoto y tsunami proporciona sus sedimentos no a la zona sumergida si no a la zona de ante playa.

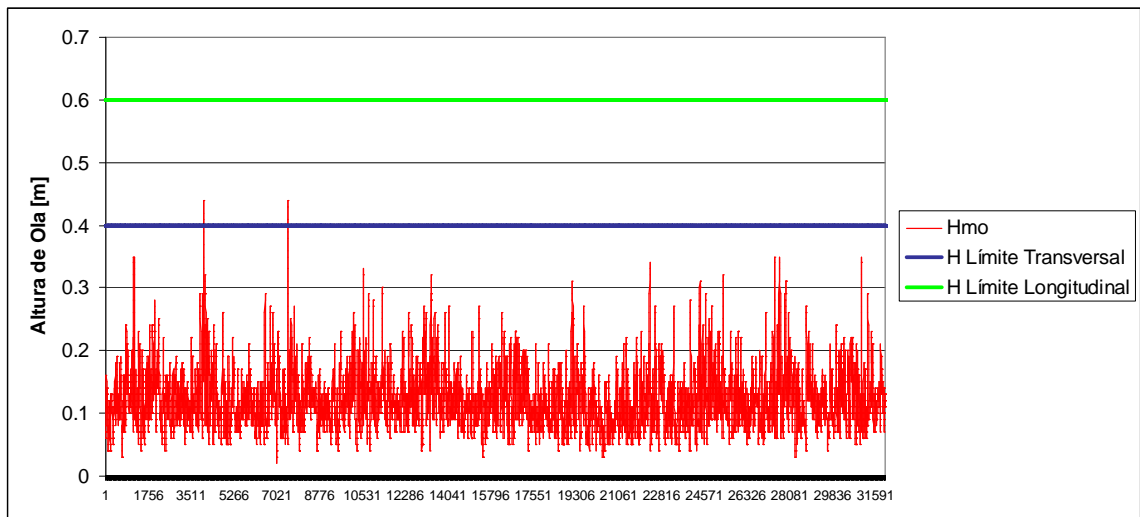
La distribución transversal del transporte longitudinal es de los 0 [m] hasta los 3 [m] de profundidad, la obra a emplazar se ubicará en la cota 3 [m], sin embargo el transporte de sedimentos en la Caleta Bucalemu esta dominado por olas que vienen del 3° cuadrante, con una dirección de Sur a Norte, por lo que la instalación de una obra de abrigo no afectaría la línea de playa ni tampoco se produciría acumulación de sedimentos al costado del dique.

6.2 RESPECTO DEL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE ABRIGO

Para los parámetros de diseño calculados y una vida útil de 25 años con riesgo del 50%, se evaluaron 3 alternativas de obra, Dique Vertical, en Talud y Mixto.

La estructura elegida es la de un Rompeolas en Talud, de un costo de 529,002,360 millones de pesos (considerando solo el rompeolas), compuesto de una escollera de rocas de 10 [T], filtro, núcleo y pie de apoyo también compuesto de rocas.

Con la estructura elegida el downtime baja a un 0.033% para la altura límite transversal y a un 0% para la longitudinal, como se observa en el Gráfico 6-1:



**Gráfico 6-1 Alturas de Ola con presencia de Rompeolas en Talud v/s Alturas Límites
(Fuente Elaboración Propia)**

Para complementar la obra de protección elegida, se emplazará una explanada para el acopio de los 27 botes presentes en la caleta y si se concentra la actividad pesquera de las cinco caletas reconocidas, las estructuras funcionarían óptimamente para las 84 embarcaciones⁷.

⁷ Información obtenida hasta la fecha en Sernapesca

6.3 RECOMENDACIONES GENERALES

Debido a la determinación de la batimetría por medio de interpolaciones, el resultado final de esta no es la batimetría real de la zona, por lo tanto sería recomendable hacer un levantamiento topo batimétrico in situ para trabajar con resultados reales.

Sobre el análisis geológico realizado a las rocas del sector de Bucalemu, se recomienda hacer un estudio más a fondo en el sector, como por ejemplo la realización de un mapa geológico, en el cual estén presentes el tipo de roca de la superficie terrestre del sector, su estructura geológica, elementos geomorfológicos, además de lanzas de agua y mecánica de suelos.

