

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO DE CLIMA DE OLAS Y TRANSPORTE LITORAL DE SEDIMENTOS EN PUERTO LOBOS

Junio, 2008

Informe LHA- 274-01-08

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO DE CLIMA DE OLAS Y TRANSPORTE LITORAL DE SEDIMENTOS EN PUERTO LOBOS

RESUMEN

Se presenta una evaluación del clima de olas en el área de Puerto Lobos (Pcia. del Chubut), ubicado sobre el Golfo San Matías. El estudio se ha basado en datos generados por un modelo Global de Olas y en la propagación de los datos hasta el área costera mediante el modelo SWAN. Sobre la base de las características del oleaje en el área costera se realizó una estimación de los volúmenes anuales de material transportado como deriva litoral a lo largo de la costa.

PALABRAS CLAVE

Olas – clima de olas – propagación de olas - modelación matemática – modelo global de olas – Transporte litoral de sedimentos - Golfo San Matías

Informe	LHA-274-01-08
Fecha	Junio, 2008
PROYECTO	655
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Infraestructura

**INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA**

DIRECTOR

Ing. J.C. De Lio

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. Castellano

Informe producido por

Ing. R. Castellano

Equipo de trabajo

*Ing. R. Cáceres
Ing. N. Tomazin
Sr. C.A. Haspert
Sr. L.S. Peralta*

Esteban Lacunza

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	METODOLOGIA.....	4
4	DESCRIPCION GENERAL DEL AREA.....	5
5	DATOS DE BASE	7
5.1	Planos de Referencia	7
5.2	Batimetría	8
5.3	Nivel del Mar.....	8
5.4	Olas y Vientos	8
6	EVALUACION DEL CLIMA DE OLAS COSTA AFUERA	10
6.1	Vientos.....	11
6.2	Olas resultantes.....	13
6.3	Olas locales.....	18
6.4	Olas Oceánicas	24
6.5	Régimen estacional Costa Afuera.....	29
7	EVALUACION DE OLAS EN EL AREA COSTERA.....	32
7.1	Implementación del modelo	33
7.2	Aplicación.....	34
7.3	Resultados.....	35
7.3.1	Olas locales (wind sea).....	35
7.3.2	Olas Oceánicas (swell)	38
7.4	Régimen estacional en el área costera.....	40
8	ESTADÍSTICA DE VALORES EXTREMOS	42
8.1	Metodología de ajuste.....	42
8.2	Olas Costa Afuera.....	45
8.3	Olas extremas en el área costera.....	50
8.4	Consideraciones sobre la ola de diseño	55
9	TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL	57
9.1	Método de cálculo del transporte sólido longitudinal (QL)	57
9.2	Aplicación en Puerto Lobos	59
9.2.1	Orientación de la playa.....	59
9.2.2	Características del perfil de la playa.....	60
9.2.3	Clima de olas	65
9.3	Modelo de Soulsby	65
9.4	Aplicación de la fórmula del CERC a Puerto Lobos.....	67
9.5	Comparación de los resultados de las fórmulas de Soulsby y el CERC.....	69
9.6	Influencia del nivel del mar en el cálculo del transporte.....	70
9.6.1	Cálculo del transporte litoral con marea.....	71
9.6.2	Resultados y conclusiones	73
10	CONCLUSIONES.....	75

Anexo I - Relevamiento de detalle

Anexo II – Modelos Globales de Oleaje

Anexo III – ARGOSS – Modelo de predicción de oleaje

Anexo IV - Características del modelo SWAN

Anexo V – Tablas de Oleaje para cálculo de transporte litoral de sedimentos

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO DE CLIMA DE OLAS Y TRANSPORTE LITORAL DE SEDIMENTOS EN PUERTO LOBOS

Junio, 2008

1 INTRODUCCION

La Dirección General de Infraestructura Portuaria (**D.G.I.P.**) de la Provincia del Chubut ha encomendado al Instituto Nacional del Agua (**INA**) la evaluación de las características del oleaje y del transporte litoral de sedimentos en un tramo costero en el entorno de Puerto Lobos, ubicada sobre el Golfo San Matías.

Los estudios están dirigidos a generar información de base para el desarrollo de un emprendimiento portuario en el área.

Las tareas se han desarrollado mediante la suscripción del Acta Complementaria N ° 7 al Convenio Marco de Cooperación e Investigación suscripto con fecha 8 de Agosto de 2002, cuya vigencia ha sido renovada por cinco años el 9 de agosto de 2007.

Los objetivos y metodología para el desarrollo del trabajo se detallan en los **Capítulos 2 y 3** respectivamente.

En el **Capítulo 4** se presente una breve descripción del área desde el punto de vista de las características oceanográficas que resultan de interés para este estudio.

En el **Capítulo 5** se muestra la información de base utilizada.

En el **Capítulo 6** se describe la metodología y resultados del análisis de los datos de olas en la posición costa afuera de Puerto Lobos, incluyendo la caracterización de olas y vientos.

En el **Capítulo 7** se detalla la implementación del modelo numérico y la metodología aplicada para la transformación de los datos de olas a una posición costera próxima a Puerto Lobos y la caracterización del clima de olas resultante en esa posición.

En el **Capítulo 8** se presenta un análisis de condiciones extremas probables evaluadas a partir de la serie de datos disponibles. El análisis se realizó tanto para la posición costa afuera como para una posición costera próxima al área portuaria.

Sobre la base de las características del oleaje que alcanza la costa, en el **Capítulo 9** se ha realizado una estimación de los volúmenes anuales transportados por acción del oleaje a lo largo de la franja costera

2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente estudio fueron **a)** la determinación del régimen de olas en la costa marítima de Puerto Lobos, Provincia de Chubut. **b)** La caracterización del transporte de sedimentos en el área costera próxima al sitio de emplazamiento del puerto.

3 METODOLOGIA

El estudio se llevó a cabo mediante técnicas de simulación numérica según la metodología descrita en el Anexo I a los Términos de Referencia del Acta Complementaria 7. El estudio consistió en la determinación del clima de olas en el sitio de emplazamiento de futuras obras portuarias, incluyendo valores frecuentes y extremos, con vistas a la caracterización del proyecto de las obras.

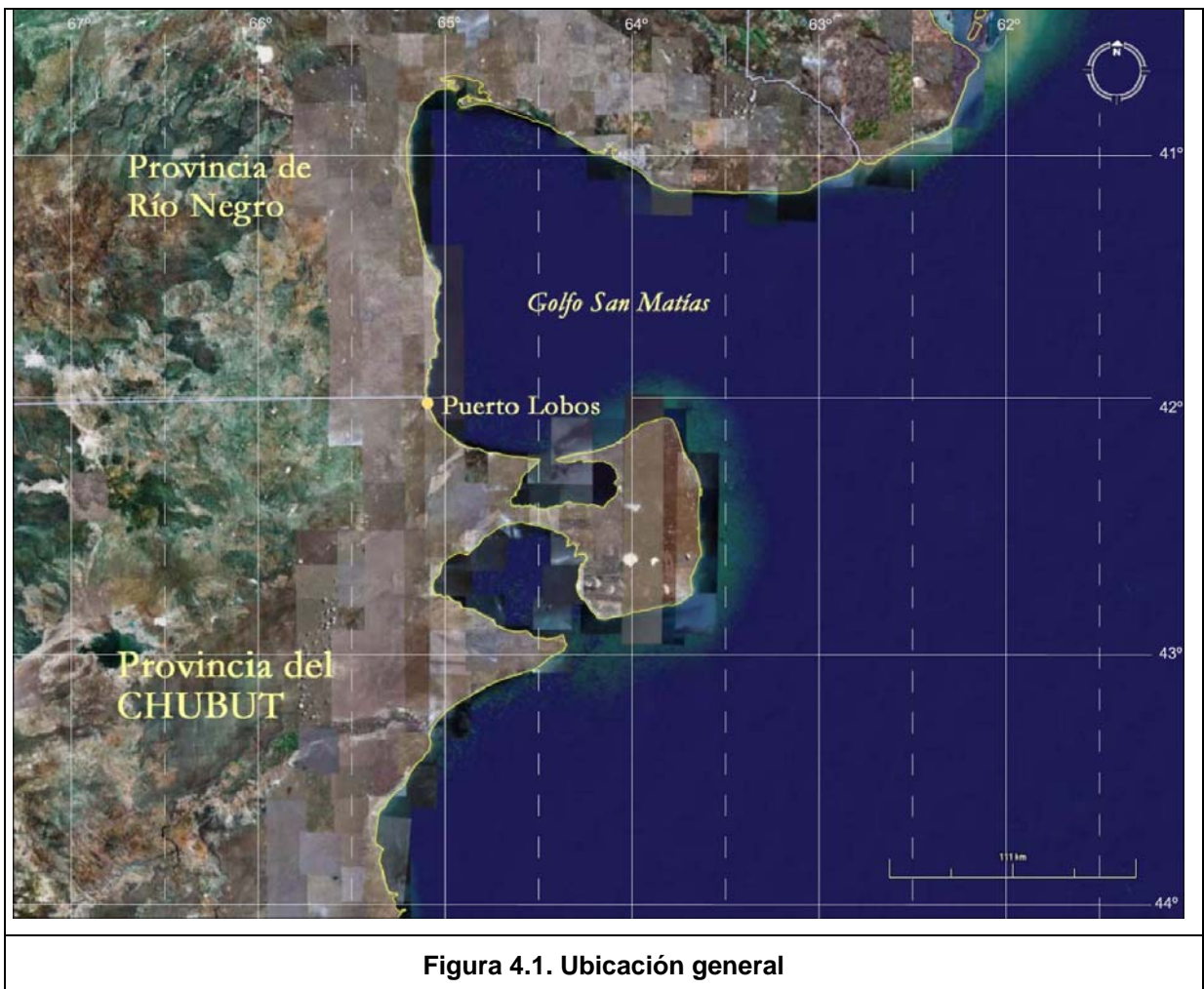
También se evaluaron y aplicaron fórmulas de cálculo para la evaluación del transporte de sedimentos en el área costera.

En líneas generales, se mencionan las diferentes etapas que conforman la metodología aplicada en este Informe:

- Búsqueda y análisis de la información de base.
- Evaluación del clima de olas en aguas profundas.
- Definición de condiciones oceanográficas medias y extremas.
- Definición de escenarios para las simulaciones numéricas.
- Aplicación del modelo numérico para la modelación de la propagación del oleaje hasta el área costera.
- Determinación del clima de olas en el entorno del emplazamiento del puerto.
- Análisis de fórmulas de transporte de sedimentos. Aplicación.

4 DESCRIPCION GENERAL DEL AREA

Puerto Lobos se encuentra en las coordenadas 42° de latitud S y 65° 03' de longitud W, sobre la costa oeste del Golfo San Matías. El Golfo tiene una geometría regular de forma aproximadamente trapezoidal **Figura 4.1)** con una dimensión de unos 100Km de E a W, y una extensión variable de 100 Km en la dirección N-S en su borde oceánico, que se amplía hasta 140 Km de desarrollo en



dirección N-S en el tramo costero. Las profundidades son del orden de los 50 m en el límite oceánico, y se incrementan notablemente en su interior, hasta alcanzar los 150 a 200 m. Particularmente en Puerto Lobos, la isobata de 30 m de profundidad se halla a unos 2500 m de la costa y la de 10 m a 500m.

El área costera en el entorno de Puerto Lobos se caracteriza por orientación general Sur-Norte, la presencia de algunos afloramientos rocosos (restingas) que enmarcan playas aisladas, y extensas playas de gravas y arenas (**Figura 4.2**) particularmente hacia el Sur del paralelo 42°.

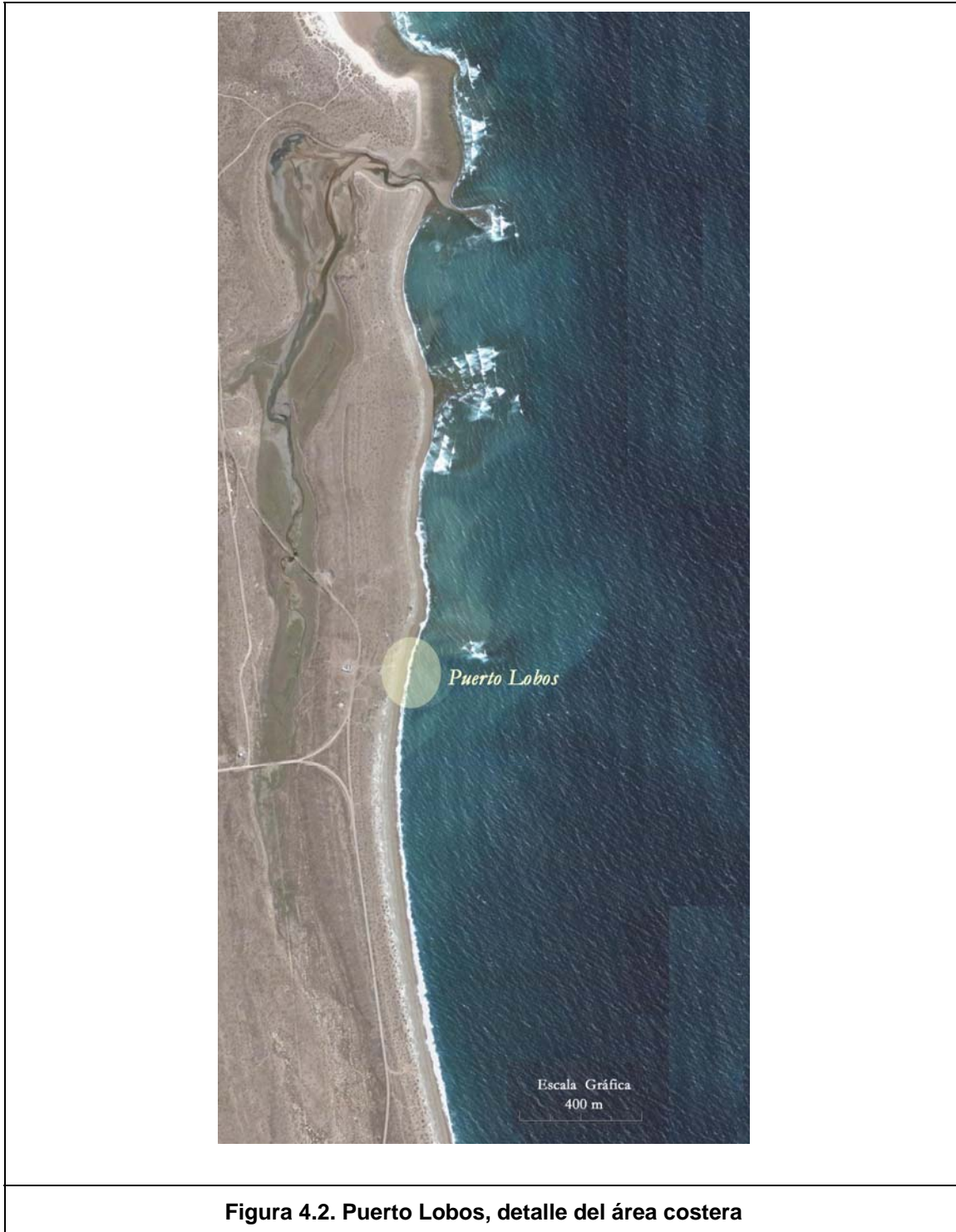


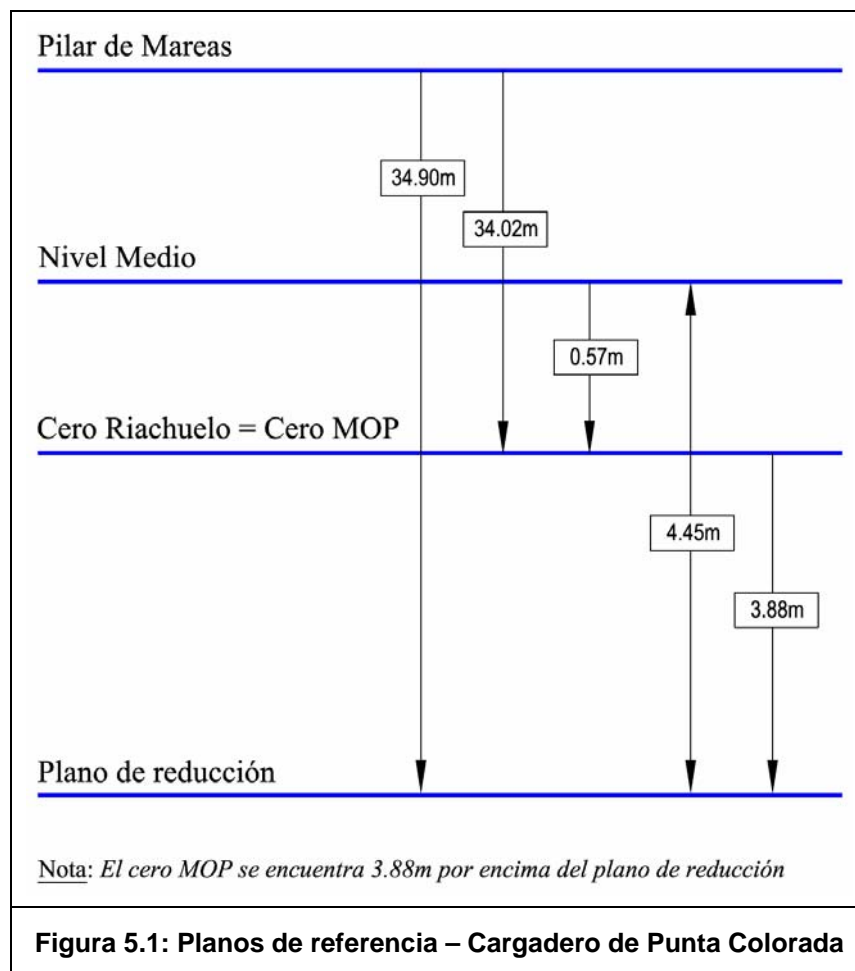
Figura 4.2. Puerto Lobos, detalle del área costera

5 DATOS DE BASE

Para la realización de este estudio se ha dispuesto de la información de base que se describe a continuación:

5.1 Planos de Referencia

La **Figura 5.1.** muestra la relación entre el plano de referencia hidrográfico al que se refieren las Cartas Náuticas y los pronósticos de marea, y el plano de referencia MOP utilizado como plano de referencia terrestre.



5.2 Batimetría

La información batimétrica en el área, necesaria para la realización de las simulaciones numéricas de propagación de oleaje, fue obtenida de cartografía publicada por servicios especializados:

- Carta N° 214 SHN (Servicio de Hidrografía Naval). De Faro Segunda Barranca a Faro Punta Bajos (GOLFO SAN MATIAS). Escala 1:275.000
- Carta N° 217 Costa Sur del Golfo San Matías y Golfo San José. Escala 1:110.000
- Relevamiento de detalle

El relevamiento de detalle fue realizado en abril de 2007 y complementado en diciembre del mismo año (Ver **Anexo I**).

5.3 Nivel del Mar

El régimen de mareas es semidiurno, con un nivel medio de 4,45 m. La siguiente **Tabla 5.1** muestra la marea astronómica en el Cargadero de Punta Colorada¹ (41° 42'S; 65° 00'W).

Tabla 5.1. Marea astronómica					
Nivel medio = 4.45m					
pleamar		Bajamar		Amplitud	
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
8.87	7.32	-0.01	1.6	8.74	5.72
Régimen de marea: <i>Semidiurno</i>					

5.4 Olas y Vientos

Los datos de base utilizada en este estudio corresponden a aguas intermedias y son generados por un modelo matemático de oleaje global explotado por la empresa ARGOSⁱ (*Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services*) de Holanda. El modelo utiliza a su vez como datos de entrada variables producidas por un Modelo Climático

¹ SHN, TABLA DE MAREAS

Global. Los valores calculados son calibrados a partir de distintas fuentes de información, entre las que se cuenta datos obtenidos de observaciones satelitales, lo cual constituye un aporte significativo para mejorar la confiabilidad de los datos. En los **Anexos II y III** se dan detalles de las técnicas de generación de la información utilizada.

Las variables provistas en los registros, con un espaciamiento temporal de 3 horas, son las siguientes:

- Intensidad y dirección del viento (a 10 m de altura)
- Altura de ola (H_s), períodos $T_z=T_{0,2}$, T_{01} , $T_m=T_{-1,0}$ período de pico T_p y dirección de propagación para el espectro total resultante.
- Altura de ola (H_s), períodos y dirección de propagación para el espectro de olas generadas localmente por vientos.
- Altura de ola (H_s), periodo medio ($T_{0,2}$) y dirección de propagación de olas oceánicas ó *swell* (olas que se propagan fuera de su área de generación).

El período de pico es el correspondiente a la máxima densidad de energía del espectro resultante. El período de cruce de ceros $T_z=T_{0,2}$ es el determinado a partir de los momentos de orden 0 y 2 del espectro, es decir:

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad [5.1]$$

Los momentos de orden n se definen a partir del espectro de densidad de energía S:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad [5.2]$$

Entre el 1/1/92 y el 31/12/06 (15 años) se dispuso en total de 43832 valores de las variables.

6 EVALUACION DEL CLIMA DE OLAS COSTA AFUERA

En este Capítulo se desarrolla un análisis orientado a describir las características del clima de olas y vientos a partir de los datos disponibles en la posición correspondiente al nodo de grilla del modelo Global, ubicado a 210 Km al E de Puerto Lobos. El resultado de este análisis constituye la base de la información necesaria para el estudio de propagación de las olas hacia una posición costera y la caracterización del clima de olas en esa ubicación.

ARGOSS ha provisto de 8 conjuntos de resultados diarios del modelo global con intervalos de 3 horas para el período comprendido entre 1992 y 2006, Las variables de la serie permiten caracterizar el espectro total de energía del mar resultante y, por separado, el espectro de las olas generadas localmente por viento (*wind sea*), y el de olas oceánicas (*swell*), entendiéndose como tales aquellas olas que se propagan fuera del área de influencia del viento que las ha generado.

La información disponible fue procesada con el propósito de poder describir sintéticamente las características del oleaje generado por el Modelo Global, evaluando en primer lugar la distribución frecuencial de las variables características (dirección de propagación, altura significativa y períodos).

En el apartado **6.1** se presenta en primera instancia el análisis de la intensidad y dirección del viento determinado a 10 m de altura en la misma ubicación geográfica.

A continuación se desarrolla el análisis de los datos de olas totales o resultantes (apartado **6.2**). En **6.3**. se evalúan las características de las olas generadas por vientos locales y en **6.4**. las olas oceánicas (*swell*); como se ha indicado, todo este análisis corresponde a la ubicación costa afuera.

El procesamiento de la información permitió obtener las distribuciones de frecuencia para la dirección de propagación, la altura significativa y el período en los registros de olas en la posición indicada. La presentación de los resultados se efectúa por medio de tablas, histogramas y gráficos polares (rosas).

Finalmente en el apartado 6.5. se evalúa la variabilidad estacional de la altura de ola media y máxima.

Si bien se analiza el registro completo de la información disponible, cabe destacar que dada la ubicación del nodo de cálculo del Modelo Global para el estudio de la propagación de olas hacia la costa interesan particularmente las direcciones incluidas en los cuadrantes NE y SE. El resto de las direcciones no tienen influencia sobre Puerto Lobos, dadas las características geográficas de la costa.

6.1 Vientos

Los vientos en superficie (a 10 m de altura) son caracterizados por intensidad media y dirección, con un dato cada 3 horas. La **Tabla 6.1.** muestra los valores clasificados en intervalos de intensidad de 2,5 m/s para una rosa de 16 direcciones. Las frecuencias indicadas son por mil.