Respecto de los programas utilizados, Stwave y Mike 21 BW, se puede comentar que son una gran herramienta para el desarrollo de estudios marítimos. Stwave es un modelo sencillo, de fácil aplicación que representa de buena manera las condiciones naturales del oleaje hasta aguas intermedias.

Para aguas someras, se utilizó el modelo Mike 21 con su módulo BW (Boussinesq Wave Model), este simula los efectos combinados de la mayoría de los fenómenos del oleaje, como también la reflexión parcial que se produce por la presencia de estructuras marítimas.

Se recomienda realizar mediciones para calibrar los modelos utilizados, Stwave y Mike 21 BW.

De la toma de muestras de sedimentos se debe tener en cuenta que fue realizada después del terremoto y tsunami del 27 de Febrero del 2010, por lo tanto los resultados no son del todo representativos, pero a través de las formulaciones ocupadas se puede obtener la dirección del transporte de sedimentos. Se recomienda hacer una posterior toma de muestras y comparar los resultados con los obtenidos en esta memoria.

En relación a las rocas utilizadas para la escollera de la obra de abrigo, no se consideró el transporte de estas, es decir, se supuso que las rocas están en el sector, sin embargo estas rocas no son provenientes de las formaciones rocosas de la zona, estas serán extraídas y serán utilizadas como relleno del núcleo del rompeolas. Por lo tanto para posteriores cotizaciones se debe considerar el transporte del material rocoso o bien el transporte y costo de elementos de hormigón para la protección del dique, además de todas las obras anexas

El lector del presente proyecto de título debe tener claro que éste corresponde a un estudio de ingeniería básica preliminar y no basta esta información para construir.

7 REFERENCIAS

- Ref. 1 Medina Villaverde, Ingeniería Marítima y Costera, Madrid, Nautilus, 2009
- Ref. 2 U. S. Army Corps of Engineers. "Coastal Engineering Manual". Volumen II, chapter 1. Volumen III, chapter 1, 2 and 3, 2003
- Ref. 3 Enginyeria Marítima, Interacción Obras-Estructuras, Catalunya
- Ref. 4 Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Documentos de Referencia I y II, Universidad de Cantabria, España, 2000
- Ref. 5 N. Ortiz Tarroija, Análisis de la Aproximación de Modelos Espectrales, 2011
- Ref. 6 N. Ortiz Tarroija, Transporte Longitudinal de Sedimentos en los Temporales, 2011
- Ref. 7 Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Introducción a la Dinámica Costera, El Salvador, SNET, 2010
- Ref. 8 Dique, Wikipedia, <http://es.wikipedia.org/wiki/Dique>
- Ref. 9 Capitulo 2 Procedimiento y Bases de Cálculo, ROM 1.0-2b, 2009
- Ref. 10 U. S. Army Corps of Engineers. "Coastal Engineering Manual". Volumen III, chapter 5, 2003
- Ref. 11 Dirección de Obras Portuarias, Ministerio de Obras Públicas, Chile
- Ref. 12 Capitulo 8 Requerimientos de Planta, ROM 3.1-99 Proyecto de la Configuración Marítima de Puertos, Canales de Acceso y Áreas de Flotación.
- Ref. 13 Arqhys, *Arqhys Architects Site*, [online], Dirección URL: <http://www.arqhys.com/rocas.html>- [Consulta 19 de Mayo, 2010]
- Ref. 14 De Jesús, Díaz, García, et al, *La Pizarra*, [online], Dirección URL: <http://www.anmal.uma.es/numero8/docelectr.htm>. [Consulta 19 de Mayo, 2010]
- Ref. 15 Tablas de Marea de la Costa de Chile, 2010, SHOA
- Ref. 16 Curtosis, SPSS Free, <http://www.spssfree.com/spss/analisis3.html>
- Ref. 17 Asimetría, SPSS Free, <http://www.spssfree.com/spss/analisis3.html>
- Ref. 18 Capitulo 2 Criterios Generales de Proyecto, ROM 3.1-99 Proyecto de la Configuración Marítima de Puertos, Canales de Acceso y Áreas de Flotación

- Ref.19 Hr Wallingford - Overtopping [online], Dirección URL: <http://www.overtopping-manual.com/index.html>. [Consulta 28 de Junio, 2011])
- Ref.20 Depósito de Documentos de la FAO, Construcción y Mantenimiento de puertos y desembarcaderos para buques pesqueros [online], Dirección URL: <http://www.fao.org/docrep/003/v5270s/V5270S04.htm>. [Consulta 5 de Octubre, 2011]
- Ref.21 Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa Geológico de Chile, Versión Digital, 2003

8 ANEXOS

8.1 ANEXO I MODELO MIKE 21 BW

8.1.1 ECUACIONES FUNDAMENTALES

El módulo bidimensional de Boussinesq resuelve las ecuaciones implícitas en diferencias finitas cuya técnica es la definición de espacios rectangulares de grilla.

El módulo es capaz de combinar efectos de interés en puertos y disipación de energía en playas. Tales como:

- Shoaling
- Difracción
- Refracción
- Rotura
- Fricción de fondo
- Dinámica costera
- Transmisión y reflexión parcial
- Interacción de olas y oleaje irregular
- Propagación de frecuencias
- Propagación de dirección

Las ecuaciones de Boussinesq expresadas en dos dimensiones en términos de la elevación de la superficie libre η , y las componentes de la velocidad integradas en la vertical, P y Q son:

- Ecuación de Continuidad

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

Ecuación 8-1

- Momentum x

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + ngh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_1 = 0$$

Ecuación 8-2

- Momentum y

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + ngh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[\alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_2 = 0$$

Ecuación 8-3

Donde los términos de dispersión de Boussinesq Ψ_1 y Ψ_2 están definidos de la siguiente manera:

$$\Psi_1 = -\left(B + \frac{1}{3}\right)d^2(P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBgd^3(\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) - dd_x\left(\frac{1}{3}P_{xt} + \frac{1}{6}Q_{yt} + nBgd(2\xi_{xx} + \xi_{yy})\right) - dd_y\left(\frac{1}{6}Q_{xt} + nBgd\xi_{xy}\right)$$

Ecuación 8-4

$$\Psi_2 = -\left(B + \frac{1}{3}\right)d^2(Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBgd^3(\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) - dd_y\left(\frac{1}{3}Q_{yt} + \frac{1}{6}P_{xt} + nBgd(2\xi_{yy} + \xi_{xx})\right) - dd_x\left(\frac{1}{6}P_{yt} + nBgd\xi_{xy}\right)$$

Ecuación 8-5

Los subíndices x, y, t denotan diferenciación parcial con respecto al espacio y tiempo, respectivamente.

Donde:

- P Densidad de flujo en la dirección x, [m³/m/s].
- Q Densidad de flujo en la dirección y, [m³/m/s].
- B Factor de dispersión de Boussinesq.
- x, y Coordenadas cartesianas, [m].
- t tiempo, [s].
- h Profundidad total del agua (d+ ξ), [m].
- d Profundidad respecto del SWL, [m].
- g Aceleración gravitacional (9.81 [m/s²]).
- n Porosidad.
- C Número de Chezy, [m^{0.5}/s].
- α Coeficiente de resistencia para flujo laminar en medio poroso.
- β Coeficiente de resistencia para flujo turbulento en medio poroso.
- ξ Nivel de superficie libre sobre el datum, [m].

Los términos R_{xx} , R_{xy} y R_{yy} toman en cuenta el momentum originado por la no uniformidad en la distribución de velocidad debido a la presencia de la ola y están definidos de la siguiente manera:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d}\right)^2$$

Ecuación 8-6

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_x - \frac{P}{d}\right) \left(c_y - \frac{Q}{d}\right)$$

Ecuación 8-7

$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/d} \left(c_y - \frac{Q}{d} \right)^2$$

Ecuación 8-8

Aquí $\delta = \delta(t, x, y)$ es la amplitud de la ola y c_x y c_y son las componentes de la celeridad de la onda.

8.1.2 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

El método numérico utilizado está basado en el llamado esquema SYSTEM 21, el cual fue desarrollado por Abbott et al (1973). Las ecuaciones diferenciales son espacialmente discretizadas en una malla rectangular. Las cantidades escalares tales como elevación de la superficie libre están definidas en los nodos de la malla, mientras que las componentes del flujo se definen entre los nodos en las direcciones respectivas.

El algoritmo aplicado es uno no iterativo, algoritmo ADI (Alternating Direction Implicit), el cual utiliza una técnica en 'pasos fraccionados'.