Tabla 6.1– Golfo San Matías –Viento de superficie. Frecuencia de casos por dirección e intensidad

Frecuencia en ‰

W (m/s)	Dirección																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 2.5	5.4	4.5	4.6	4.3	4.3	4.2	3.8	4.5	5.6	5.9	5.6	6.2	6.0	5.8	5.7	5.4	81.9
2.5 - 5	14.1	13.1	12.3	9.7	8.7	7.7	8.1	8.8	11.1	12.3	14.1	16.5	17.1	15.4	15.1	14.7	198.6
5 - 7.5	23.2	20.7	15.5	9.7	7.5	7.0	7.3	9.3	12.8	16.1	18.8	22.4	22.9	22.8	22.9	24.1	262.9
7.5 - 10	27.1	24.9	12.2	6.0	3.2	3.0	3.4	5.9	9.5	14.8	19.6	20.7	17.6	17.7	22.3	26.9	234.9
10 - 12.5	18.3	15.3	5.2	2.1	1.0	1.3	1.7	2.9	5.8	10.7	13.2	13.7	10.0	11.1	14.0	19.0	145.3
12.5 - 15	5.5	3.5	1.3	0.5	0.4	0.3	0.8	1.0	2.6	5.2	6.5	5.9	3.4	3.9	5.2	5.7	51.6
15 - 17.5	0.6	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4	0.8	1.6	2.6	2.1	0.9	0.6	0.9	0.9	12.4
17.5 - 20	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.5	0.5	0.4	0.3	0.0	0.1	0.0	2.3
20 - 22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
22.5 - 25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
25 - 27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27.5 - 30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	94.4	82.5	51.1	32.3	25.3	23.7	25.2	32.8	48.3	67.3	81.2	88.0	78.2	77.4	86.3	96.8	990.6
	Calma																9.4
	Total																1000

La **Tabla 6.1** muestra que los sectores en los que el viento tiene componentes hacia el área costera (desde NNE hasta SSE inclusive) acumulan un 27% del total de casos registrados. Los vientos más frecuentes son del NNW, N y del WSW. Menos del 1% de los datos corresponden a la condición de “calma”. Se observa además, que los valores de intensidades máximas corresponden al cuadrante SW, seguidas de los sectores SE, ESE y también N y NNE. El evento máximo fue del sector W y presentó una intensidad en el rango de 25-27,5 Km/h, es decir 90 a 100 Km/h.

La **Figura 6.1** permite ampliar el panorama de esta descripción presentando en forma gráfica las distribuciones frecuenciales por intensidad y dirección del viento.

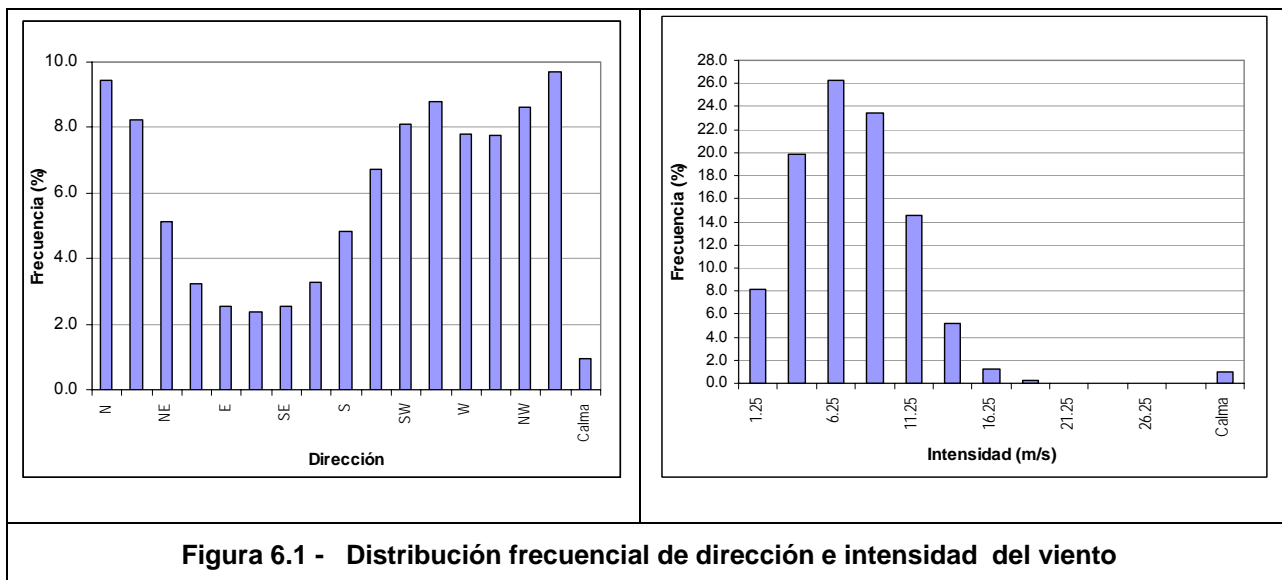
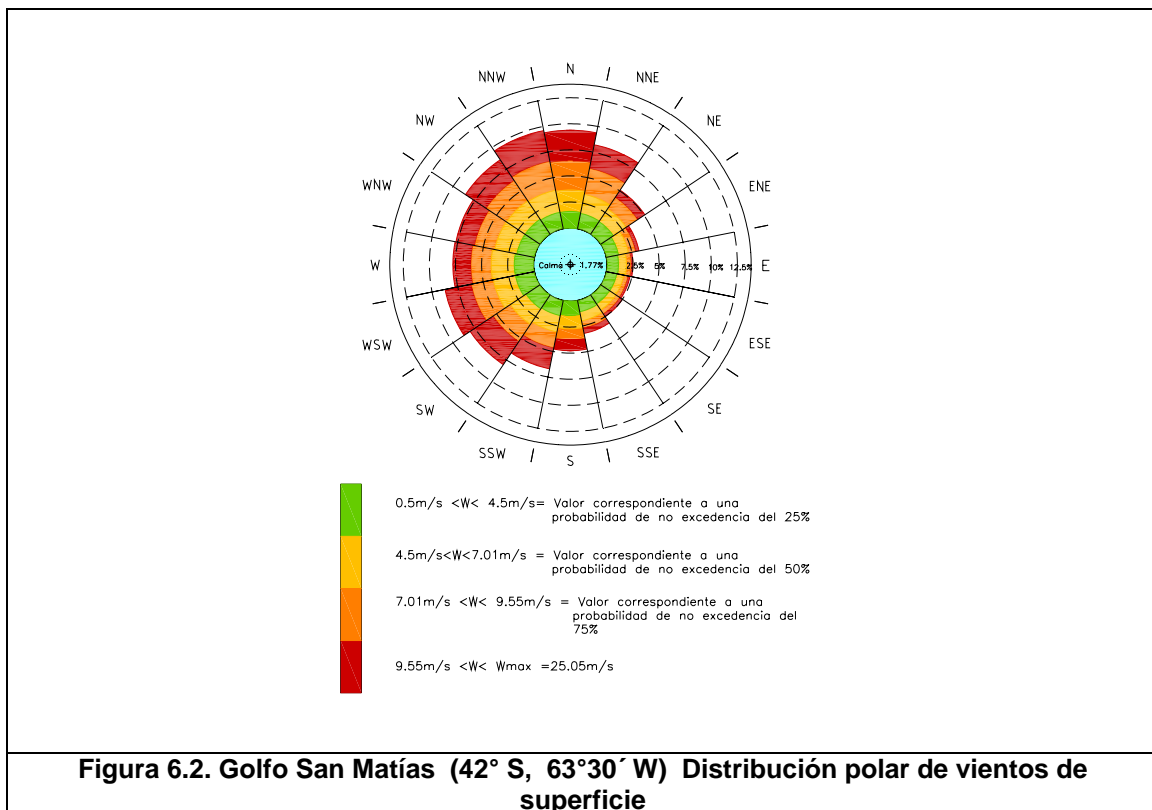


Figura 6.1 - Distribución frecuencial de dirección e intensidad del viento

La distribución polar de vientos de superficie se muestra en la **Figura 6.2**. Los vientos se han clasificado en rosa de 16 direcciones, y en cuatro intervalos de intensidad, cada uno conteniendo el 25% del total de datos (cuartiles).



6.2 Olas resultantes

Las olas en el área son el resultado de la superposición de olas generadas localmente por el viento (*wind sea*), y olas que llegan a la región después de haberse propagado fuera de su área de generación (olas oceánicas o *swell*).

De la información analizada surge que en el área estudiada, el 46.6% de los datos se componen de la superposición de olas oceánicas y locales. El 22,3% de datos está constituido sólo por olas locales y el 31.1% sólo por olas oceánicas (*swell*). Esto implica que el 77,7% de los datos contiene olas oceánicas y que el 68,9% incluyen olas locales generadas por viento,

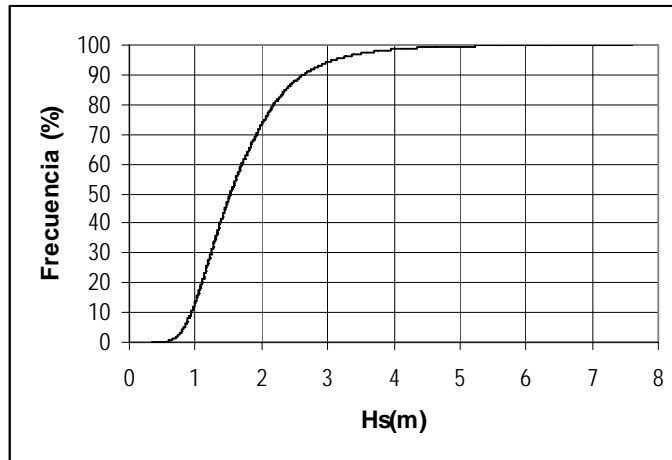


Figura 6.3 – Golfo San Matías (42°S 63°30´W)- Distribución acumulativa de altura de ola resultante

El valor máximo fue de 7,6 m. La altura promedio de todos los datos es 1,69 m. La **Figura 6.3.** muestra la distribución frecuencial acumulativa correspondiente, e indica que sólo el 10% de las olas superan los 2,6 m de altura significativa.

Si la totalidad de las olas determinadas en 15 años se clasifican en cuatro intervalos conteniendo cada uno el 25% del total de datos (cuartiles), puede decirse que el 75% de las olas son menores que 2,0 m, el 50% menor que 1,5 m y el 25 % menor que 1,1 m.

La **Figura 6.4.** muestra la distribución direccional de procedencia del oleaje (olas totales), destacándose el predominio de las olas del S. Las olas del sector W presentan en esta posición costa afuera una persistencia destacada, acorde con los vientos dominantes en la región.

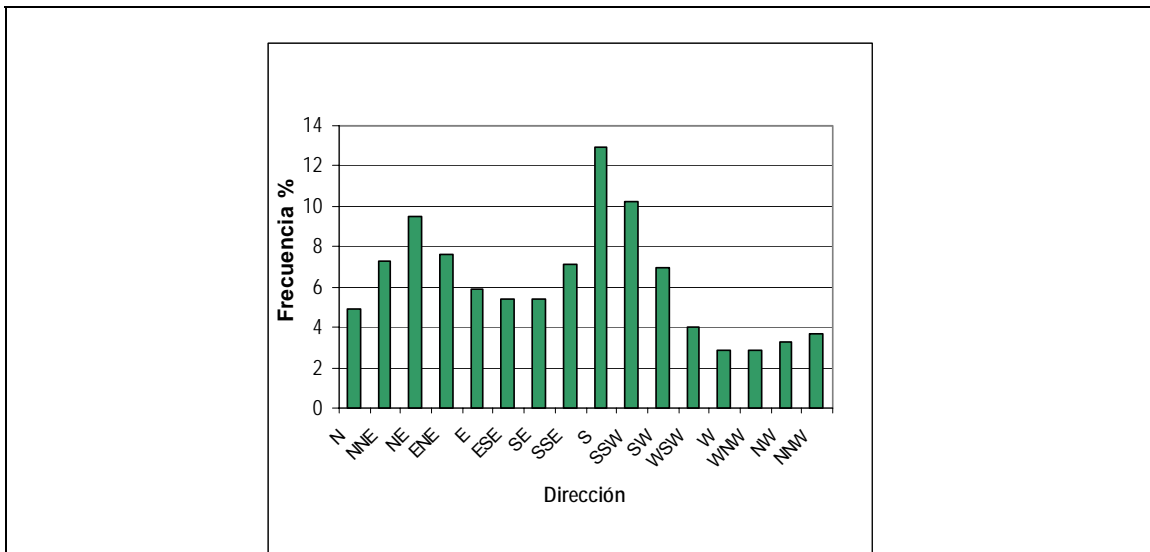


Figura 6.4. Golfo San Matías - Olas totales. Distribución por dirección de procedencia (42°S 63° 30' W)

La **Figura 6.5.** muestra la distribución de alturas de ola significativa (olas totales), clasificada en intervalos de clase de 0,50 m. Las olas más frecuentes corresponden al intervalo 1.0 a 1,5 m.

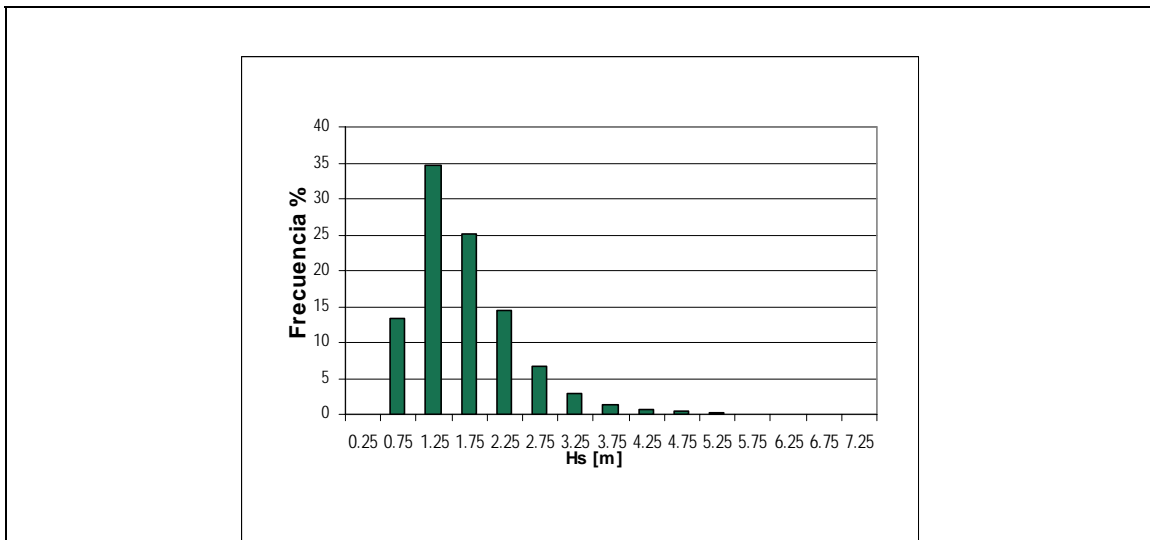


Figura 6.5. Golfo San Matías - Olas totales. Distribución por altura de ola (42°S 63° 30' W)

La **Figura 6.6.** muestra la distribución del período medio de las olas totales clasificados en intervalos de clase de 2 segundos, pudiendo notarse que los períodos medios más frecuentes están comprendidos entre 4 y 6 s.

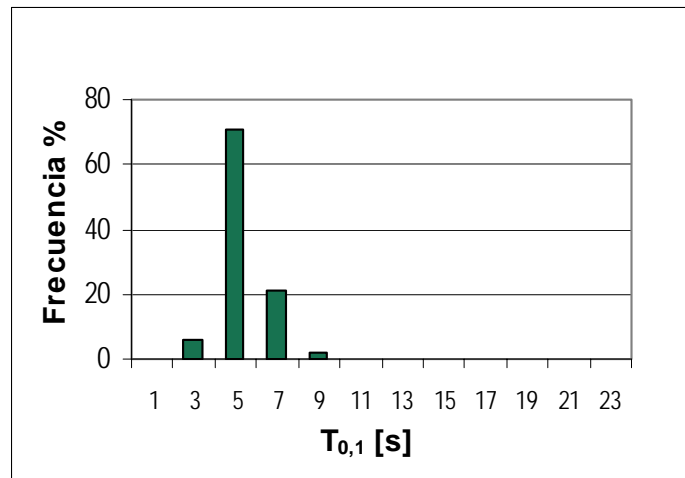


Figura 6.6. Golfo San Matías - Olas Totales. Distribución por periodo (42°S 63° 30´ W)

En cuanto a la distribución combinada de altura y período de oleaje (olas totales), la **Tabla 6.2.** muestra que las olas de altura más frecuente (1,0 a 1,5 m) se vinculan a períodos medios de 4 a 6 s, pero que las olas de temporal, con olas de 7 a 8 m se asocian a períodos medios de 8 a 10 s.

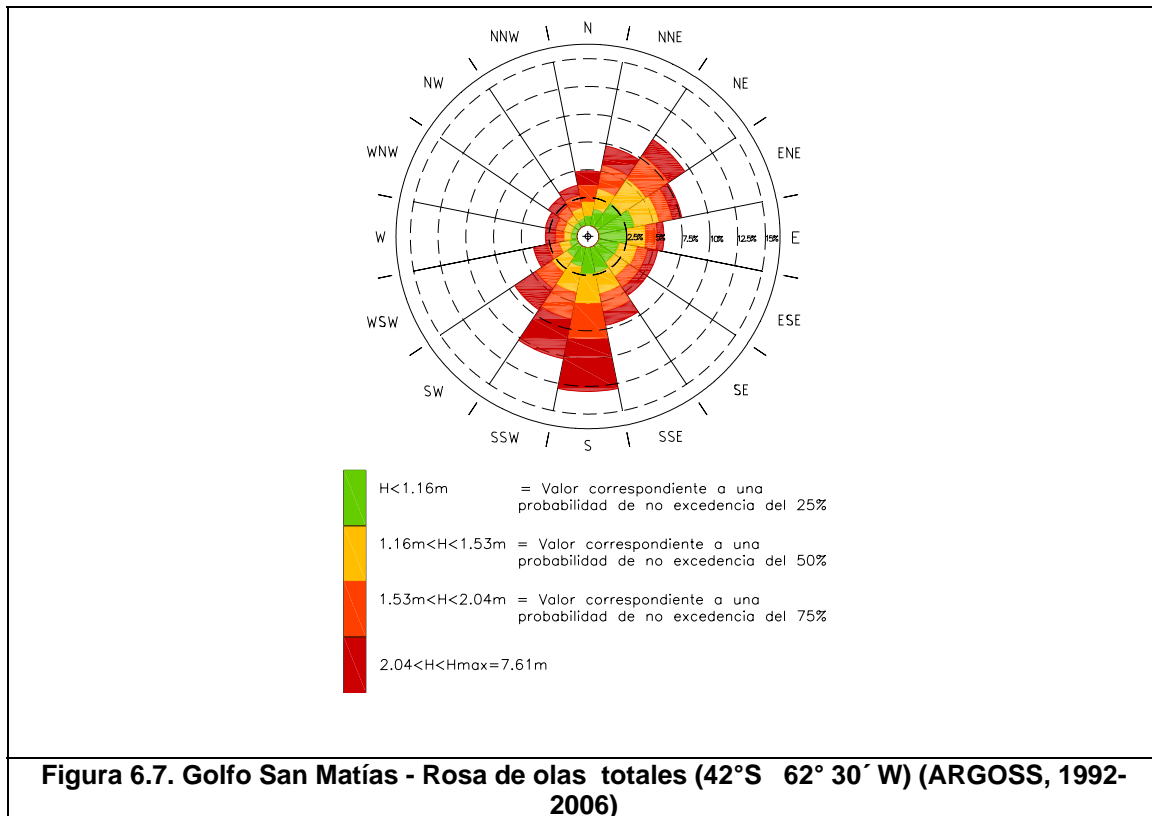
Tabla 6.2. Golfo San Matías - Olas totales. Distribución por altura y periodo

Hs(m)	T01															TOTAL	
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30		30-
0 - 0.5	0	1	7	13	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
0.5 - 1	0	1298	3651	822	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5812
1 - 1.5	0	1345	11841	1895	139	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15225
1.5 - 2	0	6	9021	1832	130	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10994
2 - 2.5	0	0	4769	1431	156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6356
2.5 - 3	0	0	1530	1235	117	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2882
3 - 3.5	0	0	171	1039	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1293
3.5 - 4	0	0	7	526	61	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	598
4 - 4.5	0	0	0	263	47	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	311
4.5 - 5	0	0	0	114	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	166
5 - 5.5	0	0	0	31	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
5.5 - 6	0	0	0	4	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46
6 - 6.5	0	0	0	3	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39
6.5 - 7	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
7 - 7.5	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
7.5 - 8	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
8 - 8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0	2650	30997	9208	961	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43832

La **Tabla 6.3** presenta información direccional detallada, y permite establecer que las olas extremas en el período analizado proceden de los sectores S y SSW.

Tabla 6.3 Golfo San Matías - Distribución Direccional de Olas Totales																	
Hs	Direccion															TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
0 - 0.5	0	0	2	0	5	5	7	0	3	0	0	0	0	1	0	0	23
0.5 - 1	173	318	567	808	671	472	462	576	572	381	266	155	102	83	94	112	5812
1 - 1.5	709	1068	1621	1548	1117	1006	929	1209	1526	1291	919	519	379	405	428	551	15225
1.5 - 2	676	968	1141	574	487	459	530	761	1418	1121	771	470	329	341	437	511	10994
2 - 2.5	398	597	562	283	176	217	230	330	937	644	530	332	248	264	292	316	6356
2.5 - 3	141	192	204	97	55	118	116	155	547	392	258	133	117	135	128	94	2882
3 - 3.5	42	52	55	19	26	43	51	65	304	261	148	71	44	35	54	23	1293
3.5 - 4	7	2	13	15	15	27	23	24	162	167	68	35	14	6	11	9	598
4 - 4.5	1	2	1	0	14	10	2	9	104	97	35	27	5	1	2	1	311
4.5 - 5	0	0	0	0	3	6	7	2	56	61	24	6	1	0	0	0	166
5 - 5.5	0	0	0	0	0	2	3	0	21	24	15	3	2	0	0	0	70
5.5 - 6	0	0	0	0	0	1	2	4	16	19	3	0	1	0	0	0	46
6 - 6.5	0	0	0	0	1	1	2	3	8	20	4	0	0	0	0	0	39
6.5 - 7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0	7
7 - 7.5	0	0	0	0	0	3	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	7
7.5 - 8	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3
8 - 8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5 - 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	2147	3199	4166	3344	2570	2372	2364	3138	5678	4483	3042	1753	1242	1271	1446	1617	43832

Finalmente la **Figura 6.7** muestra el gráfico polar correspondiente a las olas totales, constituyendo un resumen de la información presentada. Las alturas han sido clasificadas en cuatro intervalos de clase cada uno conteniendo el 25% de los datos (cuartiles) que se indican en la misma figura. Las direcciones de procedencia del oleaje se han clasificado en 16 sectores de 22,5° cada uno.



6.3 Olas locales

Las olas locales son aquellas generadas por vientos que soplan en la región considerada. En la posición costa afuera analizada (42°S, 62° 30'W) el 68,9% de los datos incluyen olas de viento.

En las **Figuras 6.8 a 6.12** se presentan las tablas y gráficos que resumen el resultado del procesamiento de la información contenida en el registro de olas generadas por vientos locales. Los porcentajes se refieren al total de olas de viento (30196 datos).

Sólo el 10% de las olas generadas localmente por viento superan los 2,73 m. (**Figura 6.8**) Debe destacarse que el registro indica la presencia de eventos con alturas superiores a 7.5 m (tres casos en 15 años). Es decir que los temporales locales son los responsables de las condiciones más severas en el área. El 50% de las olas son menores que 1,46 m, y sólo el 25% inferiores a 1 m.