Para la modelación de la reflexión parcial que producen las estructuras y taludes, el modelo requiere que se defina un mapa de porosidad, cuyo valor es función, entre otras cosas del coeficiente de reflexión de cada estructura.

8.1.3 PERIODO DE SIMULACIÓN

Este parámetro tiene relación con el tiempo necesario que requiere el programa para generar un estado de mar representativo de la ola propagada este parámetro está entre 25-30 minutos.

Este se obtiene mediante el número de paso y el intervalo en el cual el programa va calculando o generando la propagación. Para ver la estabilidad del modelo se requiere el análisis de Número de Courant, este tiene que ser menor a 1.

8.1.4 NÚMERO DE COURANT

El número de Courant marca el límite superior del intervalo de tiempo interno utilizado por ciertos algoritmos.

En matemáticas, la condición de Courant-Friedrichs-Lewy (condición CFL) es una condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales solucionadas mediante ciertos algoritmos (no confundir con estabilidad numérica). Como consecuencia de esta condición, el paso de tiempo debe ser inferior a un cierto valor sino la simulación producirá resultados incorrectos.

Para garantizar la estabilidad del modelo, se realiza un análisis para esquemas implícitos, a partir de la teoría de las características para soluciones continuas, lleva a la conclusión que dichos esquemas, para ser estables debe cumplir la condición de Courant, que para las ecuaciones unidimensionales es:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|u \pm c|}$$

Ecuación 8-9

Que es lo mismo que:

$$C = \frac{|u \pm c| \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Ecuación 8-10

Donde C es el número de Courant, también llamado número de Courant, Friedrichs y Levy (CFL). La condición de Courant significa que el dominio de dependencia de un punto en un esquema en diferencias explícitas (que está formado por los puntos del espacio que intervienen en el esquema) debe comprender al dominio de dependencia para la ecuación diferencial, ya que precisamente $|u \pm c|$ es la velocidad de propagación de una onda, o velocidad de transmisión de la información, que limita el dominio de dependencia para la solución exacta.

Para el caso bidimensional el mismo análisis de estabilidad (Tan, 1992) concluye que para que un sistema explícito sea estable debe cumplirse (para el caso $dx = dy$ y malla regular):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2} \sqrt{|u^2 + v^2 + c^2|}}$$

Ecuación 8-11

8.2 ANEXO II MODELACIONES STWAVE

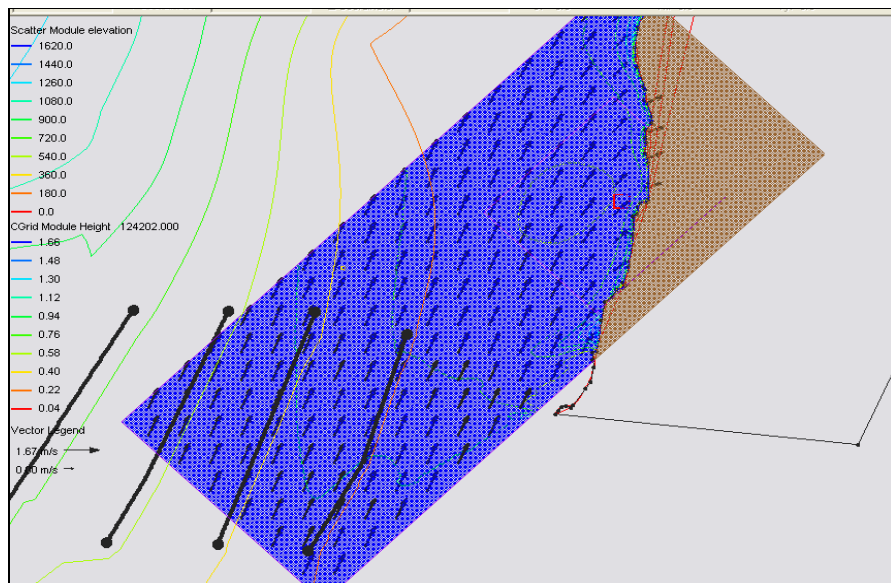
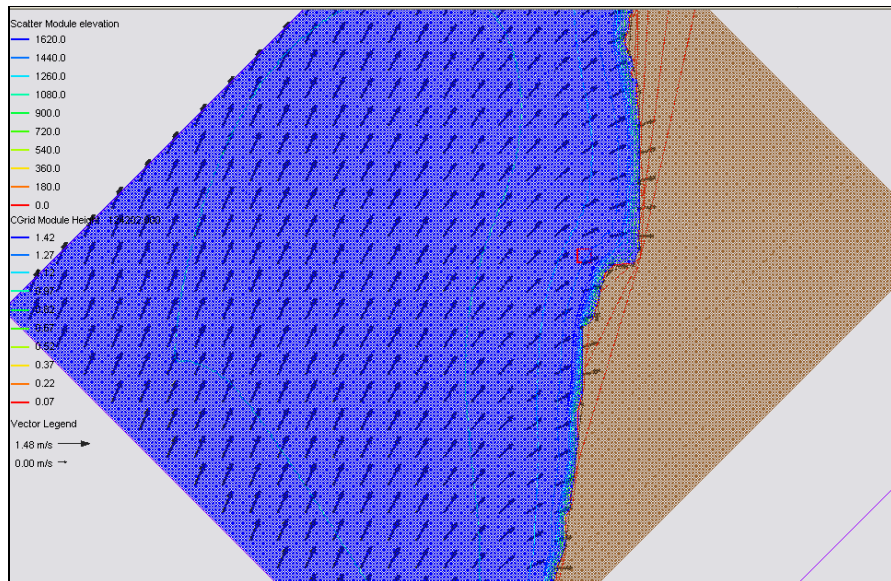