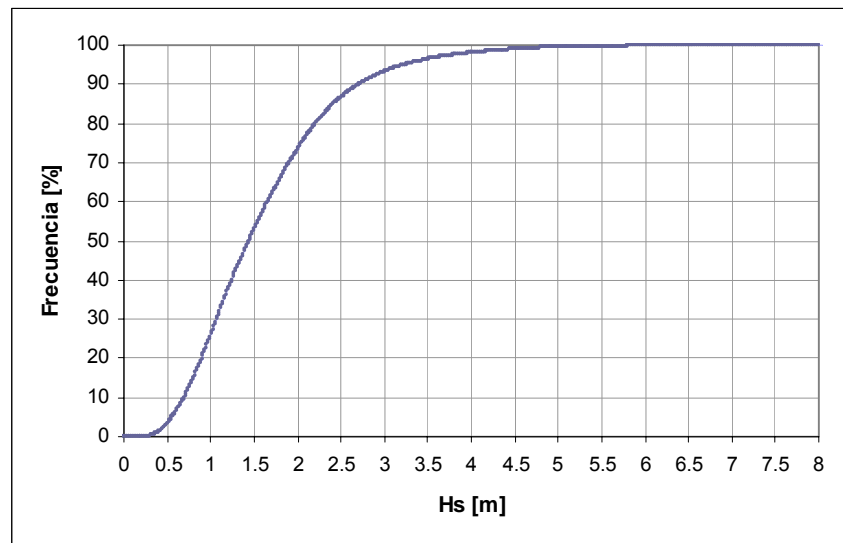


Figura 6.8. Golfo San Matías - Distribución acumulativa de altura de olas locales

En el análisis de la distribución de alturas significativas, los porcentajes se refieren al total de datos del tipo de oleaje analizado. Debe recordarse que del total de 43832 datos disponibles, el 68,9% contiene olas generadas por viento. La **Figura 6.9** señala que las olas generadas por vientos locales más frecuentes presentan valores de altura significativa H_s comprendidos entre 1 y 2 m (48%).

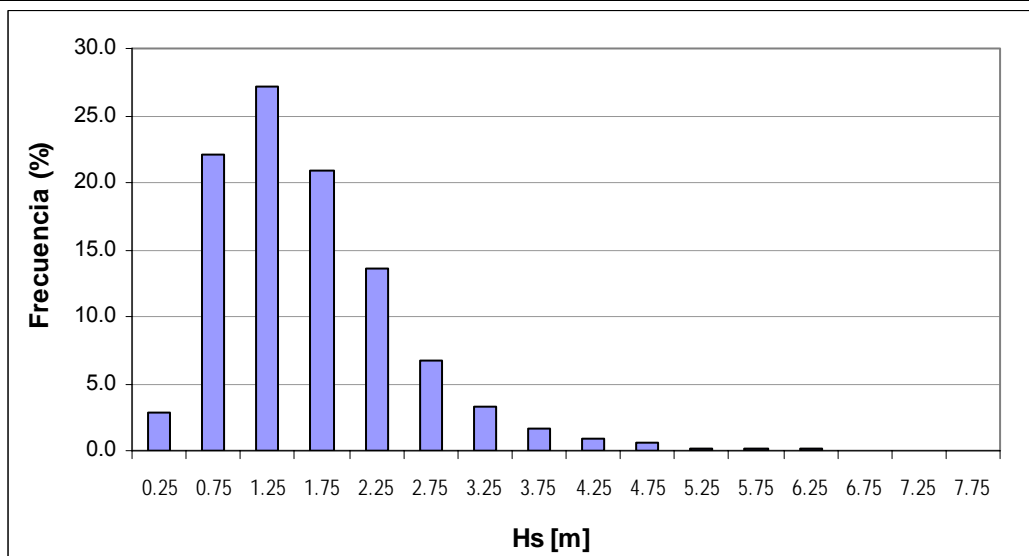
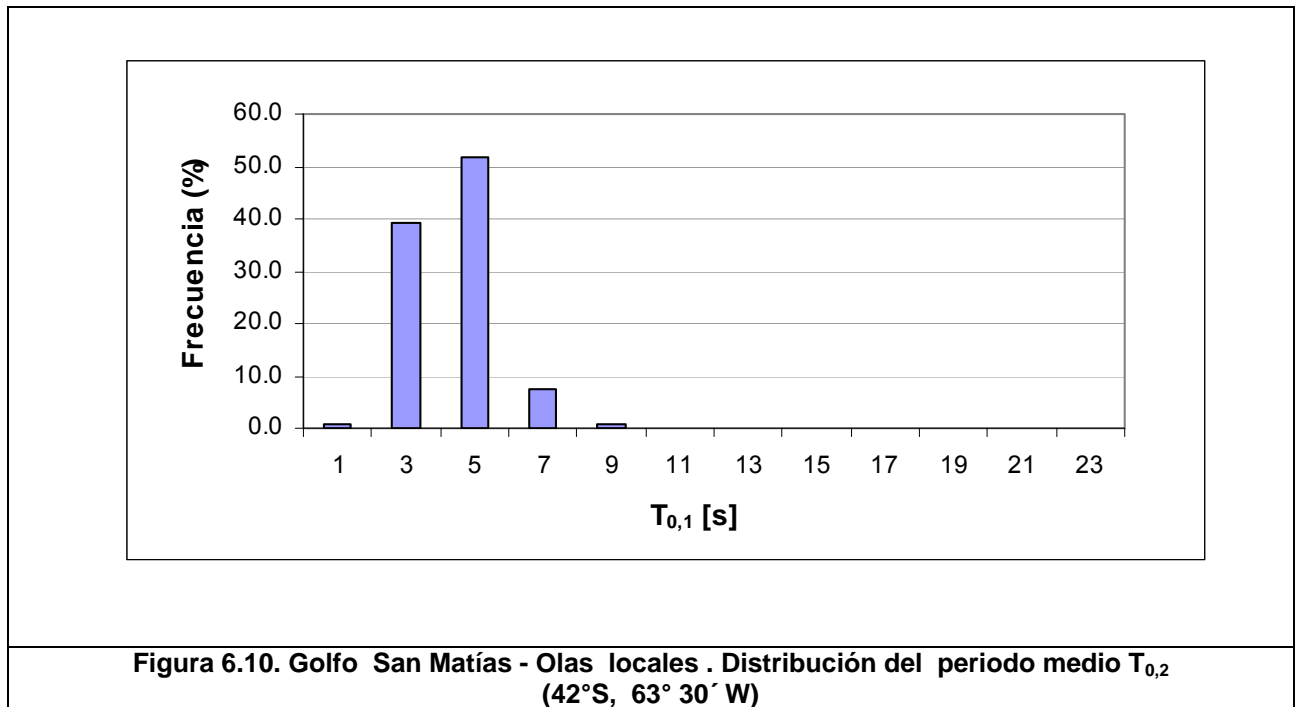


Figura 6.9. Golfo San Matías - Olas locales. Distribución de altura significativa (42°S 63 30' W)

La distribución del período medio del oleaje (**Figura 6.10**) se concentra fuertemente entre los 4 s y los 6 s con un 51.8 % del total de casos. Períodos mayores pueden encontrarse con menor frecuencia, observándose valores entre 8 y 10 s (olas de temporal) en menos del 1% del total de datos.



Con respecto a la dirección de procedencia de las olas generadas localmente por el viento, la **Figura 6.11** muestra el predominio de las direcciones NNE (10.9%) y NE (10.21%) para la distribución por direcciones de procedencia del oleaje. la suma total indica que, aproximadamente, el 37.7% (N-ESE) de olas generadas por vientos locales viaja hacia la costa.

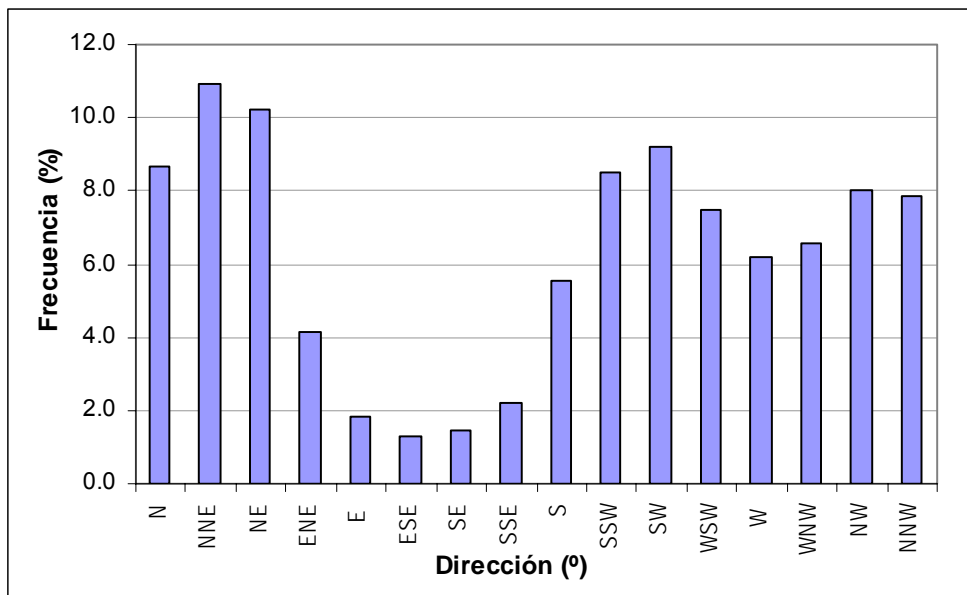


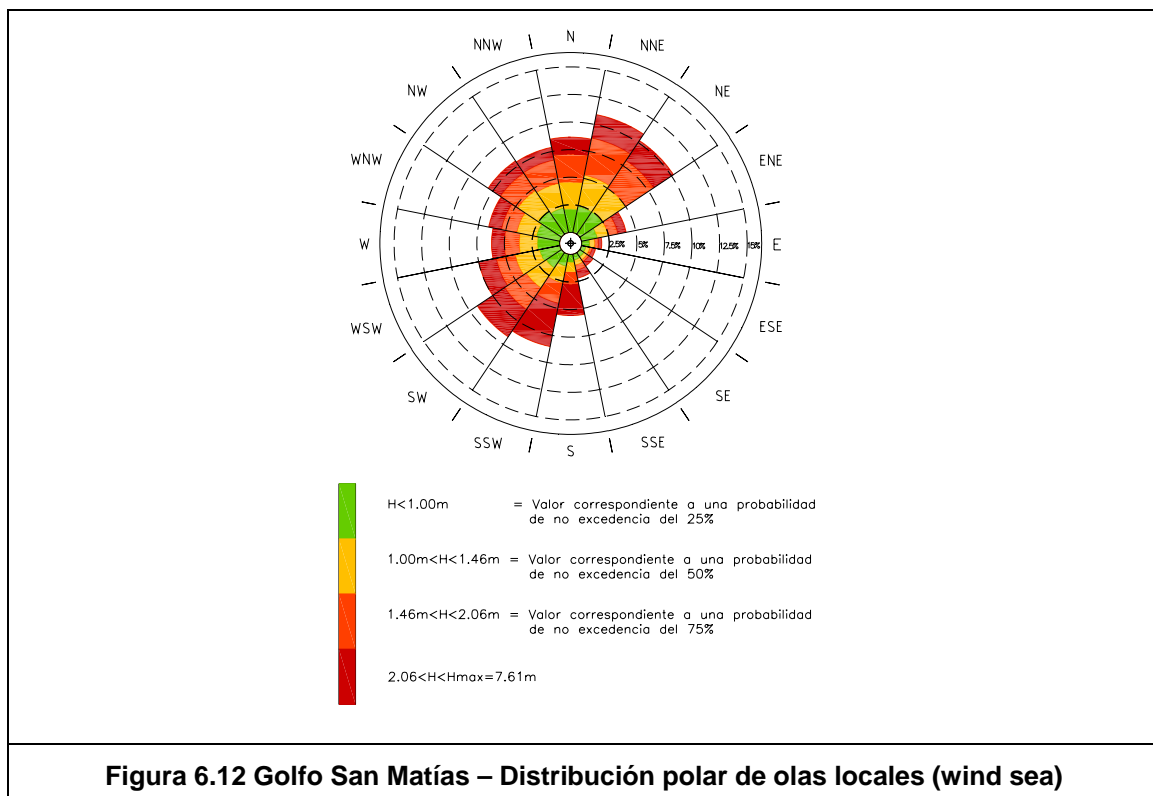
Figura 6.11. Olas locales . Distribución por dirección de procedencia (42° 00' S 62° 30' W)

La **Tabla 6.4.** permite visualizar en detalle la distribución direccional del oleaje generado por viento en la posición costa afuera. Las olas más altas se presentaron de los sectores ESE al SSE. Las olas más frecuentes son de los sectores SW y SSW.

Tabla 6.4. Golfo San Matías - Distribución Direccional de Olas Locales (wind sea)

H (m)	Dirección																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 0.5	75	75	95	77	47	33	37	25	41	37	70	41	56	50	85	106	950
0.5 - 1	594	672	651	371	174	93	108	143	195	302	446	542	557	615	697	590	6750
1 - 1.5	796	936	841	327	152	115	102	147	280	496	698	711	528	575	710	744	8158
1.5 - 2	628	867	760	212	79	54	50	119	274	481	596	427	338	353	468	541	6247
2 - 2.5	345	516	483	165	34	23	43	90	224	377	424	284	228	245	268	291	4040
2.5 - 3	126	173	192	62	23	25	46	69	216	286	253	116	95	112	128	72	1994
3 - 3.5	38	49	47	18	17	19	35	34	151	220	138	72	38	27	44	21	968
3.5 - 4	5	2	12	15	7	12	11	22	105	152	67	32	14	6	11	9	482
4 - 4.5	1	2	1	0	14	5	2	9	82	97	36	25	5	1	2	1	283
4.5 - 5	0	0	0	0	3	5	4	2	56	59	22	7	1	0	0	0	159
5 - 5.5	0	0	0	0	0	2	0	0	20	25	15	2	2	0	0	0	66
5.5 - 6	0	0	0	0	0	1	0	4	16	19	3	0	1	0	0	0	44
6 - 6.5	0	0	0	0	1	1	2	3	8	20	4	0	0	0	0	0	39
6.5 - 7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	6
7 - 7.5	0	0	0	0	0	3	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	7
7.5 - 8	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3
8 - 8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	2608	3292	3082	1247	551	393	440	667	1672	2575	2773	2261	1863	1984	2413	2375	30196

Finalmente la **Figura 6.12** es la representación polar de la distribución de olas generadas localmente por viento. Las alturas de ola se han clasificado en cuatro intervalos cada uno conteniendo el 25% del total de datos, y en 16 sectores direccionales de 22,5° cada uno.



Correlación H-T para olas de viento

En la etapa de desarrollo del oleaje cuando la energía del viento es transferida a las olas, el crecimiento ocurre tanto en altura como en el período de las olas.

Tabla 6.4. Correlación entre altura de ola y período medio. Olas generadas por vientos locales 42° 00' S 62° 30' W)

Hs [m]	Tm [s]								Total (%)
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	
0 - 0.5	163	693	0	0	0	0	0	0	2.8
0.5 - 1	35	6623	17	0	0	0	0	0	22.1
1 - 1.5	0	4520	3667	0	0	0	0	0	27.1
1.5 - 2	0	59	6232	0	0	0	0	0	20.8
2 - 2.5	0	0	4040	43	0	0	0	0	13.5
2.5 - 3	0	0	1468	539	0	0	0	0	6.6
3 - 3.5	0	0	196	803	0	0	0	0	3.3
3.5 - 4	0	0	11	472	2	0	0	0	1.6
4 - 4.5	0	0	0	262	22	0	0	0	0.9
4.5 - 5	0	0	0	115	47	0	0	0	0.5
5 - 5.5	0	0	0	32	35	0	0	0	0.2
5.5 - 6	0	0	0	4	40	0	0	0	0.1
6 - 6.5	0	0	0	3	36	0	0	0	0.1
6.5 - 7	0	0	0	0	7	0	0	0	0.0
7 - 7.5	0	0	0	0	7	0	0	0	0.0
7.5 - 8	0	0	0	0	2	1	0	0	0.0
Total (%)	0.7	39.4	51.8	7.5	0.7	0.0	0.0	0.0	100

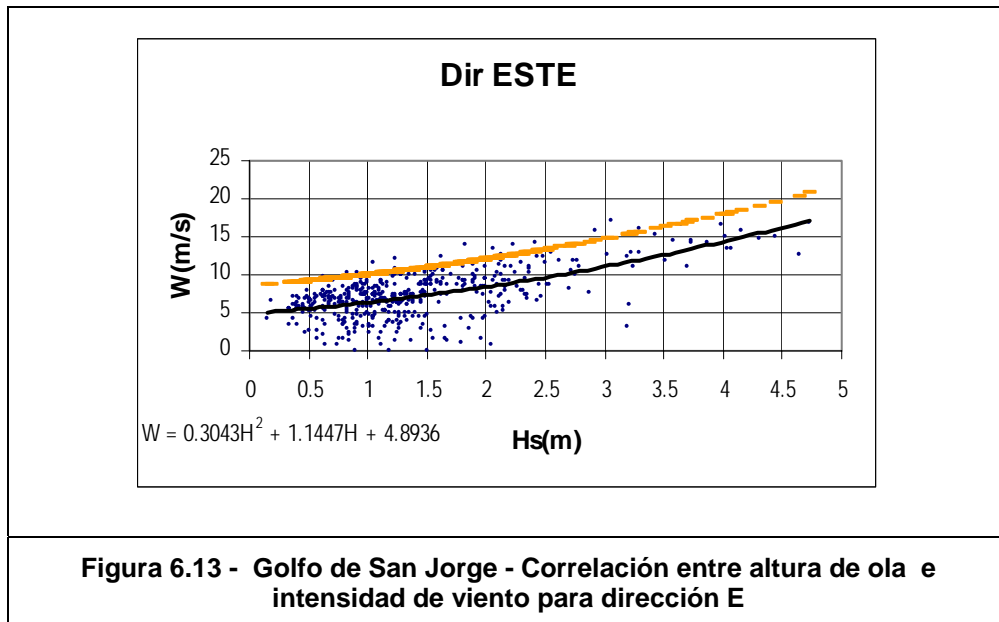
La **Tabla 6.4.** presenta el número de datos de altura de ola significativa Hs y período medio Tm para el período 1992-2006 clasificados en rangos de 0,50 m de altura y 2 segundos de período. Los totales por línea y columna se expresan en por ciento del total.

El agrupamiento diagonal característico los datos observado en la **Tabla 6.4** es el propio de las olas generadas por viento localmente y demuestra que a medida que el viento transfiere energía, incrementando la altura de las olas, también se incrementa el valor del período medio del oleaje. Las olas más altas (hasta 7,61 m) se hallan vinculadas a períodos medios de 8 a 10 segundos.

Correlación H-W para las olas generadas por viento

Existe también una marcada correlación entre los valores de Hs y los valores de la intensidad del viento generador del oleaje. El conocimiento de esta correlación se hace

necesario a los efectos de la simulación numérica de la propagación de estas olas hacia la costa. En la **Figura 6.13** se muestra la correlación resultante para la dirección Sur. Se estableció un ajuste de la forma $W = f(H_s) = aH^2 + bH + c$.



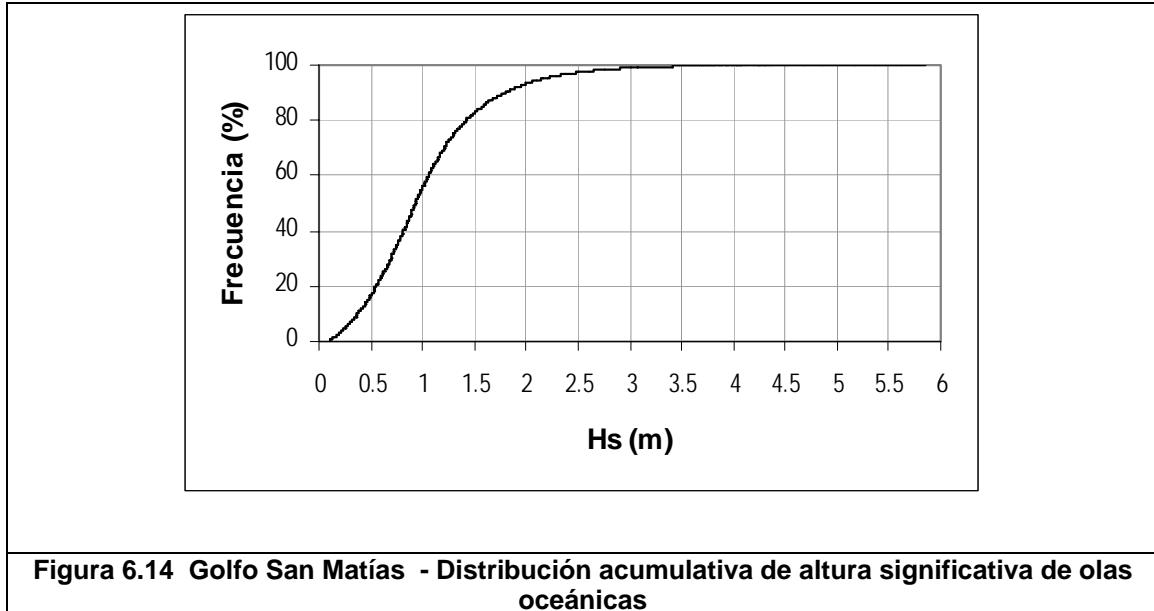
Se calcularon para cada par de valores W-Hs las diferencias entre el ajuste y el valor verdadero. Se calculó el desvío standard σ de las diferencias, y se definió una nueva curva de ajuste desplazada en $+1.5\sigma$, que es la que se adoptó como representativa de la correlación de los pares de valores. Este análisis se repitió para todas las direcciones de oleaje que potencialmente pueden alcanzar el área costera y permitió definir las condiciones de borde en la etapa de modelación matemática de las olas generadas por viento.

6.4 Olas Oceánicas

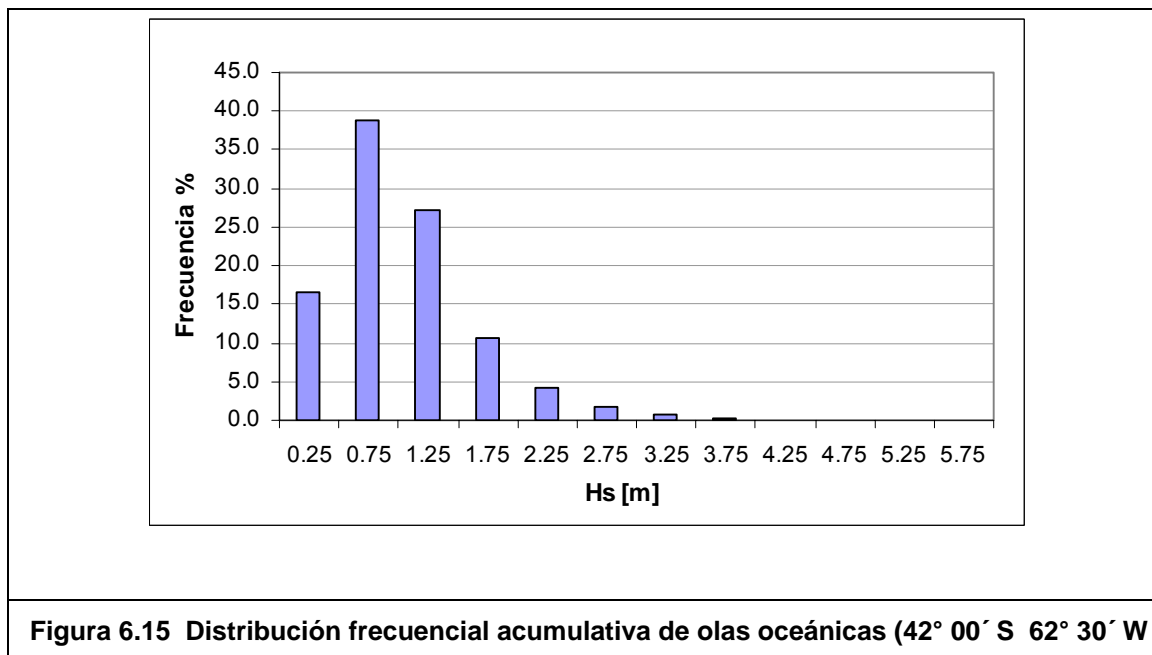
El resultado del análisis de la distribución de frecuencias para la dirección de propagación, la altura significativa y el período medio del oleaje, correspondiente al conjunto de datos de olas oceánicas (*swell*) en el lapso comprendido entre el 1 de Enero de 1992 y el 31 de Diciembre de 2006 es presentado en las **Figuras 6.14 a 6.17**.

El valor máximo de altura significativa fue de 5,86 m en el período indicado. Sin embargo, sólo el 10% de las olas oceánicas superan 1,80 m. El 50% de las olas son menores que

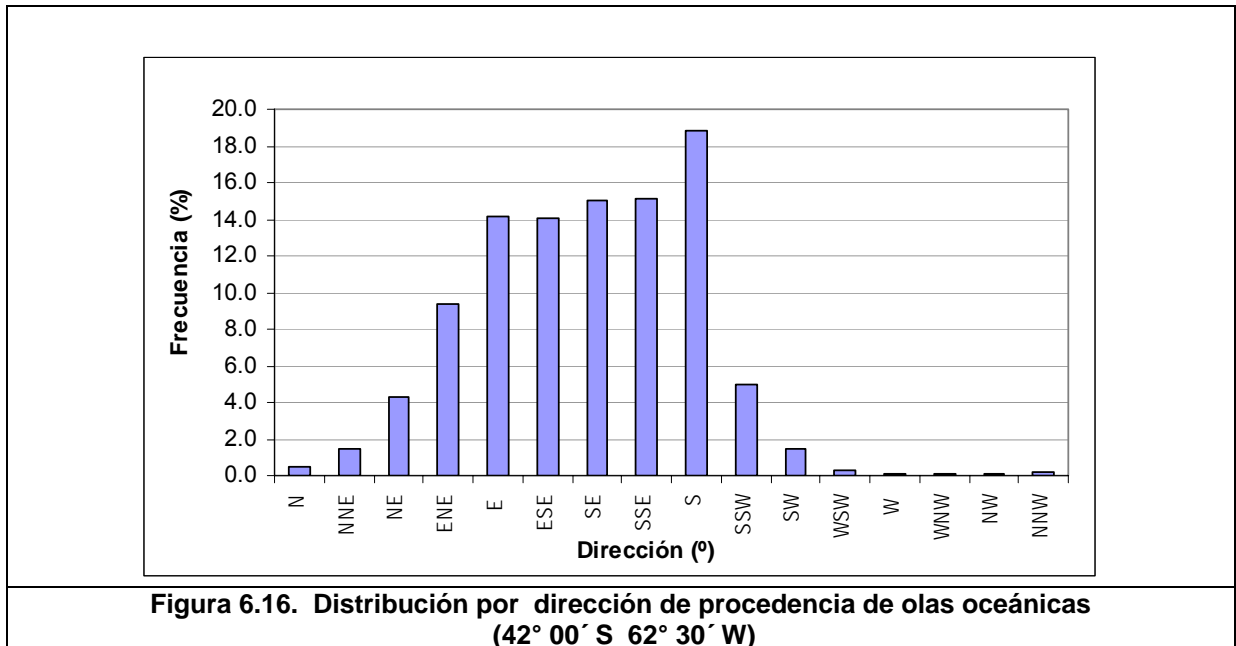
0,93 m y el 25% menores que 0.62 m. La curva de frecuencia acumulativa se muestra en la **Figura 6.14**.



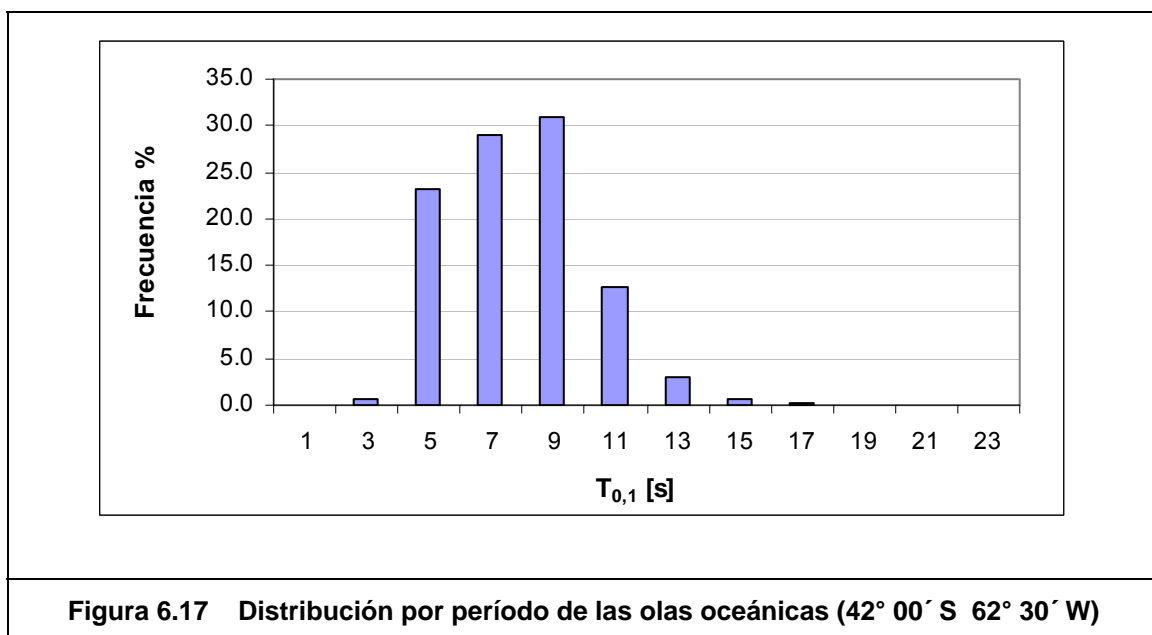
La distribución para la altura significativa (**Figura 6.15**) señala que los valores más frecuentes de Hs para las olas oceánicas se encuentran entre 0,5 y 1,5 m, representando aproximadamente el 66% del total de olas oceánicas. Estas a su vez componen el 78 % del total de datos.



La **Figura 6.16** indica la dirección de procedencia de las olas oceánicas destacándose el predominio del cuadrante SE y en particular del sector S. En la posición costa afuera analizada, el efecto continental limita la presencia de olas oceánicas especialmente desde los cuadrantes SW y NW.



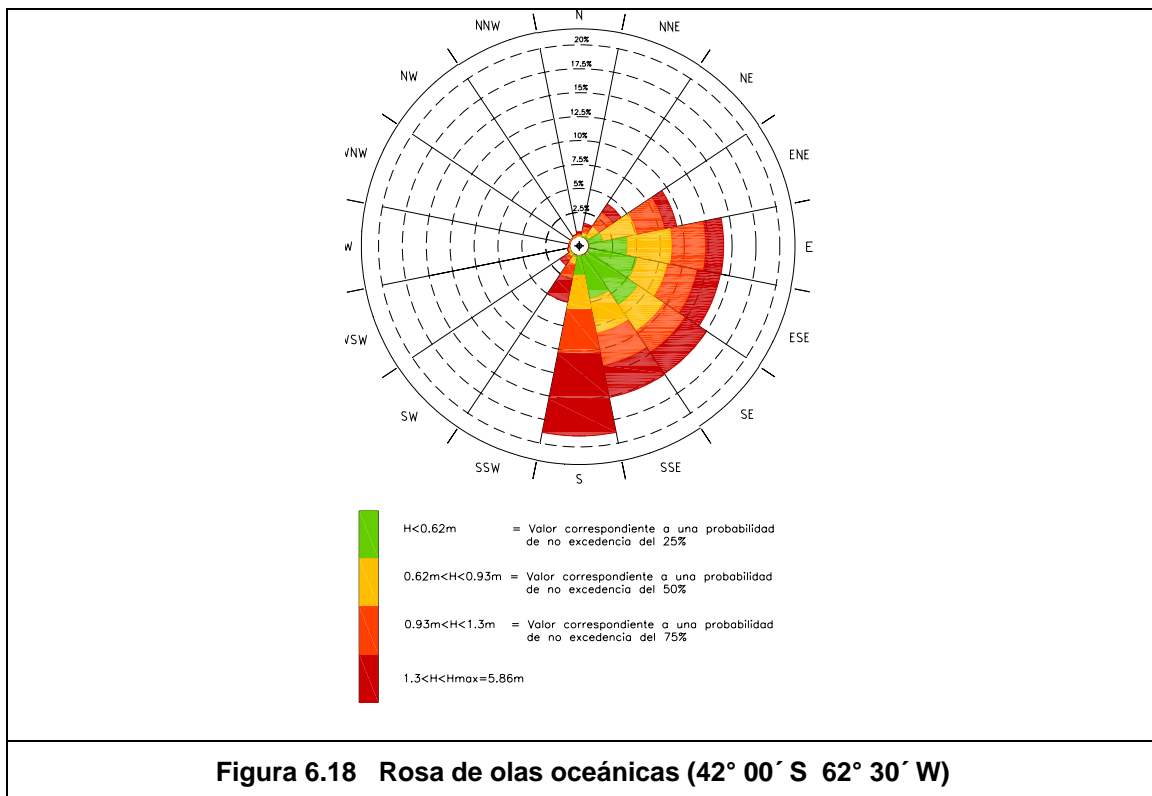
El período medio del oleaje oceánico (**Figura 6.17**) se concentra entre 8 y 10 s, llegando a observarse valores comprendidos entre los 22 y 24 s.



La **Tabla 6.5.** aporta información más detallada respecto de la estructura direccional de las olas oceánicas. Las olas más altas corresponden a los sectores ESE y SE. Las más frecuentes se presentan desde el S.

Hs (m)	Dirección															Total (%)	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
0 - 0.5	0	4	22	248	790	1322	1683	1091	419	33	1	0	0	1	0	0	5614
0.5 - 1	56	191	609	1760	2490	1775	1867	1979	1807	399	152	53	29	20	22	38	13247
1 - 1.5	92	243	645	960	1112	1106	952	1262	1879	672	210	34	14	10	13	37	9241
1.5 - 2	12	42	170	200	323	326	383	545	1164	342	101	9	1	0	1	0	3619
2 - 2.5	0	2	10	28	76	145	159	189	640	146	17	1	0	0	0	0	1413
2.5 - 3	0	0	1	4	10	76	41	60	300	69	3	0	0	0	0	0	564
3 - 3.5	0	0	0	0	4	23	19	23	139	20	0	0	0	0	0	0	228
3.5 - 4	0	0	0	0	3	11	8	3	52	8	0	0	0	0	0	0	85
4 - 4.5	0	0	0	0	0	4	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	23
4.5 - 5	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
6 - 6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5 - 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (%)	160	482	1457	3200	4808	4789	5120	5152	6419	1689	484	97	44	31	36	75	34043

Finalmente la **Figura 6.18.** muestra la distribución direccional de olas oceánicas, clasificadas



en dieciséis sectores y en cuatro intervalos de altura cada uno conteniendo el 25% del total de datos. El sector S además de ser el más frecuente, contiene la proporción más alta de olas en el cuartil superior (olas entre 1,30 m y 5.86 m). No obstante, las olas extremas se han presentado desde el SE.

Correlación H-T para Olas Oceánicas

La **Tabla 6.6** muestra los datos de altura significativa Hs de olas oceánicas y su período medio T_m. El patrón de distribución observado es claramente diferente del correspondiente a las olas generadas por vientos locales (**Tabla 6.4**), para las que se presenta una distribución diagonal de los datos dentro de la tabla. El caso de las olas oceánicas existe una distribución amplia de valores de T_m especialmente para cada los rangos inferiores de Hs. En cambio las olas de mayor amplitud (hasta 5,86 m) tienden a concentrarse en el rango de período medio de 8 a 10 segundos.

Para las olas más frecuentes, de mediana y baja amplitud, no hay para el período T_m una clara dependencia de Hs. Por ejemplo, para las olas de entre 1.5 y 2 m de altura existe un número total de 1816 casos (12.9% del total de olas oceánicas) con períodos medios que varían entre los 4 y los 18 s.

Hs [m]	Tm [s]												Total (%)
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	
0 - 0.5	0	1	25	547	2188	1767	802	234	41	6	3	0	16.5
0.5 - 1	0	188	2894	3794	4784	1422	165	0	0	0	0	0	38.9
1 - 1.5	0	7	3616	2594	2308	686	30	0	0	0	0	0	27.1
1.5 - 2	0	0	1203	1397	731	271	17	0	0	0	0	0	10.6
2 - 2.5	0	0	127	919	260	91	16	0	0	0	0	0	4.2
2.5 - 3	0	0	0	416	118	24	6	0	0	0	0	0	1.7
3 - 3.5	0	0	0	144	68	14	2	0	0	0	0	0	0.7
3.5 - 4	0	0	0	33	46	6	0	0	0	0	0	0	0.2
4 - 4.5	0	0	0	0	21	2	0	0	0	0	0	0	0.1
4.5 - 5	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0.0
5 - 5.5	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0.0
5.5 - 6	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Total (%)	0.0	0.6	23.1	28.9	30.9	12.6	3.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	100

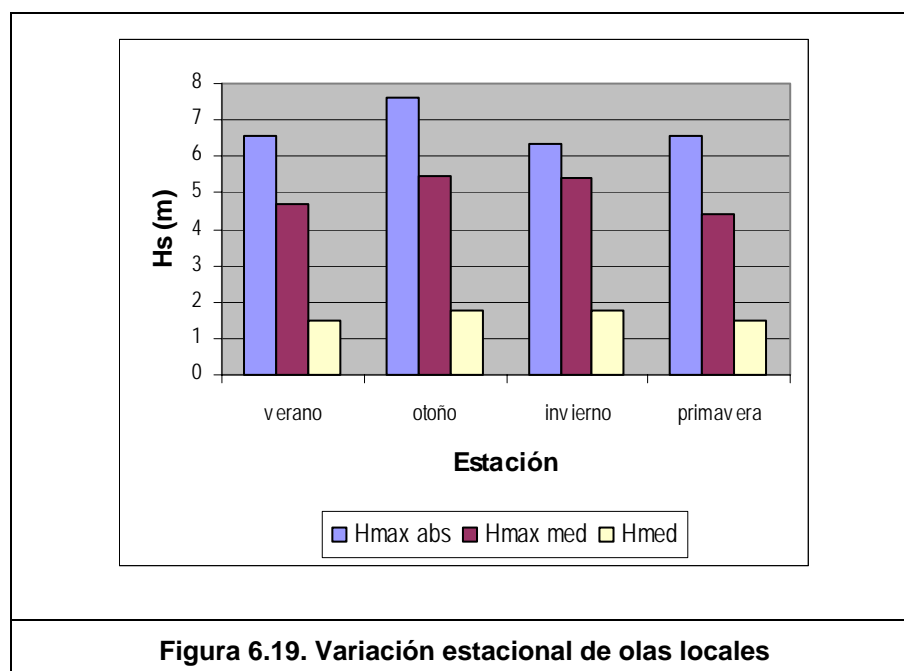
6.5 Régimen estacional Costa Afuera

La caracterización del régimen estacional del oleaje puede ser de utilidad en la planificación de diversas actividades relativas a operaciones marinas o portuarias.

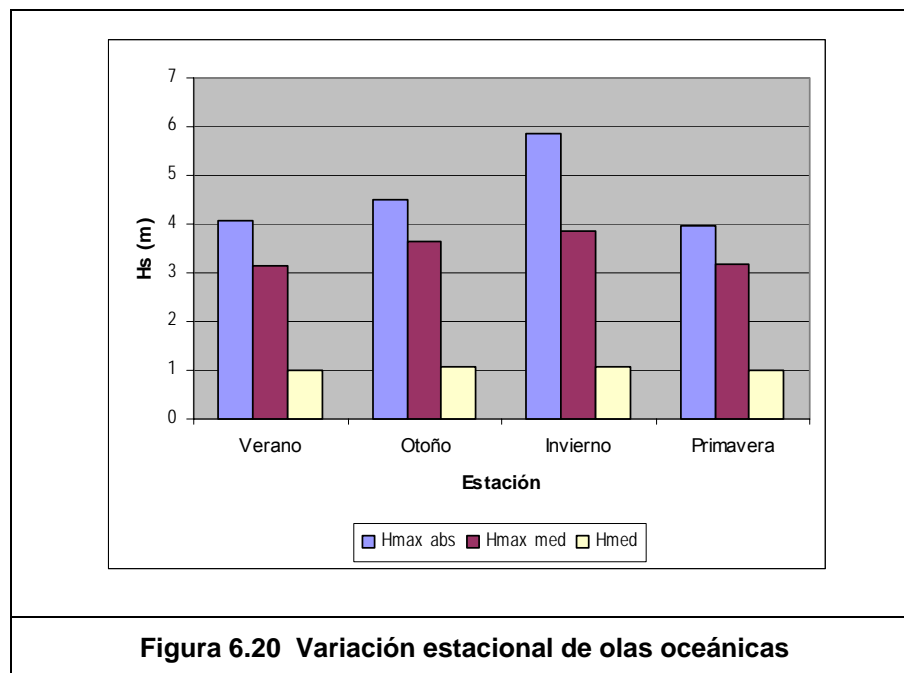
Para la posición costa afuera se analizaron las variaciones estacionales de la altura de las olas oceánicas y las locales y olas resultantes. Se consideraron cuatro períodos comprendidos entre 21 de diciembre y 21 de marzo (verano), 21 de marzo a 21 de junio (otoño), 21 de junio a 21 de septiembre (invierno) y 21 de septiembre a 21 de diciembre (primavera).

Para evaluar la variación estacional se graficaron las alturas promedio de cada estación en los 15 años de extensión de la serie, la altura máxima absoluta estacional en los 15 años, y la altura promedio de los máximos estacionales en los 15 años.

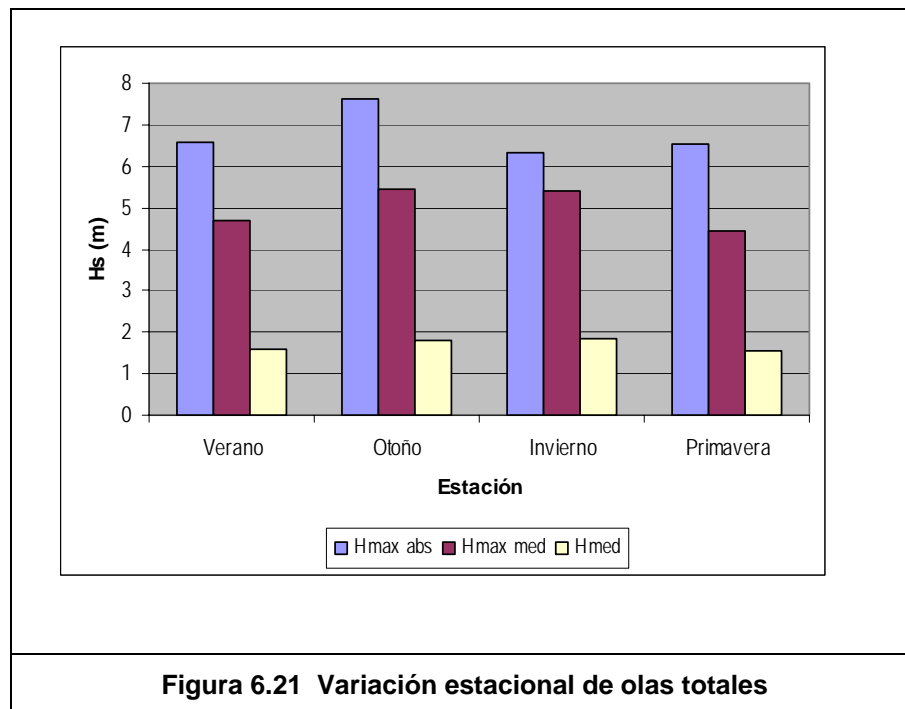
La **Figura 6.19** muestra que la altura media de olas locales es 20% mayor en otoño/invierno que en primavera/verano, estaciones en las que los valores son 1,47 m y 1,75 m respectivamente. Las olas máximas estacionales (promedio de los 15 años) son 23% mayores en otoño (5,45m) que en primavera (4,42 m). El máximo estacional absoluto (7,61 m) se presentó en otoño. La variación estacional de H_{max} fue de 20 % respecto del mínimo, aunque esta variable se refiere a valores individuales y no tiene un carácter estadístico.



Las olas oceánicas medias (**Figura 6.20**) presentan poca variabilidad a lo largo del año. La altura promedio es en el entorno de 1 m independientemente de la estación del año. No ocurre lo mismo con los valores promedio en 15 años de las máximas estacionales, que mostraron una variación de 23% entre el mínimo de primavera/verano (3,13 m) y el máximo de invierno (3,87m). El máximo absoluto ocurrió en invierno (5,86 m) y fue 48% mayor que el mínimo de los máximos absolutos estacionales, ocurrido en primavera.



Con respecto a las olas totales (**Figura 6.21**) la altura promedio de otoño/invierno (1,80m) resultó en el período analizado, 17% mayor que los valores medios de primavera/verano (1,56m).



El promedio en 15 años de los máximos absolutos estacionales fue 23% mayor en otoño que en primavera. El máximo absoluto (7,61 m) ocurrió en otoño.

7 EVALUACION DE OLAS EN EL AREA COSTERA

El estudio de las características del oleaje en el área de Puerto Lobos requirió la aplicación de un modelo matemático a los efectos de modelar la propagación de las olas desde el punto en el que se dispuso de la información de base generada por el Modelo Global de Olas, ubicado en aguas intermedias, a unos 215 Km al E del punto de interés.

Para el desarrollo de esta evaluación se aplicó el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros) desarrollado en Delft University of Technology, versión 40.51. Una descripción del mismo se incorpora en el **Anexo IV**.

El modelo fue aplicado para caracterizar el clima de olas en las proximidades de Puerto Lobos, en una posición de coordenadas $X=3.577.655$ (Este), $Y=5.349.850$ (Norte) ($42^{\circ}00'02''S$ $65^{\circ}03'46''W$) que se indica en la **Figura 7.1**. La profundidad local en esta posición es de aproximadamente 10 m, referido al 0 MOP.

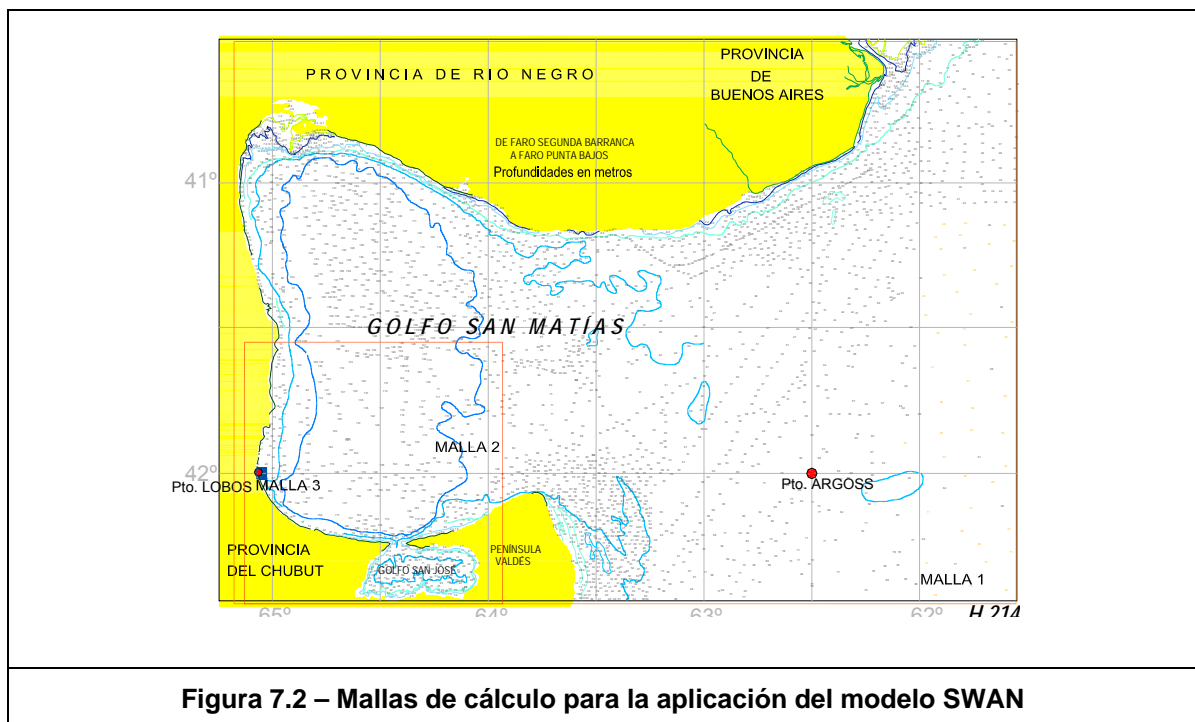


7.1 Implementación del modelo

La implementación del modelo requirió la construcción de tres mallas de cálculo anidadas de diferentes dimensiones, las cuales, acopladas convenientemente, permitieron propagar las olas desde el punto de pronóstico (42 °S, 63.5°W) hasta la zona costera de Puerto Lobos, obteniendo los resultados de la modelación sobre una región de cálculo con una descripción batimétrica detallada.