Figura 8-1 Modelación Stwave Dirección 202.5°
(Fuente Elaboración Propia)

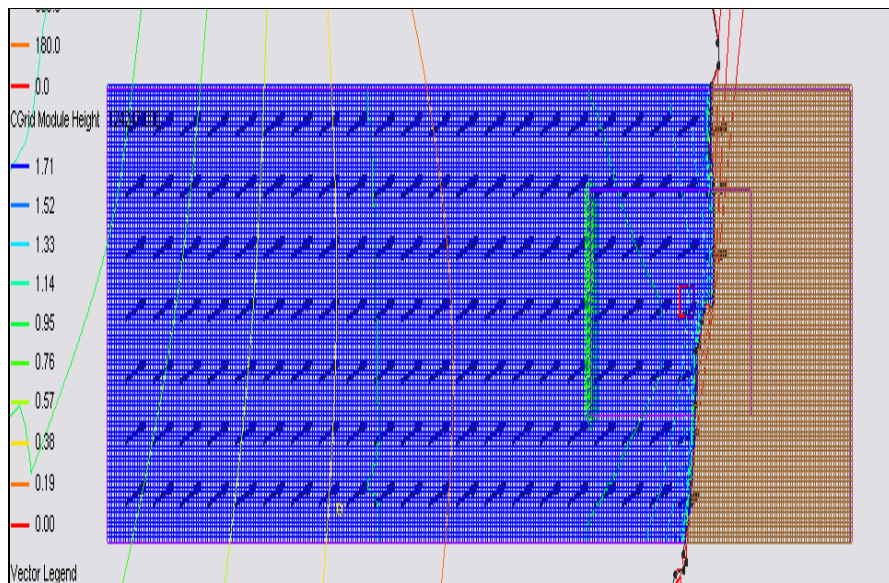
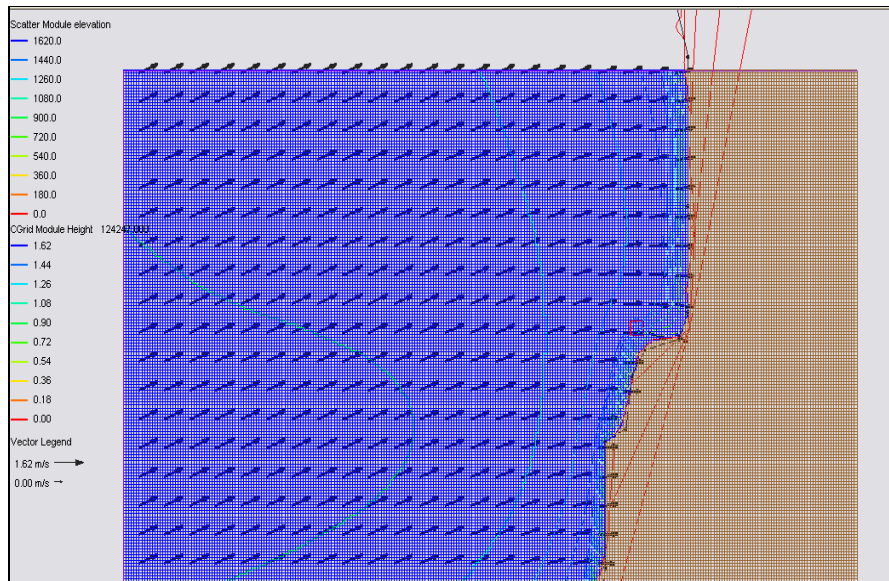