Las grillas conforman un sistema cartesiano, coincidiendo el eje de abcisas con la dirección E-W y el de ordenadas con la dirección N-S.

La **Figura 7.2** muestra la ubicación relativa y el tamaño de las tres grillas utilizadas para la implementación del modelo.



A continuación se presenta información adicional correspondiente a cada una de ellas:

- La Malla 1 Abarca una extensa región de la costa 303 Km x 215 del Golfo San Matías y Mar Argentino cuya área se encuentra cubierta por un total de 304x216 nodos, con un espaciamiento de $\Delta x = \Delta y = 1000$ m.

- La Malla 2 abarca una región ubicada dentro de la Malla 1 pero con un mayor detalle. Representa un área de 100 Km x 100 Km, cubierta por un total de 251x251 nodos espaciados de manera equidistante con $\Delta x = \Delta y = 400$ m.
- La Malla 3 abarca una región incorporada dentro de Malla 2 pero con un mayor detalle. Representa un área de 3780 m x 4200 m cubierta por un total de 253x281 nodos espaciados de manera equidistante con $\Delta x = \Delta y = 15$ m.

El acoplamiento de las grillas permite escribir el resultado de las simulaciones realizadas para la Malla 1 sobre el contorno de la Malla 2, sirviendo como dato de entrada para la segunda simulación. El proceso se repite entre las mallas 2 y 3, permitiendo obtener el resultado de la modelación sobre la zona de mayor detalle.

El resultado de la modelación permite obtener información sobre la altura, período, dirección y demás variables del oleaje, en forma directa, para cualquier nodo de la grilla de cálculo; o mediante un proceso de interpolación, para cualquier otra posición que se desee especificar dentro del área modelada.

7.2 Aplicación

Se realizaron alrededor de 480 corridas en cada una de las tres mallas anidadas, para distintas direcciones de incidencia, periodos y alturas de ola. A partir de los resultados se establecieron relaciones funcionales entre las variables homólogas en dos posiciones: la ubicación costa afuera y la posición costera. Como ejemplo se muestra en la **Figura 7.3** los resultados correspondientes a la altura de ola (7.3.a), el período medio (7.3.b) y la dirección de propagación (7.3.c) para la dirección ENE. En el caso de la altura de ola se ha representado (**Figura 7.3.a**) el coeficiente de transformación $K = H / H_o$, siendo H la altura significativa de ola en la posición costera y H_o en la posición costa afuera.

El cálculo se realizó separadamente para olas oceánicas y olas locales. El conjunto de escenarios estuvo constituido por una serie de direcciones de oleaje capaces de alcanzar el área costera, y períodos y alturas de ola en rangos escalonados y tales que abarcaron la totalidad de las situaciones observadas en la posición costa afuera.

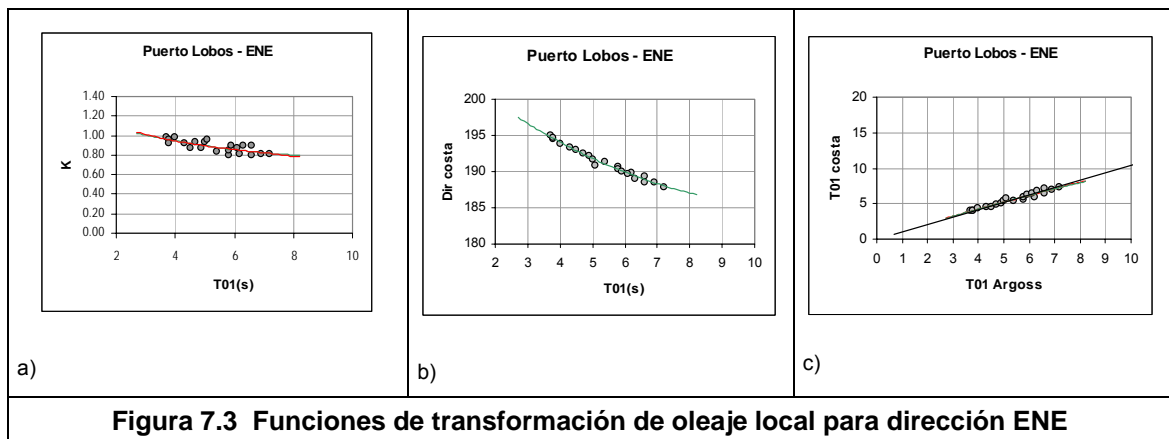


Figura 7.3 Funciones de transformación de oleaje local para dirección ENE

En la **Figura 7.3.b**, las direcciones de llegada a la costa están referidas a la dirección Este-Oeste, medidas en sentido antihorario, e indican la dirección de propagación del oleaje. Las funciones de transformación fueron aplicadas a continuación a la totalidad de los datos que conforman la serie correspondientes al periodo 1992-2006 en la posición costa afuera obteniéndose como resultado de ello una nueva serie cronológica de las variables características (H_s , T_m , Dir) en la posición costera. El análisis de esta serie permitió caracterizar el clima de olas en la posición A en el área costera de Puerto Lobos, indicada en la **Figura 7.1**.

7.3 Resultados

7.3.1 Olas locales (wind sea)

La **Figura 7.4**. muestra la distribución acumulativa de altura de olas locales (wind sea) en el área costera de Puerto Lobos (Punto de Control de la **Figura 7.1.**), de acuerdo a los resultados de la transformación efectuada mediante simulación numérica de los datos suministrados en la posición $42^\circ S$, $63.5^\circ W$, que abarcan el período 1/1/92 al 31/12/2006.

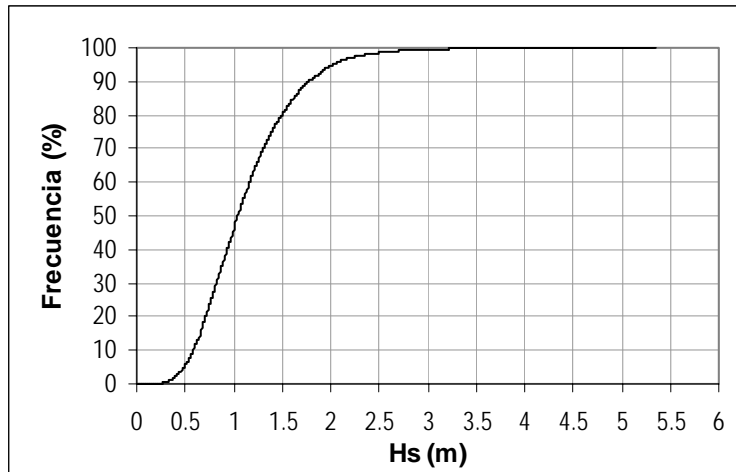


Figura 7.4 Frecuencia acumulativa de altura de olas locales en Puerto Lobos (d = 10 m)

Del total de 43832 datos que componen la serie cronológica costa afuera, 11.613 alcanzan la costa. Es decir que en el área costera de Puerto Lobos las olas de viento tienen una persistencia de 26,5% del tiempo.

En el área costera el máximo valor resultó $H_s = 5,33$ m. El 90 % de las olas es menor que 1,78 m. En términos de cuartiles, el 25% de las olas resultan inferiores a 0,77 m, el 50% inferior a 1,04 m y el 75% inferior a 1,39 m.

La **Figura 7.5** muestra la distribución polar de frecuencia de altura de olas en el área costeras próxima a Puerto Lobos. La altura de olas se ha clasificado según los cuartiles definidos previamente.

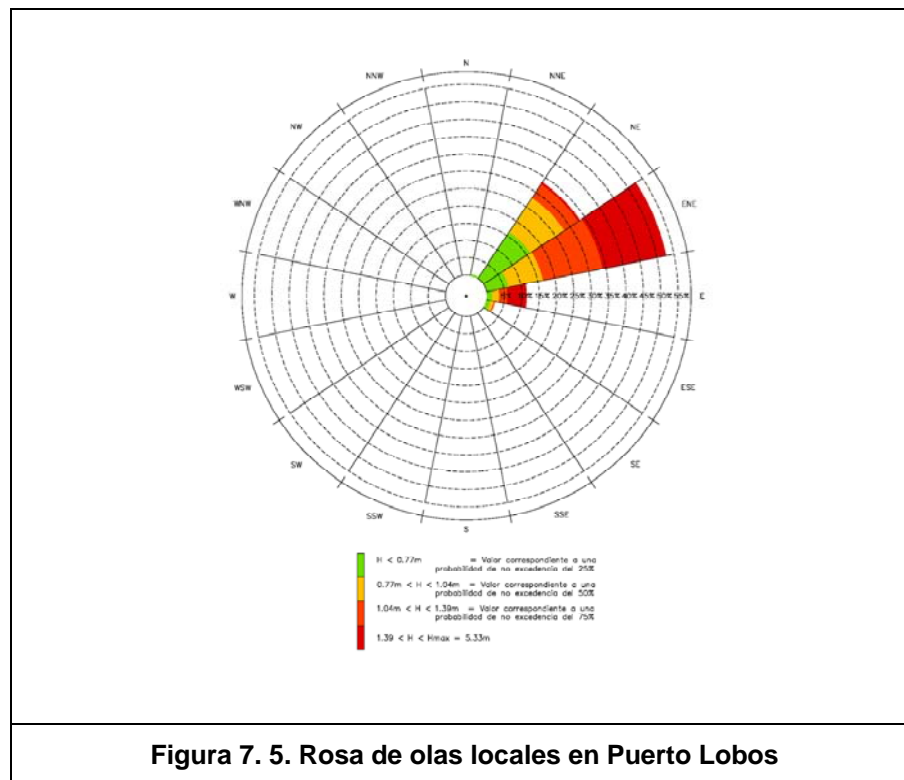


Figura 7. 5. Rosa de olas locales en Puerto Lobos

Puede notarse que las olas de viento más frecuentes proceden del sector ENE y también del NE. Las olas más intensas (aunque menos frecuentes) de la dirección E y ESE, hallándose este tramo del área costera más expuesta a la primera de ellas.

La **Tabla 7.1** amplía la información gráfica presentada y permite establecer que aunque en el área costera las olas más frecuentes proceden del sector ENE, las más altas llegan desde el sector E.

Hs(m)	Direccion																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 0.5	0	38	385	133	23	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	617
0.5 - 1	0	1	2725	1482	305	179	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4692
1 - 1.5	0	0	749	2783	395	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3988
1.5 - 2	0	0	36	1373	277	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1686
2 - 2.5	0	0	0	272	184	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	456
2.5 - 3	0	0	0	41	78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119
3 - 3.5	0	0	0	2	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34
3.5 - 4	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
4 - 4.5	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
4.5 - 5	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
5 - 5.5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0	39	3895	6086	1315	278	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11613

7.3.2 Olas Oceánicas (swell)

En el caso de las olas oceánicas, la distribución acumulativa de altura significativa en el área costera de Puerto Lobos se muestra en la **Figura 7.6**.

La máxima altura calculada para el período 1992-2006 resultó $H_s = 1,96$ m. El 90% de las olas son no obstante menores que 0.67m, y el 50% menores que 0.35 m. Cabe destacar que se han descartado en este análisis 7695 datos computados que resultaron menores que 0,10 m. Así, de un total de 43832 datos en la ubicación costa afuera , 17202 alcanzan el área costera, lo que indica una persistencia de olas oceánicas de 39%.

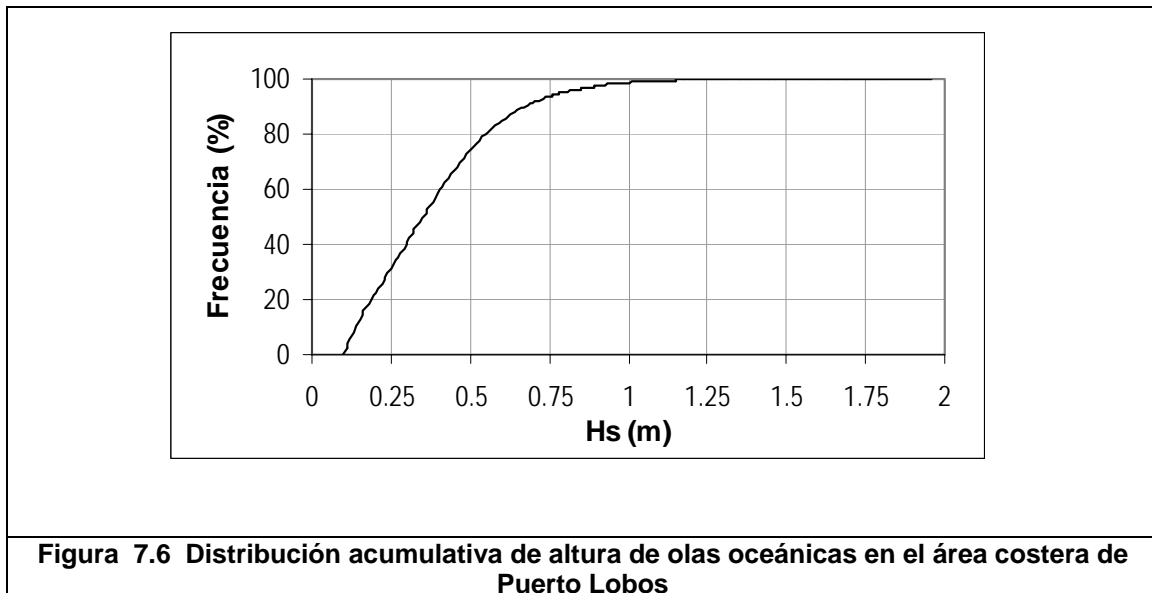
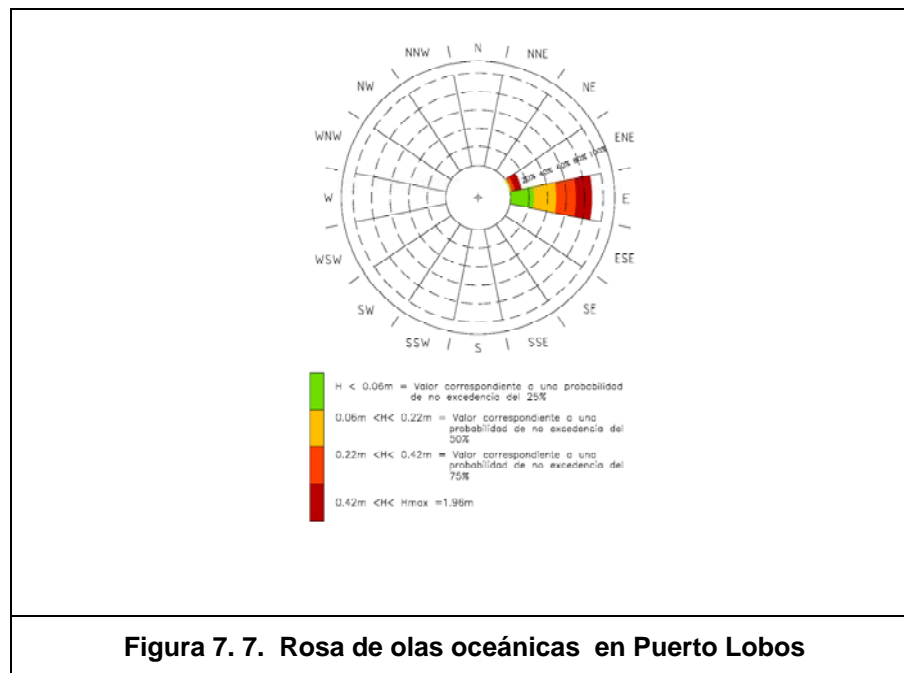


Figura 7.6 Distribución acumulativa de altura de olas oceánicas en el área costera de Puerto Lobos

La distribución direccional en 16 sectores y 4 rangos de altura (cuartiles) se indica en la **Figura 7.7**. Las olas más frecuentes que en aguas abiertas proceden del sector S, se refractan y cambian de dirección por efecto del fondo al aproximarse al área costera, a donde llegan principalmente desde el SE y ESE .



La **Tabla 7.2.** aporta información más detallada de las características de las olea oceánicas en el área costera.

Tabla 7.2 Puerto Lobos - Distribución direccional de olas oceánicas

Hs (m)	Dirección															TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
0 - 0.5	0	0	0	1692	19022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20714
0.5 - 1	0	0	0	1368	2875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4243
1 - 1.5	0	0	0	22	181	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	203
1.5 - 2	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	0	0	0	3082	22086	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25168

7965 datos menores que 0,10 m

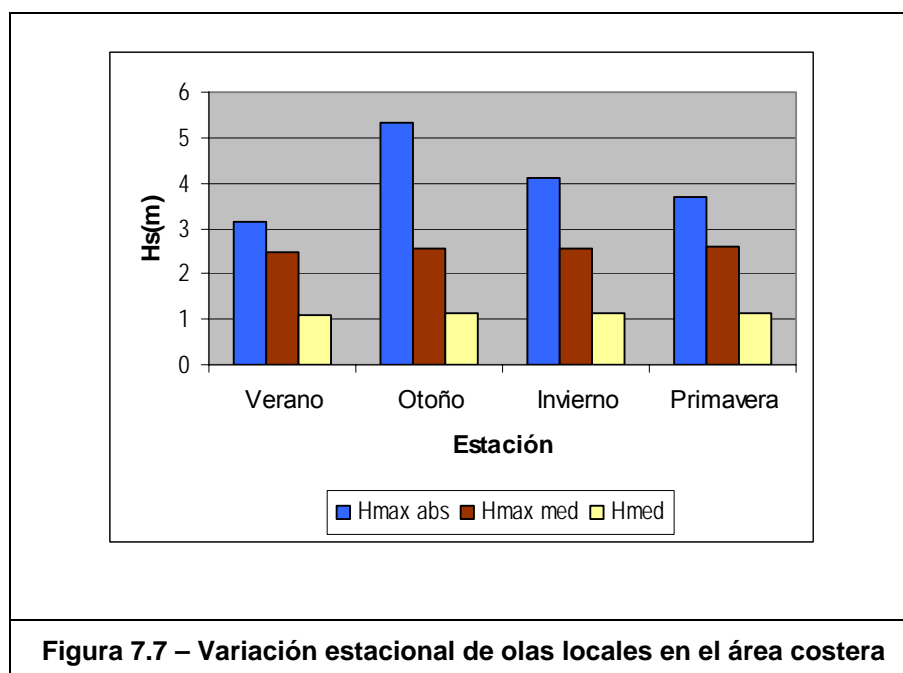
En el área costera las olas oceánicas más frecuentes y las más altas son del sector E.

7.4 Régimen estacional en el área costera

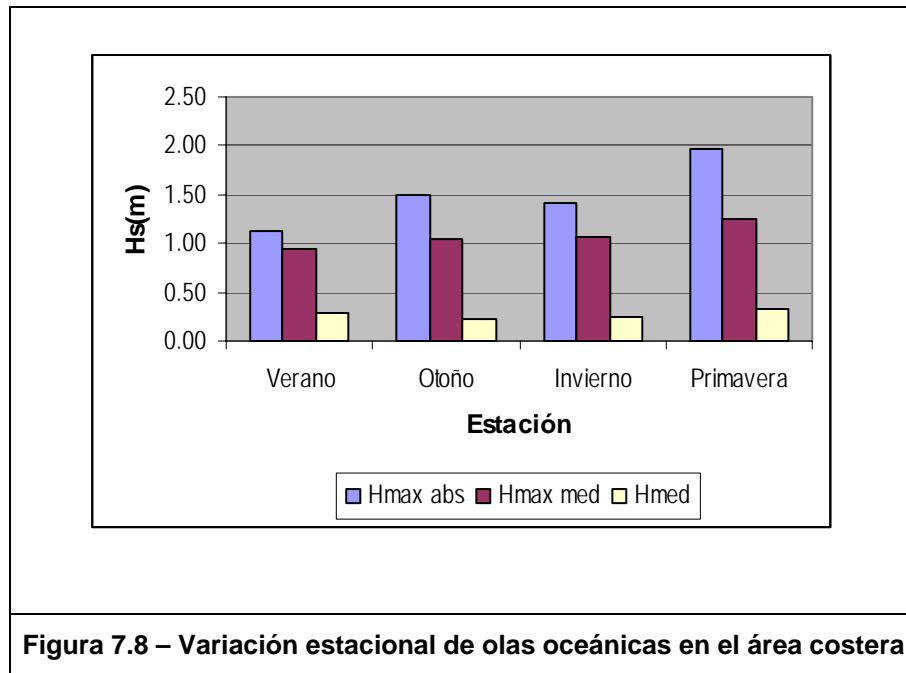
Con idéntico criterio que para la posición costa afuera, se analizaron las variaciones estacionales del oleaje en el área costera en forma separada para olas oceánicas y las locales.

Las olas locales medias estacionales (**Figura 7.7.**) no presentan una variación significativa a lo largo del año y su altura es del orden de 1 m. Lo mismo puede decirse de las olas máximas estacionales promedio de 15 años, cuyo valor está en el entorno de 2,50 / 2,60 m para todas las estaciones.

La ola máxima absoluta ocurrió en otoño. El verano muestra los menores valores. La máxima ola de otoño (5,33 m) fue 70% mayor que la máxima de verano (3,14 m).



Las olas oceánicas (**Figura 7.8.**) medias estacionales presentan poca variabilidad a lo largo del año, siendo el valor promedio en el área costera $H_s = 0.30$ m. Las olas máximas estacionales (absolutas y promedio en 15 años) se presentaron en primavera. Las máximas medias menores ocurrieron en verano.



8 ESTADÍSTICA DE VALORES EXTREMOS

El propósito de este análisis es la determinación de valores de altura de ola significativa (Hs) probables asociados a distintos períodos de retorno (Tr).

La evaluación se realiza tanto para la serie cronológica de datos en la posición costa afuera (44°S, 63°30'W) como también en la posición costera próxima a Puerto Lobos.

Los datos utilizados para este análisis corresponden a series valores máximos anuales de Hs correspondientes al período de 15 años comprendido entre el 1 de Enero de 1992 y el 31 de Diciembre de 2006 .

8.1 Metodología de ajuste

Los aspectos a considerar para la realización del ajuste son los siguientes:

- Selección de la serie de datos
- Selección de una función de ajuste
- Selección del método de ajuste de los parámetros de la función

La serie de datos

Los datos constituyen una muestra acotada de una población donde la probabilidad de ocurrencia de un evento (en este caso que la altura significativa de la ola alcance un cierto valor x_1) será descrita por medio de una función de distribución de probabilidades $F(x)$ determinada, donde F es la probabilidad de que una variable x no supere el valor X . $F(x)=P(x<X)$. La serie debe ser de valores considerados extremos.

En este caso la serie estuvo constituida por los máximos anuales en cada una de los sectores direccionales. En todos los casos se verificó que los eventos que constituyen la serie son independientes entre sí.

Función de ajuste

Las funciones de ajuste $F(x)$ utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos son las funciones de Gumbel y de Weibull:

$$\text{Gumbel} \quad F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x - \mu))) \quad [8.1]$$

Siendo α y μ los parámetros de escala y posición respectivamente.

$$\text{Weibull} \quad F(x) = \exp\left[-\left(\frac{x - \varepsilon}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad [8.2]$$

en las que F es la probabilidad de excedencia y x el valor de la variable, α , β y ε son los parámetros de forma, escala y posición de la función de Weibull respectivamente.

Estimación de los parámetros

Para el ajuste de un conjunto de datos a una F(x) determinada debe realizarse la estimación de los parámetros de la función F (α , μ , γ , β , según el caso). Esto puede realizarse utilizando distintos algoritmos numéricos basados ya sea en el Método de los Momentos o el Método de Máxima Verosimilitud.

En el presente estudio se han utilizado ambas metodologías para la estimación de los parámetros de las funciones [8.1] y [8.2].

Método de los Momentos

El método de los momentos permite estimar los parámetros de la distribución igualando los momentos teóricos de una distribución con los momentos de la muestra.

En el caso de la función de Gumbel, la aplicación del método de los momentos a la distribución teórica permite establecer los parámetros de la función como sigue:

$$\alpha = \left(\frac{6 \text{ var}[x]}{\pi^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad [8.3]$$

$$\mu = \text{media}[x] - \frac{\gamma}{\alpha} \quad [8.4]$$

siendo $\gamma = 0.5772$ la constante de Euler. $\text{Var}[x]$ y $\text{Media}[x]$ son la varianza y la media de la muestra.

En el caso de la función de Weibull, el método de los momentos proporciona las siguientes relaciones entre el *coeficiente de asimetría* γ de la muestra, su *desvío standard* σ y el *valor medio* μ y los parámetros α , β y ε de la distribución:

$$\gamma = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^{\frac{3}{2}}} \quad [8.5]$$

$$\beta = \left[\frac{\sigma^2}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [8.6]$$

$$\varepsilon = \mu - \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad [8.7]$$

donde Γ es la función Gamma. Dado el coeficiente de asimetría de la muestra γ , a partir de [8.5] mediante un proceso iterativo se determina α , y a continuación [8.6] y [8.7] permiten determinar β y ε respectivamente.

Método de Máxima Verosimilitud

El método de estimación de los parámetros por máxima verosimilitud se basa en la estimación del parámetro que tiene la propiedad de maximizar el valor de la probabilidad de la muestra aleatoria observada.

La bondad del ajuste es evaluada con la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Esta prueba se basa en la comparación entre la función teórica de ajuste $F(x)$ y la función de probabilidades acumuladas $S(x)$ construida con los datos de la muestra. El estadístico de la prueba es:

$$D = \text{máx } |S(x) - F(x)|$$

Si el valor de D (divergencia) supera un cierto el valor de la tabla del test, correspondiente a un nivel de significación α , escogido previamente, entonces la hipótesis del ajuste debe ser rechazada, es decir, la función $F(x)$ seleccionada no representa adecuadamente la distribución de la población de datos a la cual pertenece la muestra.

Determinación de valores extremos

Una vez obtenida la función de ajuste F, es posible estimar el valor de la variable x que se encuentra asociado a una determinada probabilidad P, haciendo uso de la función inversa:

$$x = F^{-1}(P) \quad [8.8]$$

Según el caso, estas funciones inversas resultan:

Gumbel
$$x = \mu + \frac{1}{\alpha} [-\ln[-\ln(P)]] \quad [8.9]$$

En el caso de la distribución de *Weibull* de tres parámetros [8.2] resulta:

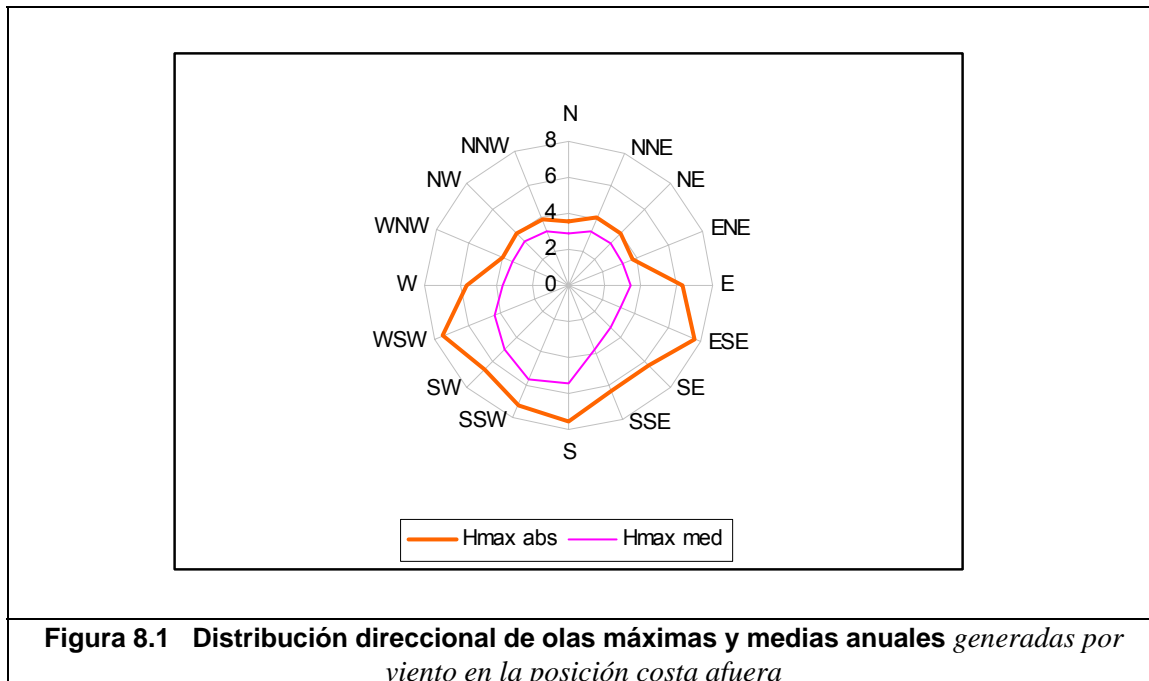
$$x = \varepsilon + \beta [-\ln(P)]^{1/\alpha} \quad [8.10]$$

Debe tenerse en cuenta que el período de retorno Tr se relaciona con la probabilidad según $Tr=1/P$.

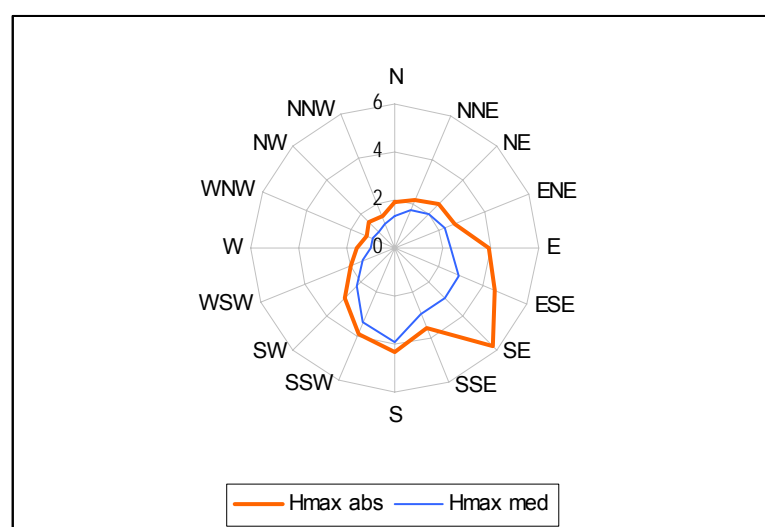
8.2 Olas Costa Afuera

Los gráficos de las **Figuras 8.1 a 8.3** muestran la distribución direccional de los valores máximos absolutos y máximos medios en el período de 15 años en la posición costa afuera (44°S, 63°30'W). Resulta evidente que Puerto Lobos se encuentra en una posición resguardada del oleaje más intenso de todo el sector SE por la Península de Valdez.

La **Figura 8.1** muestra que el oleaje generado por vientos locales presenta en esta ubicación máximos anuales de H_s dominantes con un valor máximo de $H_s= 7,60$ m.



En cuanto a las olas oceánicas (*swell*) (**Figura 8.2**) el valor máximo determinado es de $H_s=5,86$ m y las condiciones medias más severas corresponden al sector S, aunque el máximo absoluto ocurrido en los 15 años analizados correspondió a la dirección SE. Aún en esta posición costa afuera el efecto continental resulta claramente identificable para los sectores SW hasta el NE .



Teniendo en cuenta la orientación de la ubicación de Puerto Lobos, fueron seleccionadas para el análisis nueve series de datos de olas generadas por vientos locales (N a S inclusive) y ocho series de datos de olas oceánicas (desde NNE hasta S). Cada una de las series está constituida por *valores máximos anuales de Hs* correspondientes a una dirección determinada, extraídos del registro provisto por ARGOSS y para el período de 15 años comprendido entre 1/1/1992 al 31/12/2006. Las series de datos se indican en las **Tablas 8.1. y 8.2.**

Para poder estimar los parámetros de ajuste de las funciones de Gumbel y de Weibull para las series de datos presentados en las **Tablas 8.1 y 8.2** se aplicó en este caso el *método de máxima verosimilitud.*

Tabla 8.1. Olas locales – Hs máxima anual por dirección

Año	Dirección								
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
1992	2.32	4.13	4.07	3.51	2.43	1.71	3.01	3.15	5.82
1993	2.88	3.17	2.84	2.47	2.79	2.73	3.24	2.6	3.52
1994	2.95	2.95	2.52	2.74	2.31	1.8	1.51	3.47	4.75
1995	2.59	2.5	2.63	3.73	4.27	1.47	2.28	3.07	4.9
1996	2.81	3.06	2.52	2.59	4.09	4.72	1.54	2.75	4.99
1997	3.13	3.33	3.82	2.5	6.31	7.61	2.87	4.13	7.51
1998	2.69	2.83	3.75	3.54	4.03	2.87	4.05	4.1	4.84
1999	3.36	4.02	3.98	2.62	2.41	2.75	2.8	3.89	6.29
2000	2.82	3.05	2.55	2.87	3.09	1.95	3.72	3.14	5.78
2001	2.95	2.8	3.33	3.63	1.81	3.74	3.43	3.03	5.33
2002	2.96	2.92	3.36	3.7	3.25	3.65	6.25	6.33	5.43
2003	2.81	3.76	3.29	3.92	2.15	3.37	3.71	4.3	6.59
2004	2.65	3.09	3.2	3.03	3.61	2.35	3.26	4.24	5.31
2005	3.56	3.47	2.83	3.89	3.52	1.37	2.78	4.3	4.81
2006	3.32	3.29	3.71	3.52	4.84	4.18	4.81	4.72	5.95

Tabla 8.2. – Olas oceánicas - Hs máxima anual por dirección

Año	Dirección							
	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
1992	1.75	2.16	1.91	1.92	2.97	3.7	3.05	4.25
1993	1.71	2.59	2.36	2.23	2.57	3.2	2.27	3.72
1994	1.61	1.65	1.96	1.69	1.64	2.31	2.99	4.31
1995	1.53	1.82	1.73	3.95	2.97	2.9	2.69	3.99
1996	1.58	1.97	1.88	3.52	2.54	2.05	3.37	4.12
1997	1.65	1.97	2.48	2.15	4.5	2.44	3.48	4.19
1998	1.71	1.61	2.58	2.73	2.67	2.03	3.03	3.55
1999	1.66	2.04	1.97	2.02	2.6	2.55	3.16	3.5
2000	1.55	1.91	2.41	1.93	2.62	3.11	3.18	3.51
2001	1.76	1.91	2.37	2.19	2.59	2.4	2.98	3.62
2002	1.93	1.95	2.5	1.91	4.31	5.86	2.4	3.77
2003	1.63	2.06	1.98	2.47	3.86	3.77	3.46	3.99
2004	1.75	2.36	2.52	2.88	2.79	1.88	2.51	4.37
2005	1.97	1.81	1.86	2.35	2.14	2.17	3.35	4.08
2006	2.2	1.86	2.64	1.62	2.69	3.43	3.59	4.29

Olas de viento

La **Tabla 8.3** muestra el resultado del procedimiento de ajuste para las 9 series analizadas, indicando el valor estimado para los parámetros de ambas funciones de probabilidad y el resultado del test de Kolmogorov-Smirnov utilizado para evaluar la bondad del ajuste.

Tabla 8.3. Golfo San Matías - Ajuste para olas generadas por viento

Dirección	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
Función	Weibull	Gumbel	Weibull	Weibull	Weibull	Gumbel	Gumbel	Weibull	Gumbel
Parámetros estimados	$\alpha = 2.5589$	$\alpha = 2.7779$	$\alpha = 3.3220$	$\alpha = 7.3983$	$\alpha = 1.5996$	$\alpha = 0.94393$	$\alpha = 1.0256$	$\alpha = 1.4142$	$\alpha = 1.3689$
	$\beta = 0.8624$	$\mu = 3.0193$	$\beta = 1.8602$	$\beta = 3.4397$	$\beta = 2.0786$	$\mu = 2.4217$	$\mu = 2.7457$	$\beta = 1.4543$	$\mu = 5.0331$
	$\varepsilon = 2.1544$		$\varepsilon = 1.5575$	$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = 1.5304$			$\varepsilon = 2.4821$	
Estadístico D_{max}	0.11967	0.0836	0.1312	0.2126	0.0776	0.1077	1.0256	0.1239	0.1398
Resultado del test ($\alpha = 0.05$)	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza

En cada caso se observaron los valores correspondientes para el estadístico del test de Kolmogorov obtenidos para las funciones de Gumbel y Weibull, y se decidió estimar los valores de Hs asociados a distintos Tr utilizando la función que presentara en cada caso el menor valor de D_{max}.

Conocidos los parámetros del ajuste, el uso de la función inversa permite entonces determinar el valor probable de x (H_s) para un determinado período de retorno a partir de [8.9] y [8.10]

Tabla 8.4 Golfo San Matías - Altura probable de ola generada por viento)

Tr (años)	Dirección								
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
2	2.90	3.15	3.22	3.27	3.18	2.81	3.10	3.61	5.30
5	3.19	3.56	3.70	3.67	4.33	4.01	4.21	4.53	6.13
10	3.35	3.83	3.95	3.85	5.03	4.81	4.94	5.12	6.68
20	3.48	4.09	4.15	3.99	5.66	5.57	5.64	5.66	7.20
50	3.62	4.42	4.36	4.14	6.41	6.56	6.55	6.32	7.88
100	3.72	4.68	4.50	4.23	6.93	7.30	7.23	6.79	8.39

Las máximas olas debidas al viento local estimadas para un período de retorno de 100 años proceden del sector S con una altura significativa $H_s = 8,4$ m.

Olas Oceánicas

Las **Tablas 8.5 y 8.6** muestran los resultados para olas oceánicas. En cada caso se indica la función que mejor ajustó los datos, el valor de los parámetros de la función y el resultado del test de bondad del ajuste.

Tabla 8.5. Golfo San Matías - Parámetros de ajuste para olas oceánicas

Dirección	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
Función	Gumbel	Gumbel	Weibull	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Weibull	Weibull
Ajuste de parámetros	$\alpha = 8,43$ $\mu = 1,66$	$\alpha = 5,13$ $\mu = 1,87$	$\alpha = 1,902604$ $\beta = 0,6319502$ $\varepsilon = 1,6488851$	$\alpha = 2,2888$ $\mu = 2,0946$	$\alpha = 1,6695$ $\mu = 2,5598$	$\alpha = 1,5687$ $\mu = 2,5104$	$\alpha = 9,65088$ $\beta = 3,20134$ $\varepsilon = 0$	$\alpha = 4,09252$ $\beta = 1,159607$ $\varepsilon = 2,90322$
Dmax	0.07799	0.11018	0.18784	0.09404	0.19788	0.11391	0.09093	0.10520
Resultado del Test ($\alpha=0.05$)	no se rechaza	no se rechaza	no se rechaza	no se rechaza	no se rechaza	no se rechaza	no se rechaza	no se rechaza

Tabla 8.6. Golfo San Matías - Valores de Hs (m) asociados a distintos períodos de retorno para olas oceánicas

Tr (años)	Dirección							
	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
2	1.70	1.94	2.17	2.25	2.78	2.74	3.08	3.96
5	1.84	2.16	2.46	2.75	3.46	3.47	3.36	4.21
10	1.93	2.31	2.63	3.08	3.91	3.94	3.49	4.32
20	2.01	2.45	2.77	3.39	4.34	4.40	3.59	4.42
50	2.12	2.63	2.94	3.80	4.90	5.00	3.69	4.52
100	2.20	2.76	3.06	4.10	5.32	5.44	3.75	4.59

Dado que este análisis fue realizado con series de datos constituidas por 15 valores (máximos anuales del período 1992-2006) es preciso señalar que los valores estimados para períodos de retorno prolongados, como es el caso de Tr=50, se encuentran asociados a una incertidumbre natural mayor. El máximo valor estimado corresponde a la dirección SE y resulta de 5,4 m para 100 años.

8.3 Olas extremas en el área costera

En el área costera se realizó un análisis equivalente a partir de las series de máximos anuales (Tablas 8.6 y 8.7), mediante la aplicación de las funciones de Weibull y Gumbel y distintas técnicas para el ajuste de los parámetros de la función.

Tabla 8.6. Olas locales en Puerto Lobos. Máximos anuales

AÑO	Hmax	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
1992	3.17	0	0.37	1.66	3.17	2.98	0.95	0	0	0
1993	2.43	0	0.5	1.84	2.25	2.43	1.34	0	0	0
1994	2.38	0	0.4	1.62	2.05	2.38	1.11	0	0	0
1995	3.68	0	0.47	1.57	2.09	3.68	1.09	0	0	0
1996	3.47	0	0.39	1.42	2.1	3.47	1.14	0	0	0
1997	5.33	0	0.39	1.56	2.99	5.33	1.21	0	0	0
1998	3.5	0	0.31	1.42	2.93	3.5	1.33	0	0	0
1999	3.11	0	0.32	1.68	3.11	2.3	1.26	0	0	0
2000	2.69	0	0.31	1.41	2.17	2.69	1.21	0	0	0
2001	3.03	0	0.45	1.54	2.6	3.03	1.13	0	0	0
2002	3.46	0	0.26	1.48	2.63	3.46	1.35	0	0	0
2003	3.27	0	0.39	1.41	2.58	3.27	1.34	0	0	0
2004	3.14	0	0.36	1.37	2.51	3.14	1.44	0	0	0
2005	3.21	0	0.43	1.75	2.26	3.21	0.89	0	0	0
2006	4.12	0	0.32	1.62	2.9	4.12	1.27	0	0	0

Tabla 8.7 Olas oceánicas en Puerto Lobos – Máximos anuales

AÑO	Hmax	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
1992	1.07	0	0	0	1.07	1.03	0	0	0	0
1993	1.29	0	0	0	1.16	1.29	0	0	0	0
1994	1.11	0	0	0	1.11	0.98	0	0	0	0
1995	1.96	0	0	0	0.83	1.96	0	0	0	0
1996	1.76	0	0	0	0.9	1.76	0	0	0	0
1997	1.5	0	0	0	1.02	1.5	0	0	0	0
1998	1.42	0	0	0	0.95	1.42	0	0	0	0
1999	1.1	0	0	0	1.1	1.1	0	0	0	0
2000	1.35	0	0	0	0.92	1.35	0	0	0	0
2001	1.3	0	0	0	1.01	1.3	0	0	0	0
2002	1.42	0	0	0	1	1.42	0	0	0	0
2003	1.29	0	0	0	1.01	1.29	0	0	0	0
2004	1.45	0	0	0	1.07	1.45	0	0	0	0
2005	1.17	0	0	0	1.05	1.17	0	0	0	0
2006	1.46	0	0	0	0.98	1.46	0	0	0	0

La **Tabla 8.8** muestra los parámetros de las funciones para el caso de olas locales. Los valores tabulados son los que presentaron el menor valor de la divergencia D en el test de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 8.8 –Puerto Lobos. Olas locales Ajuste de los datos

Dirección	NNE	NE	ENE	E	ESE
Función	Weibull	Weibull	Gumbel	Gumbel	Weibull
Parámetros estimados	$\alpha = 2.6567$ $\beta = 1.7720$ $\varepsilon = 0.2206$	$\alpha = 2.2985$ $\beta = 0.3417$ $\varepsilon = 1.2539$	$\alpha = 3.1189$ $\mu = 2.3711$	$\alpha = 1.7783$ $\mu = 2.9368$	$\alpha = 9.1642$ $\beta = 1.2439$ $\varepsilon = 0.0251$
Estadístico Dmax	0.0184	0.066	0.113	0.107	0.048
Resultado del test ($\alpha = 0.05$)	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza

La **Tabla 8.9** resume las alturas de ola probables en el área costera para distintos períodos de retorno. La profundidad en la posición de cálculo es de 10,6 m bajo el 0 MOP.

Tabla 8.9 –Puerto Lobos. Olas locales

Tr (años)	Hs(m)				
	NNE	NE	ENE	E	ESE
2	0.38	1.55	2.49	3.14	1.22
5	0.43	1.67	2.85	3.78	1.34
10	0.46	1.75	3.09	4.20	1.39
20	0.49	1.80	3.32	4.61	1.43
50	0.52	1.87	3.62	5.13	1.47
100	0.54	1.92	3.85	5.52	1.49

Intervalo de confianza

Para establecer el intervalo de confianza en el caso del ajuste mediante la función de Gumbel, se utilizó la expresión:

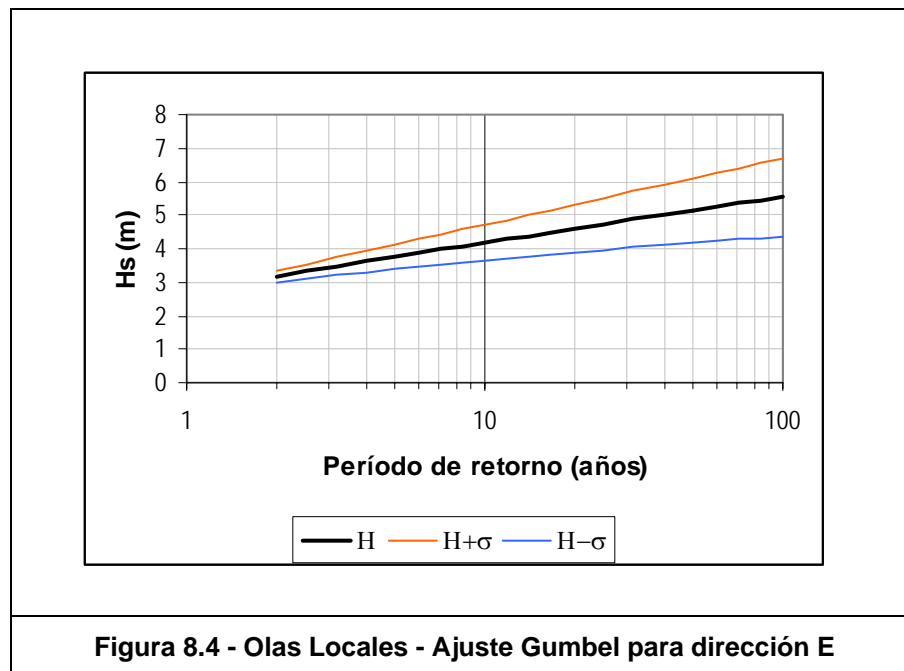
$$\text{var}[x_r] = \left[\frac{\sigma^2}{N} \right] \left(1 + 1.1396(y_r - \gamma)\sqrt{6/\pi} + 1.000(y_r - \gamma)^2 \pi^2 / 6 \right) \quad [8.11]$$

donde N es el número de datos de la muestra, σ el desvío standard, γ la constante de Euler. Y_R es la variable reducida dada por:

$$y_r = F^{-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda T_r} \right) \quad [8.12]$$

siendo λ el número de eventos por año (en este caso $\lambda=1$).

La **Figura 8.4** muestra el ajuste de datos para la dirección E y el intervalo de confianza estimado.



Con igual metodología se evaluaron los valores extremos probables de las olas oceánicas. El Método de Máxima Verosimilitud aplicado a las series direccionales indicó que los mayores valores corresponden a la dirección E.

En la **Tabla 8.10** se presentan los resultados de los ajustes efectuados.