Figura 8-2 Modelación Stwave Dirección 247.5°
(Fuente Elaboración Propia)

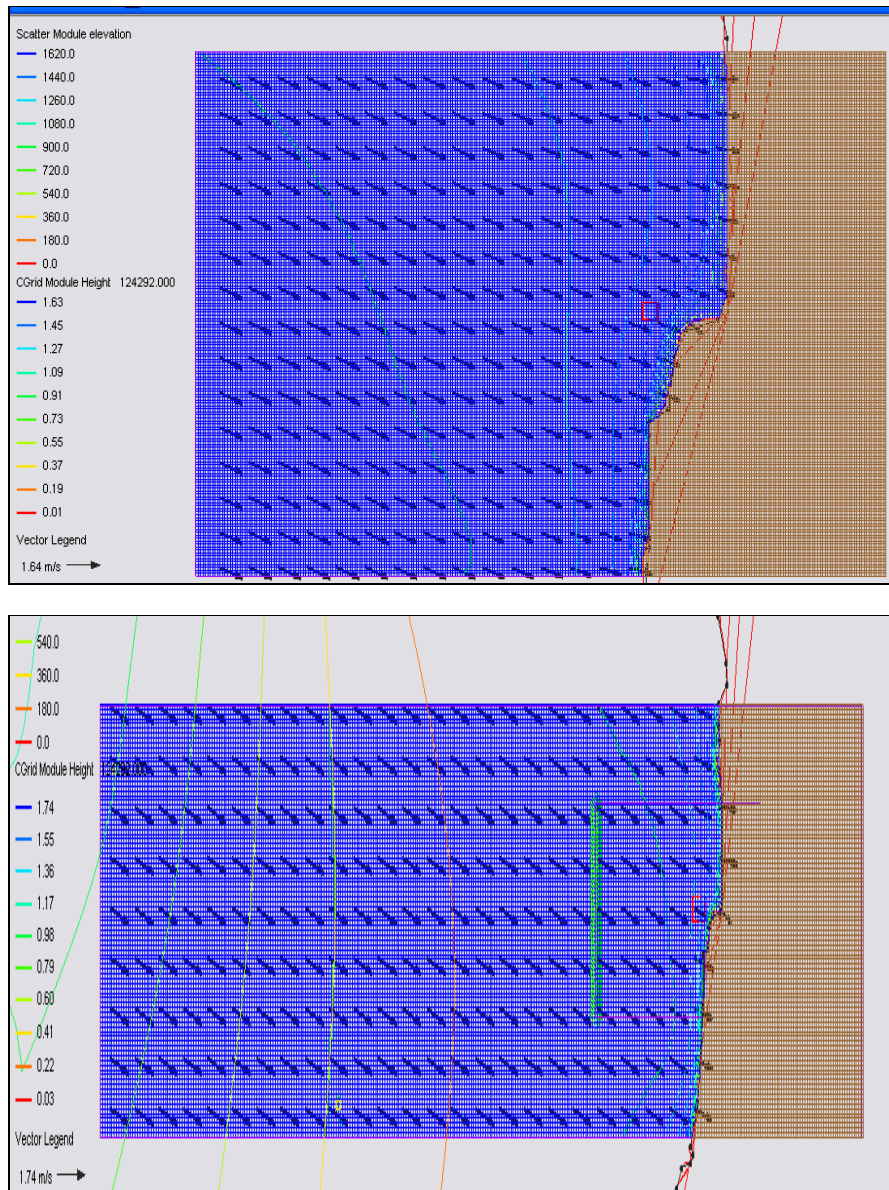


Figura 8-3 Modelación Stwave Dirección 292.5°
(Fuente Elaboración Propia)

DISEÑO DE ESTRUCTURA DE ABRIGO PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DE LA CALETA DE PESCADORES BUCALEMU, VI REGIÓN CHILE