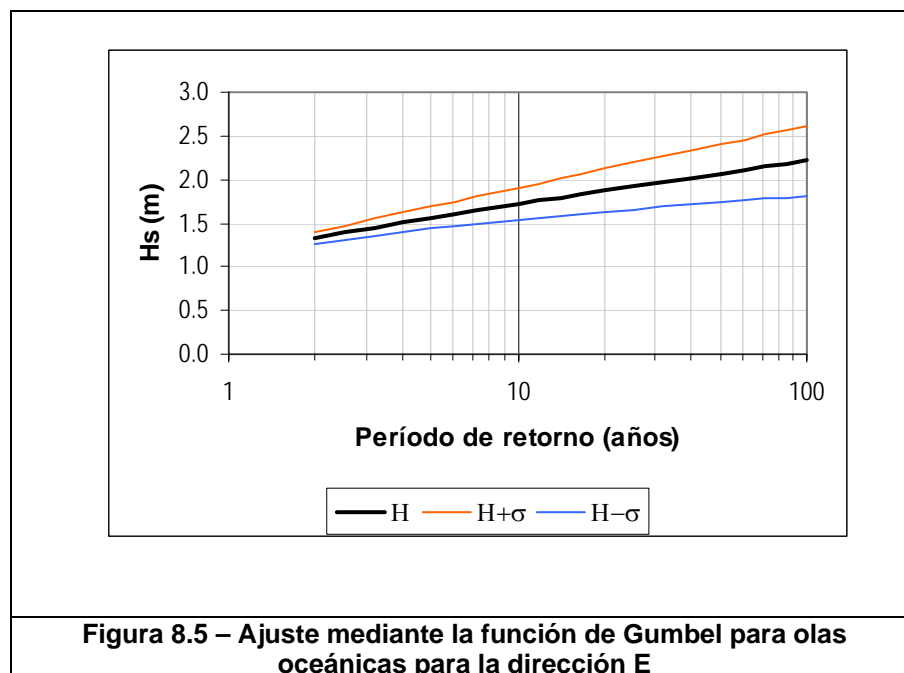
Tabla 8.10 – Puerto Lobos . Ajuste de parámetros para olas oceánicas		
Dirección	ENE	E
Función	Weibull	Gumbel
Parámetros estimados	$\alpha = 6.2040$	$\alpha = 4.781$
	$\beta = 0.4998$	$\mu = 1.2481$
	$\varepsilon = 0.5475$	
Estadístico D_{max}	0.037	0.087
Resultado del test ($\alpha = 0.05$)	No se rechaza	No se rechaza

En la **Tabla 8.11** se muestra los valores probables de altura de olas oceánicas para distintos períodos de retorno.

Tabla 8.11 – Puerto Lobos . Altura de olas oceánicas para distintos períodos de retorno

Tr	Hs (m)	
	ENE	E
2	1.02	1.32
5	1.09	1.56
10	1.12	1.72
20	1.14	1.87
50	1.17	2.06
100	1.19	2.21

La **Figura 8.5** muestra la distribución probable de altura significativa de olas oceánicas para distintos períodos de retorno, y el intervalo de confianza estimado mediante [8.11].



8.4 Consideraciones sobre la ola de diseño

La ola de diseño es la escogida por el proyectista para dimensionar una estructura o evaluar sus aspectos funcionales. La determinación de la ola de diseño H_d para una estructura se basa usualmente en el análisis estadístico de mediciones o estimaciones de olas de largo plazo. Un modo implícito de establecer un margen de seguridad es adoptando un *período de retorno* T_r para la carga de diseño. Si se escoge un período de retorno de 100 años para caracterizar la ola de diseño, es decir $H_d = H^{100}$, esto significa que *en promedio H_d será excedida una vez cada 100 años*. Pero mediante este concepto no se puede evaluar el riesgo a que está sometida la obra o la probabilidad de que ocurra ese evento dentro de su vida útil L .

Si se introduce el concepto de *probabilidad de encuentro* p , es decir la probabilidad de que la ola de diseño (asociada al período de retorno T_r) sea superada durante la vida útil L de la estructura, puede estimarse que p se expresa como (Burcharth, 1996):

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T_R}\right) \quad [8.13]$$

Esta expresión tiene en cuenta el carácter aleatorio de los eventos extremos en la vida útil de la estructura. Si el período de retorno T_r del evento de diseño es el doble que la vida útil de la obra, la probabilidad de encuentro resulta próxima al 40%. Según [8.13] la probabilidad de encuentro puede reducirse a 28 % si el periodo de retorno escogido para la ola de diseño triplicara a la vida útil.

Si se asume que la altura de ola H responde a la distribución de Gumbel o Weibull cuyos parámetros de ajuste han sido estimados, la utilización de [8.13] permite establecer una altura de ola de diseño H_d con una probabilidad predeterminada de no ser superada en la vida útil de la estructura.

Siguiendo este procedimiento, el valor de p impuesto por el proyectista permite incorporar aspectos técnicos, económicos y de seguridad deseables para la estructura. Un ejemplo para el caso de olas generadas por viento del sector E (**Tabla 8.8**), una vida útil $L=20$ años y el ajuste realizado mediante la función de Gumbel (cuyos parámetros se han indicado en la **Tabla 8.7**) se muestra en la **Figura 8.6**.

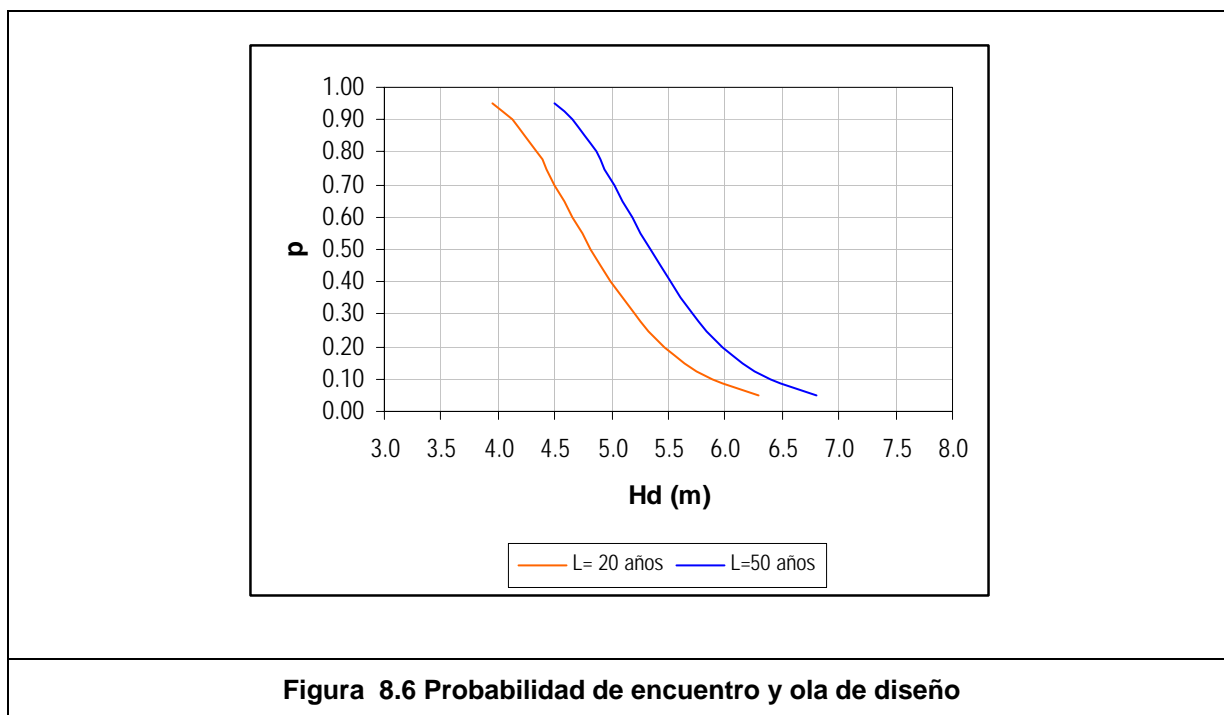


Figura 8.6 Probabilidad de encuentro y ola de diseño

Si la ola de 5,1 m correspondiente a $T_r=50$ años de la **Tabla 8.8** es adoptada como ola de diseño, ello equivaldrá a una probabilidad de encuentro cercana a 40% en el curso de la vida útil de la estructura, considerada de 20 años en el ejemplo. La elección de la ola asociada a un período de retorno de 100 años ($H_s=5,5$ m en la **Tabla 8.8**) muestra que la probabilidad de encuentro estimada se reduce a 20% (**Figura 8.6**). La aceptación o no de estos riesgos implica la evaluación de un conjunto de aspectos del proyecto.

Si la vida útil de la estructura fuese fijada en 50 años y el riesgo admisible fuese $p=0.10$ será necesario dimensionar la estructura con $H \approx 6,4$ m (**Figura 8.6**).

Aunque esta metodología constituye un avance hacia un enfoque probabilístico consistente, no permite la determinación del *grado de confianza* (o la probabilidad de falla) del proyecto, lo que puede ser abordado mediante la aplicación de métodos probabilísticos.

Los métodos probabilísticos se fundamentan en la incorporación en el diseño de las incertezas, tanto de las cargas involucradas como de las variables resistentes, las que son consideradas como variables aleatorias.

9 TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL

Cuando el oleaje incide oblicuamente a las líneas batimétricas, las fuerzas del flujo oscilatorio que actúan sobre el fluido (tensión de radiación o radiation stress) en la zona de rompiente son generadoras de una sobreelevación del nivel hacia la playa (wave set-up) por una parte y por la otra en una corriente longitudinal (longshore current) paralela a la costa. Se denomina transporte sólido longitudinal (Q_L) al volumen de sedimento que se mueve por unidad de tiempo paralelamente a la línea de costa debido a esa corriente longitudinal. Su magnitud, y las características de su distribución espacial, constituyen uno de los datos esenciales en la mayoría de los problemas que se presentan en la ingeniería de costas.

El transporte del sedimento puede ser de dos formas diferentes: por arrastre sobre el fondo o transporte en suspensión. La cantidad de material transportado en suspensión o por arrastre depende en gran medida de la forma de la playa. El tipo de transporte de sedimentos también depende en gran medida de los períodos del oleaje y del tamaño del sedimento. Así, en playas de gravas el transporte predominante es por arrastre.

A lo largo del tiempo la dirección de incidencia del oleaje sobre la playa sufre cambios, variando consecuentemente la intensidad y/o el sentido del transporte. Luego, se denomina transporte longitudinal bruto (Q_{LB}) a la cantidad de total de material transportado por unidad de tiempo en ambos sentidos, y transporte longitudinal neto (Q_{LN}) a la diferencia entre el volumen de material transportado en uno y otro sentido por unidad de tiempo.

Cabe destacar que el transporte sólido longitudinal es fluctuante y el valor que se calcula en forma teórica corresponde a un valor medio. Es decir, el volumen transportado en un período de tiempo determinado (mes, año, etc.).

9.1 Método de cálculo del transporte sólido longitudinal (QL)

Un modelo ampliamente utilizado para el cálculo del transporte sólido longitudinal (transporte litoral) es el desarrollado por el CERC². Para esta formulación, el caudal de transporte depende de la altura de ola significativa en rotura, el ángulo de incidencia del

² COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, US ARMY Corps of Engineers

frente de ola, la densidad relativa del material y un factor de calibración (K), que a su vez depende del tipo de sedimento y se obtiene de manera experimental.

La expresión de cálculo propuesta por el CERC resulta la siguiente:

$$Q_l = \frac{K}{(S-1)(1-p)} * \sqrt{\frac{g}{k}} * H_{sb}^{5/2} * \text{sen}(2\alpha_b) * f(H_o, \alpha_b) \quad [9.1]$$

Donde:

Q_l : caudal de transporte de sedimento [m^3/s]

K: coeficiente de transporte

S: densidad relativa del sedimento

H_{sb} : altura de ola significativa en rotura

α_b : ángulo de incidencia del frente de ola

k: índice de rotura

La facilidad con la que se puede aplicar esta fórmula ha hecho que el método del CERC para el cálculo del transporte litoral se encuentre ampliamente difundido en la literatura internacional. Sin embargo, en la actualidad existen otras expresiones de cálculo que habiendo sido utilizadas en numerosas aplicaciones de distintas regiones del planeta han obtenido excelentes resultados.

Damgaard y Soulsby³ desarrollaron un modelo en donde el transporte principal es por arrastre. Dicho modelo, desarrollado en las costas de Inglaterra, es aplicable a playas de gravas y cantos rodados (shingle beaches), sirviendo además para calcular la componente de arrastre de fondo en el transporte de playas de arena.

El modelo se basa en las ecuaciones de la tensión tangencial de fondo, calculada a partir del gradiente de la tensión de radiación en la zona de rompiente. Considera además la tensión tangencial debida a la velocidad orbital de la ola y presenta la ventaja de incorporar en el cálculo, de manera explícita, el tamaño del grano y el período del oleaje en las ecuaciones de cálculo.

A continuación se presentan las ecuaciones básicas del caudal de transporte. El método completo se puede encontrar en la bibliografía antes citada.

³ *Longshore bed – load transport*. Damgaard, J.S. and Soulsby, R. L. (1997, 25th Int. Conf. Coastal Eng., Orlando, 3, pp. 3614 – 3627. ASCE)

$$Q_{LS} = \text{Máx.}[Q_{LS1}; Q_{LS2}] \quad [9.2]$$

$$Q_{LS1} = \frac{0,19(g \tan \beta)^{1/2} \text{sen}(2\alpha_b)^{3/2} H_{sb}^{5/2} (1 - \hat{\theta}_{cr})}{12(S-1)(1-p)} \quad \text{para } \hat{\theta}_{cr} < 1$$

$$Q_{LS1} = 0 \quad \text{para } \hat{\theta}_{cr} \geq 1$$

$$Q_{LS2} = \frac{0,24 f(\beta) g^{3/8} d_{50}^{1/4} H_{sb}^{19/8}}{12(S-1)(1-p)(T)^{1/4}} \quad \text{para } \theta_{wr} \geq \theta_{wsf}$$

$$Q_{LS2} = \frac{0,046 f(\beta) g^{2/5} H_{sb}^{13/5}}{12(S-1)^{6/5} (1-p)(\pi T)^{1/5}} \quad \text{para } \theta_{wr} < \theta_{wsf}$$

Donde:

$$\hat{\theta}_{cr} = f(\theta_{cr}, S, d_{50}, \beta, H_b, \alpha_b)$$

$$\theta_{wr}; \theta_{wsf} = f(S, d_{50}, \beta, H_b, \alpha_b)$$

θ_{cr} = parámetro límite de Shields

9.2 Aplicación en Puerto Lobos

En este estudio se utilizó el modelo de Damgaard y Soulsby para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos. Luego se comparan los resultados obtenidos, con los obtenidos por medio de la fórmula del CERC con una corrección del coeficiente de transporte **K**.

La aplicación se realizó para un diámetro medio $d_{50} = 4.25\text{mm}$, densidad del sólido $\gamma_s = 2625 \text{ Kg/m}^3$ y una porosidad de 0.35, en base a una estimación con datos de campo.

9.2.1 Orientación de la playa

Debido a que el caudal de transporte de sedimentos depende fundamentalmente del ángulo de incidencia del oleaje, y siendo que éste varía sustancialmente con el cambio de orientación de la costa, la aplicación de la fórmula requirió de la subdivisión de la zona de

Puerto Lobos en 13 tramos costeros, para los cuales se supuso una orientación constante y se realizó el cálculo puntual del valor de Q_{SL} correspondiente (**Figura 9.1**).

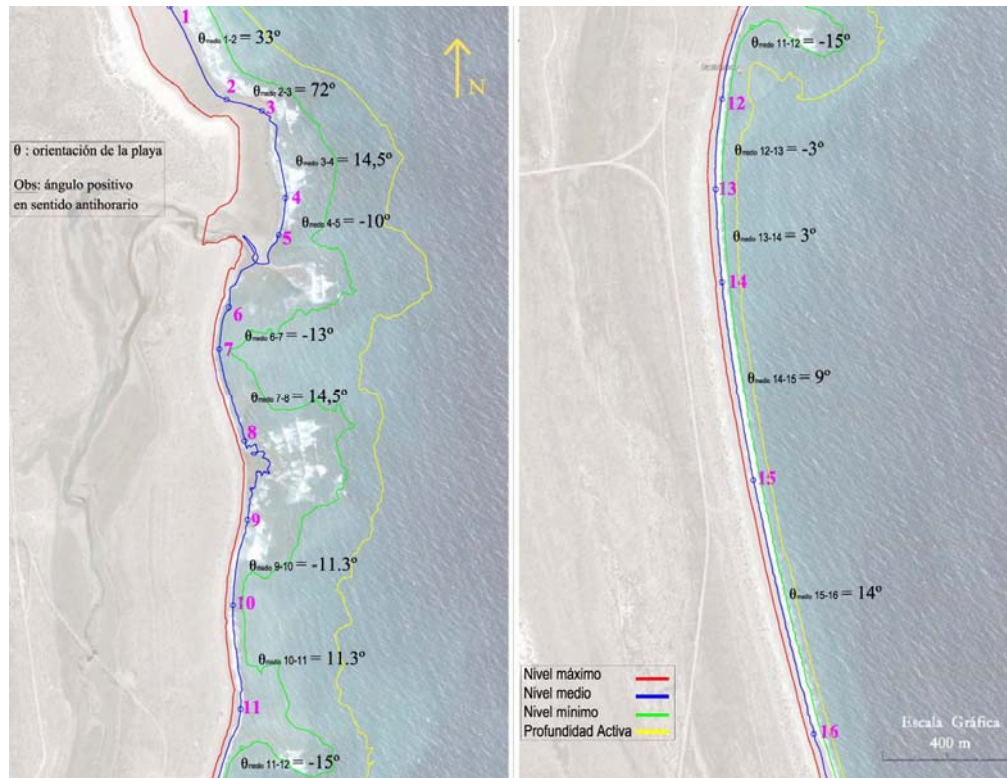


Figura 9.1: División de la costa en 15 tramos. (Orientaciones respecto al norte)

Cabe destacar, que la zona de mayor interés en este estudio, es la comprendida entre los puntos 9 y 16, la cual posee una extensión de 3000m. La zona comprendida entre los puntos 1 y 8, se analiza con el fin de tener una mejor comprensión de la situación global del sistema. La longitud del tramo costero 1 a 8 es de 1500m.

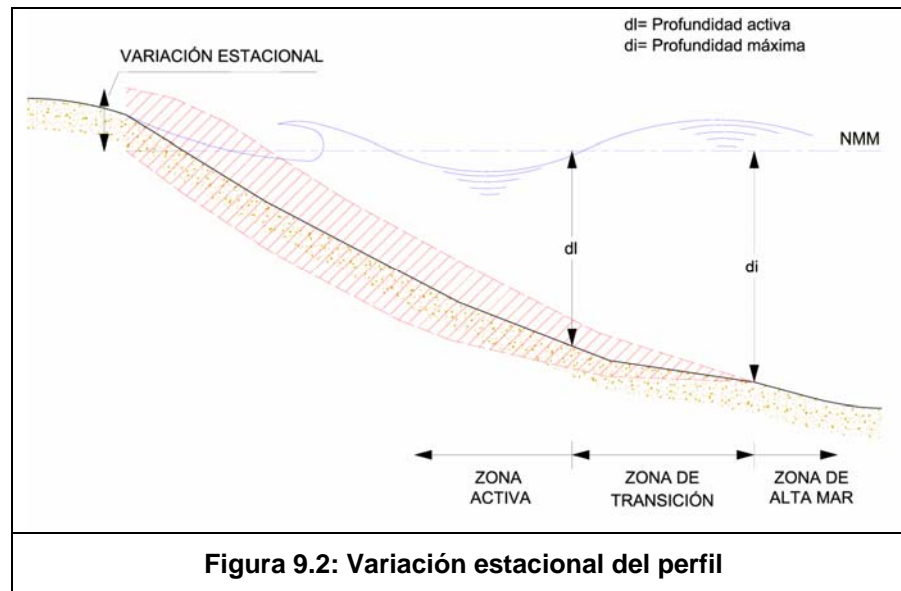
9.2.2 Características del perfil de la playa

La forma que adquiere el perfil de la costa es consecuencia, especialmente, tanto del transporte sólido longitudinal tanto como transversal, debidos ambos a la acción del oleaje.

El transporte de sedimentos no se efectúa igual en todo el perfil. El perfil de la playa se puede dividir en tres zonas, según la movilidad del material⁴:

⁴ *Guía técnica de estudios litorales*. José Manuel de la Peña Olivas – Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y puertos – Pag.304.

- Zona activa, o litoral
- Zona de transición
- Zona de altamar



La zona activa se extiende desde la línea de costa hasta una profundidad d_l , y es donde se produce el máximo movimiento de transporte longitudinal (**Figura 9.2**).

Para el cálculo de la misma se aplicó el modelo de Hallermeier, corregido por Birkemeier con datos de campo:

$$d_l = 1.75H_{s;0.137} - 5.79 \left(\frac{H_{s;0.137}^2}{gT_s^2} \right) \quad [9.3]$$

Donde $H_{s;0.137}$ es la altura de ola significativa con una frecuencia de excedencia del 0.137%, es decir de 12 horas al año.

Este modelo sirve para estimar la zona de mayor transporte y a partir de ese dato determinar las pendientes promedio de cada tramo, necesaria para el cálculo. De la aplicación de la ecuación [9.3], surge que la cota de la profundidad activa es -6.06m (MOP), ver **Figura 9.1**.

En la siguiente tabla se presentan las pendientes medias de la playa para cada tramo en estudio:

Tabla 9.1: Pendiente media de la playa para cada tramo

<i>Tramo</i>	<i>Pendiente</i>
1 – 2	1 en 36
2 – 3	1 en 30
3 – 4	1 en 56
4 – 5	1 en 49
6 - 7	1 en 69
7 - 8	1 en 67
9 – 10	1 en 56
10 - 11	1 en 48
11 – 12	1 en 62
12 – 13	1 en 12
13 – 14	1 en 9
14 – 15	1 en 8
15 – 16	1 en 8

Se observa que la pendiente aumenta en forma considerable a partir del punto 11 hacia el sur. Esto se debe a que dependiendo de sus características físicas, la playa se comporta de diferente manera respecto al oleaje que incide sobre ella.

Para realizar un análisis cualitativo del tipo de perfil medio de playa, se puede aplicar el modelo de Nayak modificado por Masselink y Short para playas con marea⁵.

Este modelo incorpora las características del grano, las condiciones predominantes de oleaje, y la amplitud de marea. Luego por medio de dos parámetros adimensionales, permite clasificar el tipo de perfil de playa (**Figura 9.3**).