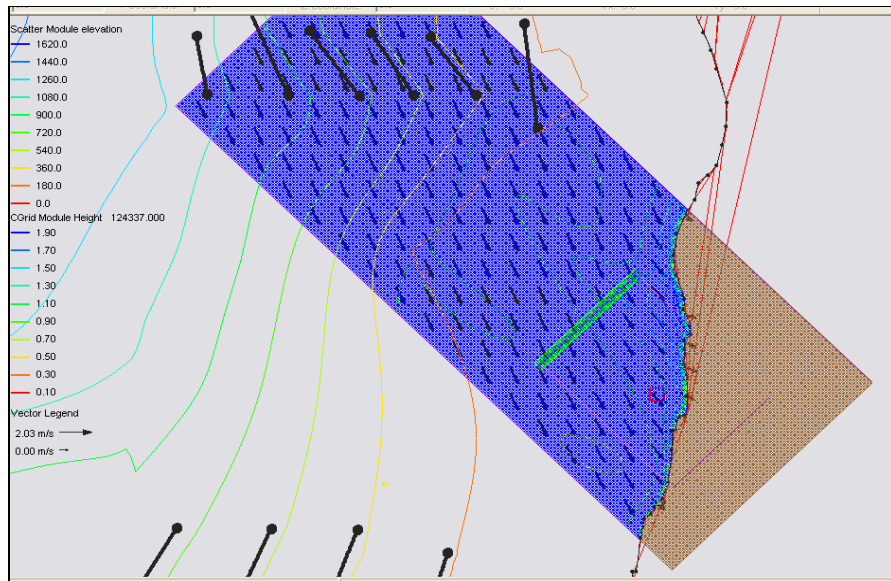
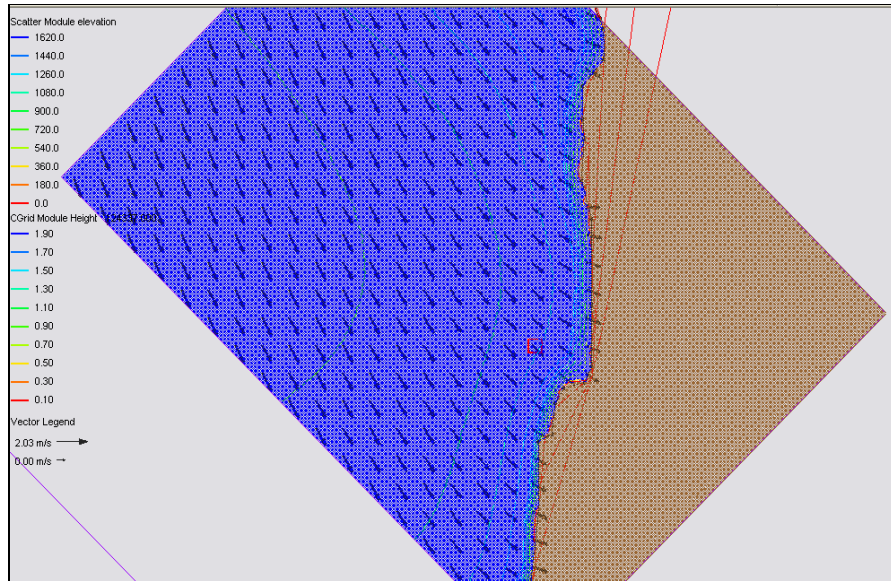


Figura 8-4 Modelación Stwave Dirección 337.5°
(Fuente Elaboración Propia)

8.3 ANEXO III MAPA GEOLÓGICO VI REGIÓN, CHILE

8.4 ANEXO IV RESULTADOS DIQUE VERTICAL

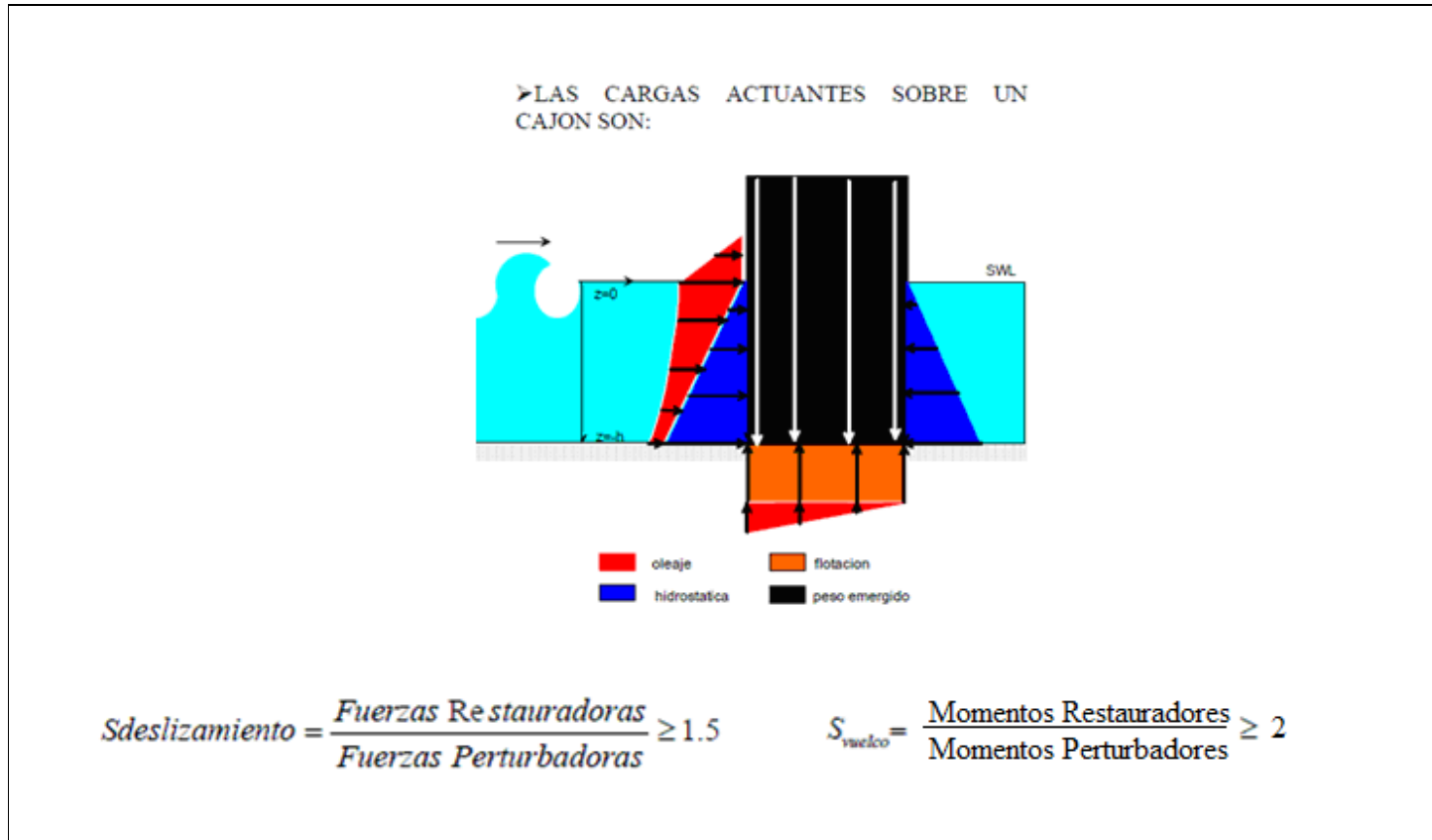


Figura 8-6 Cargas actuantes sobre un cajón
(Fuente Elaboración Propia)

**Tabla 8-1 Cálculos Dique Vertical
(Fuente Elaboración Propia)**

H	4.02			
h	4.52			
L	84.97			
g	9.8			
pw	1025	ancho	10	
pr	2650	alto	12	
ph	2400	alto sumergido	8.54	
δo	1.853732662			
P3	21760.15541			
P2	38225.78207			
P1	47260.73627			
Peso del Cajón	288000			
Flotación	87535			
Presión Hidrostática	45403.4			
Fuerza	Nombre	Brazo	Momento	Tipo
47260.73627	P1	6	283564.4176	V
45403.4	P. Hid	1.506666667	68407.78933	V
45403.4	P. Hid	1.506666667	68407.78933	R
288000	Cajón	5	1440000	R
87535	Flotación	5	437675	R
38225.78207	P2	3.333333333	127419.2736	R
21760.15541	P3	6	130560.9325	R
S Deslizamiento		S Vuelco		
5.2		6.3		