Los parámetros adimensionales son:

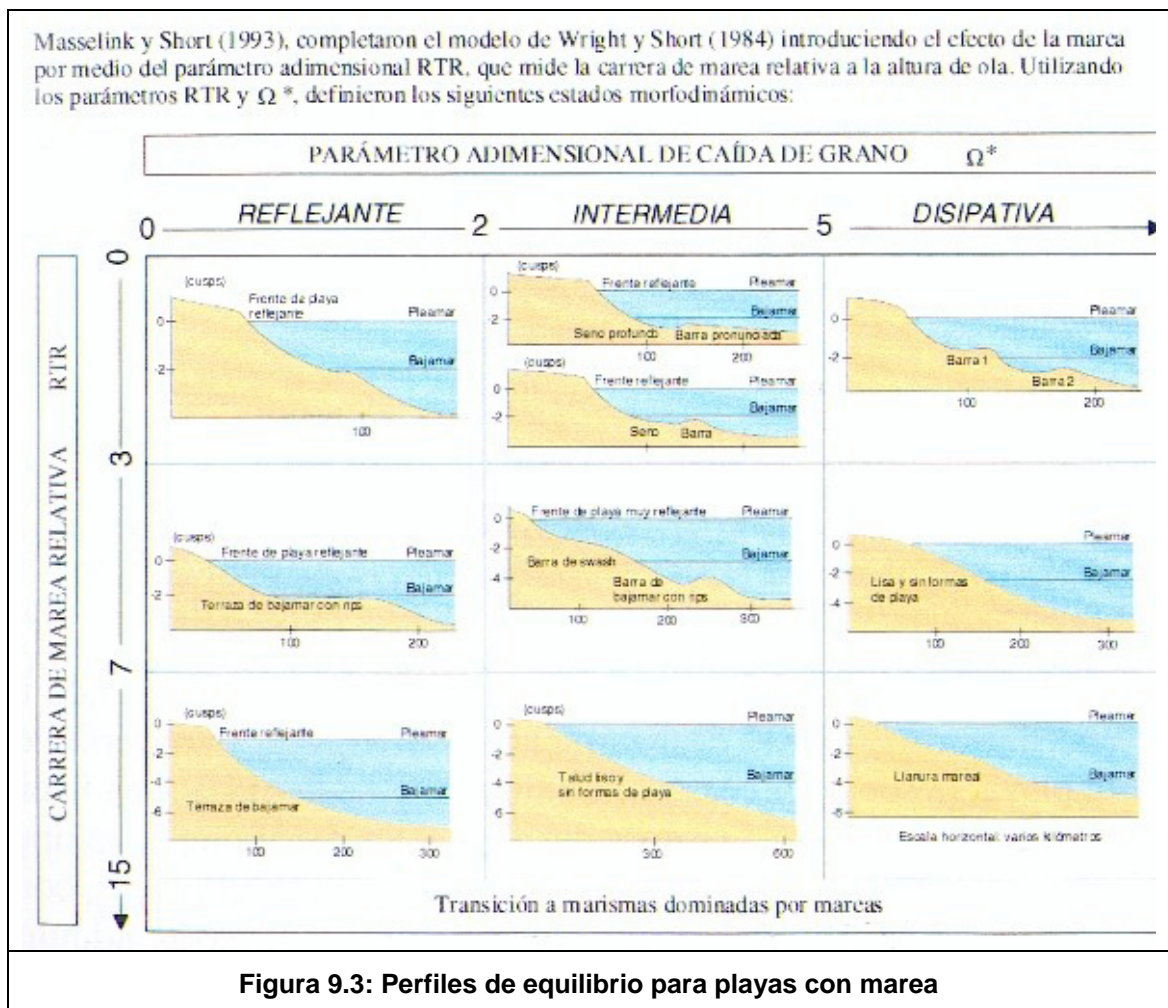
$$RTR = \frac{MSR}{H_b} ; \quad \Omega^* = \frac{H_b}{\omega T} \quad [9.4]$$

Donde:

- RTR = Carrera de marea relativa
- Ω^* = parámetro adimensional de caída del grano
- MSR = Amplitud o carrera de marea
- H_b = altura de ola significativa en rotura
- T = período pico

⁵ *Guía técnica de estudios litorales*. José Manuel de la Peña Olivas – Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y puertos – Pag.311

ω = velocidad de caída del grano



Para un tamaño de grano $d_{50} = 4.25\text{mm}$, $H_b = 2.72\text{m}$, $T_p = 10.9\text{seg}$ y $\text{MSR} = 5.72$, se obtienen:

$$\Omega^* = H_b/\omega T = 0.88\text{m}; \text{RTR} = \text{MSR}/H_b = 2.11$$

Con lo cual el perfil de la playa resulta: *Reflejante con terraza de bajar y formación de cusps* (ver **Figura 9.3**, primera columna, primera fila.)

Este modelo coincide satisfactoriamente con lo observado en el tramo 11 a 16, ya que es una playa con zona de rompiente pequeña y próxima a la costa, con una playa mojada y zona del estrán relativamente estrechos (**Figura 9.4**).



Figura 9.4a: Playa Reflejante con terraza de bajamar y formación de cusps (Puerto Lobos, tramo 12 – 13)

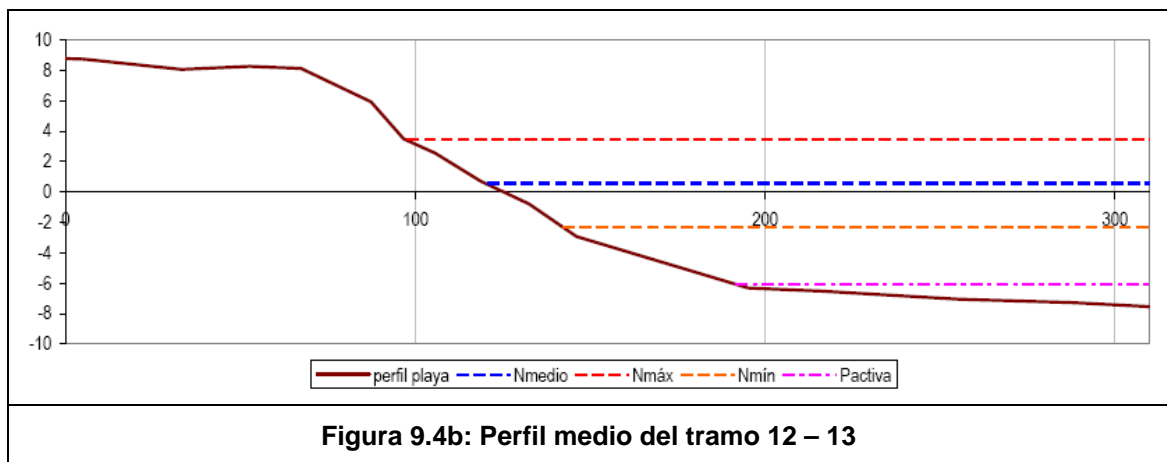


Figura 9.4b: Perfil medio del tramo 12 – 13

Cabe destacar que el modelo utilizado para la descripción del estado morfodinámico de la playa, no es aplicable al tramo costero entre los puntos 3 y 9, ya que existen afloramientos rocosos que actúa como un filtro natural del oleaje, disipando por rotura y fricción del fondo la energía de las olas más altas y limitando el tiempo durante el cual la acción marina actúa sobre la costa.

9.2.3 Clima de olas

Las ecuaciones de transporte de sedimentos fueron aplicadas para un registro de datos que representan el clima medio anual de olas y se encuentran agrupados en un conjunto de matrices, cada una de ellas asociada a un rango de dirección de incidencia del oleaje, conformadas por valores de Hs y Tm con una frecuencia de ocurrencia determinada. Estos datos corresponden a los resultados obtenidos en el **Capítulo 7 Clima de Olas en el Area Costera**. Las **Tablas V-1 a V-10**, ubicadas en el **Anexo V**, muestran la matrices de datos utilizadas tanto para olas generadas por vientos locales como para las olas oceánicas.

9.3 Modelo de Soulsby

En la **Tabla 9.2** se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de transporte de Soulsby, indicándose para cada tramo de costa el valor de transporte sólido anual. Estos resultados señalan la existencia de una tasa de transporte claramente dominante desde el N hacia el S desde el perfil 3 hacia el sur, debida básicamente a la contribución de las olas generadas por vientos locales desde el NE y ENE.

Tabla 9.2: Resultados del transporte sólido longitudinal

tramo	orientación (°)	QL hacia el sur (m³/año)	QL hacia el Norte (m³/año)	QL bruto (m³/año)	QL neto (m³/año)	QL relativo
1 a 2	33.75	-2117	25424	27541	23307	-0.47
2 a 3	72.00	0	49529	49530	49529	-0.99
3 a 4	14.50	-12031	7962	19993	-4069	0.08
4 a 5	-10.00	-43095	452	43547	-42642	0.85
6 a 7	-13.00	-49332	2604	51936	-46728	0.94
7 a 8	14.50	-12031	7962	19993	-4069	0.08
9 a 10	-11.25	-36511	1878	38388	-34633	0.69
10 a 11	11.25	-15463	5430	20893	-10033	0.20
11 a 12	-15.00	-41545	20	41564	-41525	0.83
12 a 13	-3.00	-51144	1186	52330	-49958	1.00
13 a 14	3.00	-45443	2133	47576	-43310	0.87
14 a 15	9.00	-33966	3086	37052	-30880	0.62
15 a 16	14.50	-20778	15077	35855	-5701	0.11

Con el propósito de facilitar la interpretación de estos resultados, en la **Figura 9.5** se presenta la distribución del transporte a lo largo de la costa, lo cual permite observar claramente como se modifican los valores del transporte en función de la orientación de la costa.

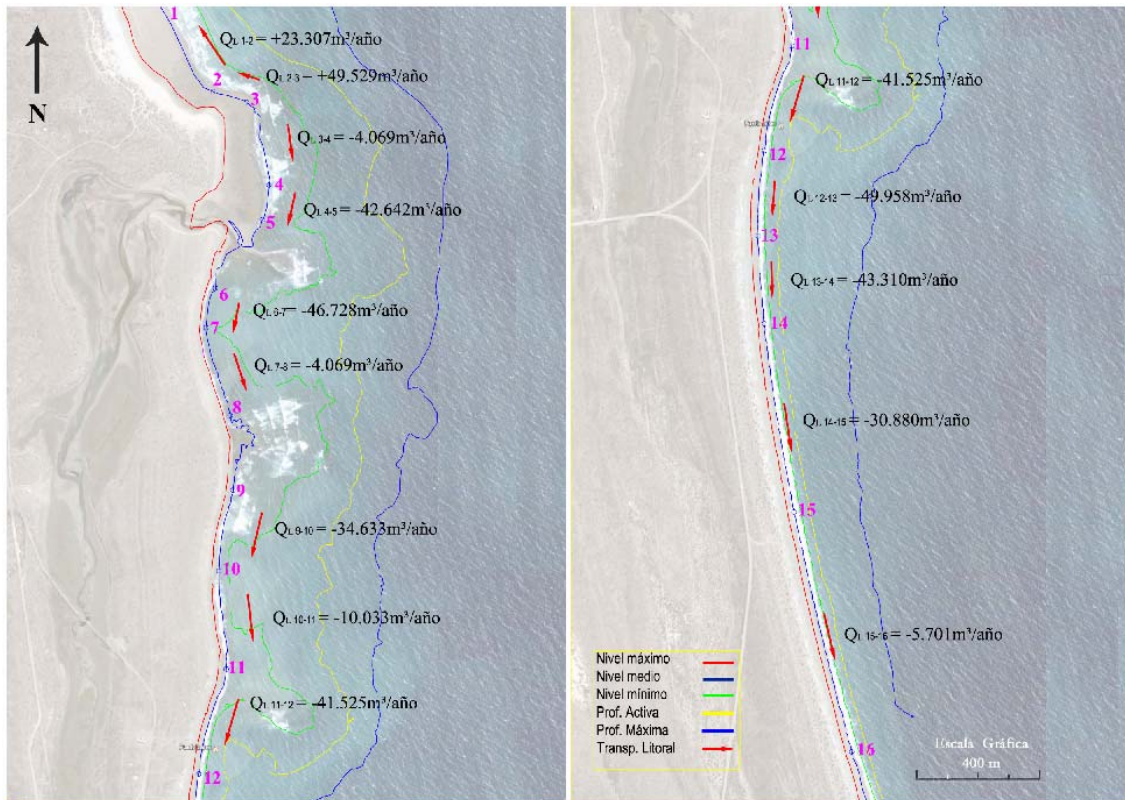


Figura 9.5: Transporte sólido longitudinal neto anual

Cabe destacar que los valores calculados de Q_L , del orden de los 40 a 50.000 $m^3/año$, representan un transporte sólido "potencial", es decir que constituyen el volumen máximo de material que el oleaje podría mover en un año promedio en caso de que ese material se encontrara efectivamente disponible para el transporte.

Mas allá de la incertidumbre que se encuentra asociada a estos valores, y al valor real que el oleaje puede transportar cada año, es importante observar las diferencias relativas que se presentan entre los distintos tramos de la costa. Dichas diferencias entre valores de Q_L para tramos contiguos permiten identificar zonas con tendencia a la acumulación de material o al retroceso de la playa.

En la **Figura 9.6**, se presentan los resultados del transporte longitudinal, en valores relativos. El valor de referencia es el máximo transporte Q_L , que corresponde al tramo 12-13.

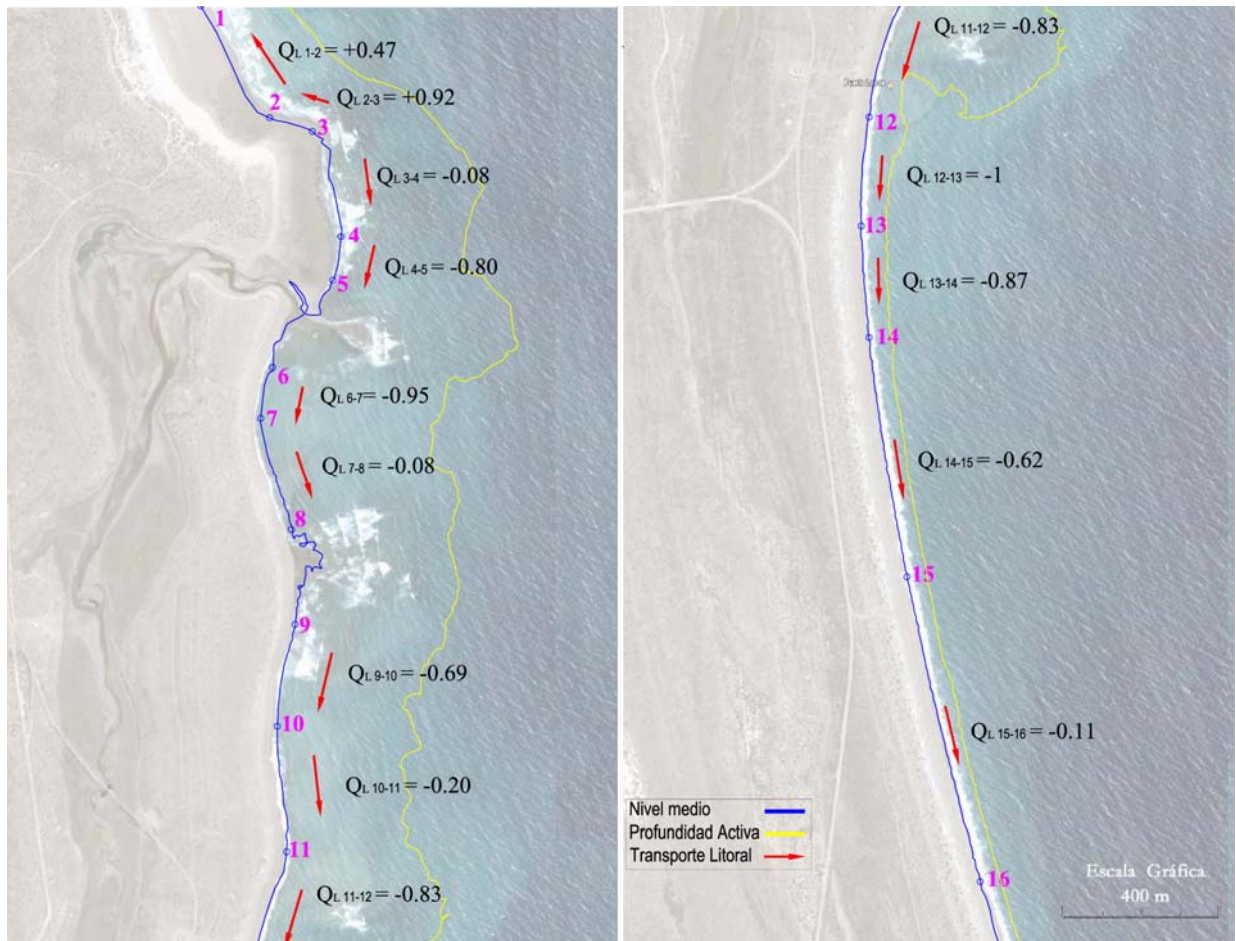


Figura 9.6: Transporte sólido longitudinal en valores relativos

9.4 Aplicación de la fórmula del CERC a Puerto Lobos

A pesar de las limitaciones de esta fórmula, con una adecuada corrección, puede ser muy útil para estimar la tasa de transporte media anual.

Esta fórmula no incorpora de manera explícita el tamaño del sedimento y la pendiente de la playa, pero sí incorpora un coeficiente de transporte **K**, cuyo valor se obtiene experimentalmente.

Este coeficiente fue estudiado por diversos investigadores de todo el mundo. En general se encontró que existe una dependencia de **K** con el tamaño del grano del sedimento (cuando crece el tamaño del grano, disminuye **K**).

Existen diversas fórmulas que relacionan el d_{50} del sedimento y K . En base a datos de campo de los estudios realizados por Komar (1988) y otros investigadores de Inglaterra en playas de gravas, David King⁶ encontró una relación para el K_{sig} (K en relación a la altura de ola significativa) con el d_{50} .

Si se aplica la fórmula propuesta por King a Puerto Lobos con un $d_{50} = 4.25\text{mm}$, se obtiene:

$$K_{sig} = 0.0235$$

Cabe destacar que este valor es aproximadamente 17 veces menor que el valor recomendado por el SPM⁷ para playas de arena ($K = 0.39$). Este valor fue obtenido en playas con un tamaño de grano de 6mm a 8mm, es decir cinco o seis veces menor que el tamaño de grano presente en Puerto Lobos.

Se calculó el transporte sólido longitudinal aplicando la **ec [9.1]** con el nuevo valor del coeficiente K y con el clima medio anual de olas utilizado anteriormente en el modelo de Soulsby, conformadas por valores de H_s para cada dirección con una frecuencia de ocurrencia determinada. Los resultados (caudal sólido neto) se pueden observar en la **Tabla 9.3**

Tabla 9.3: Resultados del transporte sólido – fórmula del CERC

tramo	orientación (°)	QL (m ³ /año)
1 a 2	33.75	23943
2 a 3	72.00	38123
3 a 4	14.50	-4783
4 a 5	-10.00	-35931
6 a 7	-13.00	-38127
7 a 8	14.50	-4783
9 a 10	-11.25	-36648
10 a 11	11.25	-9757
11 a 12	-15.00	-39332
12 a 13	-3.00	-29166
13 a 14	3.00	-21273
14 a 15	9.00	-13155
15 a 16	14.50	-4783

Cabe destacar que el valor del K obtenido mediante la formulación de King, es empírico y no puede sustituir a un valor medido en el sitio de estudio.

⁶ Coastal Engineering Conference 2006 – Vol4 – Page 3381.

⁷ Shore Protection Manual 1984

9.5 Comparación de los resultados de las fórmulas de Soulsby y el CERC

Al aplicar la fórmula del CERC con la corrección del coeficiente **K**, se observa una gran concordancia con los valores de transporte obtenidos mediante el modelo propuesto por Damgaard y Soulsby (**Tabla 9.4**).

Tabla 9.4: Comparación de resultados (transporte neto)

tramo	Pendiente Med	orientación (°)	QL Soulsby	QL CERC	$Q_{\text{soulsby}} / Q_{\text{CERC}}$
1 a 2	1 en 36	33.75	23307	23943	0.97
2 a 3	1 en 30	72.00	49529	38123	1.30
3 a 4	1 en 56	14.50	-4069	-4783	0.85
4 a 5	1 en 49	-10.00	-42642	-35931	1.19
6 a 7	1 en 69	-13.00	-46728	-38127	1.23
7 a 8	1 en 67	14.50	-4069	-4783	0.85
9 a 10	1 en 56	-11.25	-34633	-36648	0.95
10 a 11	1 en 48	11.25	-10033	-9757	1.03
11 a 12	1 en 62	-15.00	-41525	-39332	1.06
12 a 13	1 en 12	-3.00	-49958	-29166	1.71
13 a 14	1 en 9	3.00	-43310	-21273	2.04
14 a 15	1 en 8	9.00	-30880	-13155	2.35
15 a 16	1 en 8	14.50	-5701	-4783	1.19

Las mayores diferencias entre los dos modelos se dan en los tramos 12 a 16, donde la pendiente de la playa es importante. Esta diferencia puede atribuirse a que el modelo propuesto por el CERC no incorpora la pendiente, mientras que las fórmulas de Soulsby sí la tienen en cuenta y por tanto consideran la influencia de la fuerza tractiva sobre el sedimento.

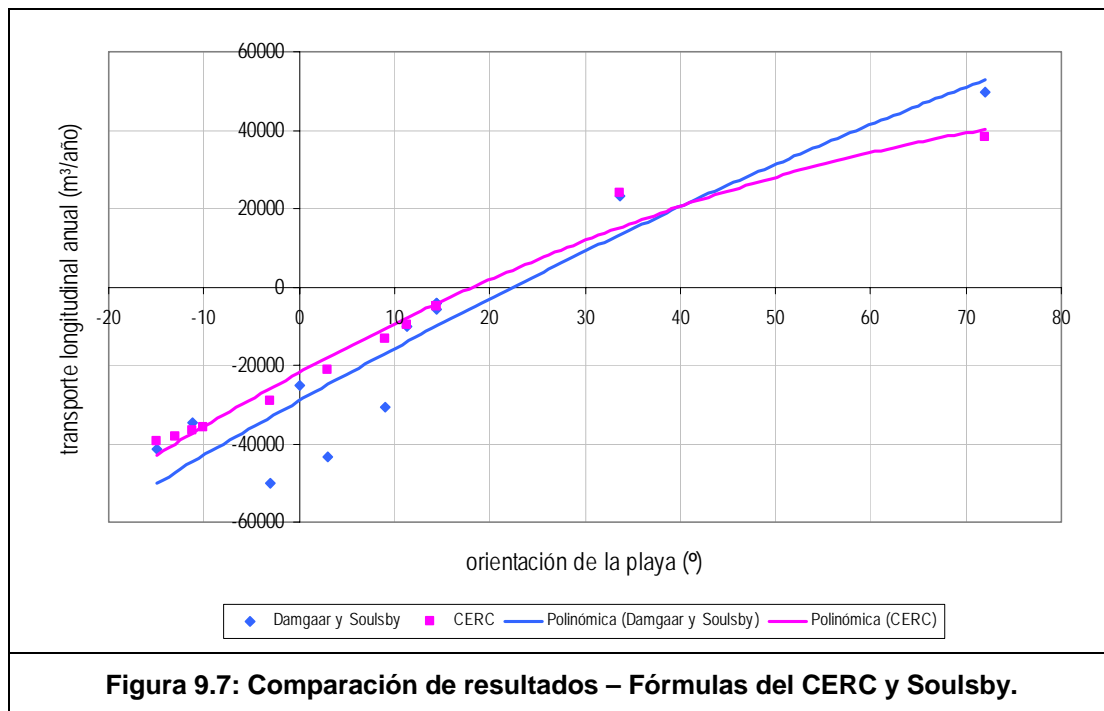


Figura 9.7: Comparación de resultados – Fórmulas del CERC y Soulsby.

Por otra parte, la fórmula del CERC no distingue entre transporte en suspensión y por arrastre, mientras que el modelo de Soulsby sólo considera el transporte de fondo. La gran similitud de los resultados estimados, permite deducir que en esta zona de estudio el transporte de fondo o por arrastre es el tipo de transporte que predomina.

9.6 Influencia del nivel del mar en el cálculo del transporte

Como se mencionó anteriormente, Puerto Lobos se encuentra ubicado en las costas del golfo San Matías en la provincia del Chubut. El comportamiento mareológico en Golfos y Bahías, está asociado en la mayoría de los casos a un fenómeno de amplificación de la onda de marea por resonancia.

La costa patagónica es muestra de ello, presentando oscilaciones de marea ubicadas entre los 4 y 12m de amplitud. En el caso particular de Puerto Lobos no existen registros en el lugar, pero sí a muy pocos kilómetros al norte en el Cargadero de Punta Colorada, provincia de Río Negro.

Según el SHN⁸ los niveles de marea en dicha zona son:

Tabla 9.5: Niveles de Marea en Cargadero de Punta Colorada (36km al norte de Puerto Lobos)

Nivel medio = 0.57 m

Pleamar		Bajamar		Amplitud	
máxima	media	más baja	media	máxima	media
4.99	3.44	-3.89	-2.28	8.74	5.72

(cotas referidas a MOP)

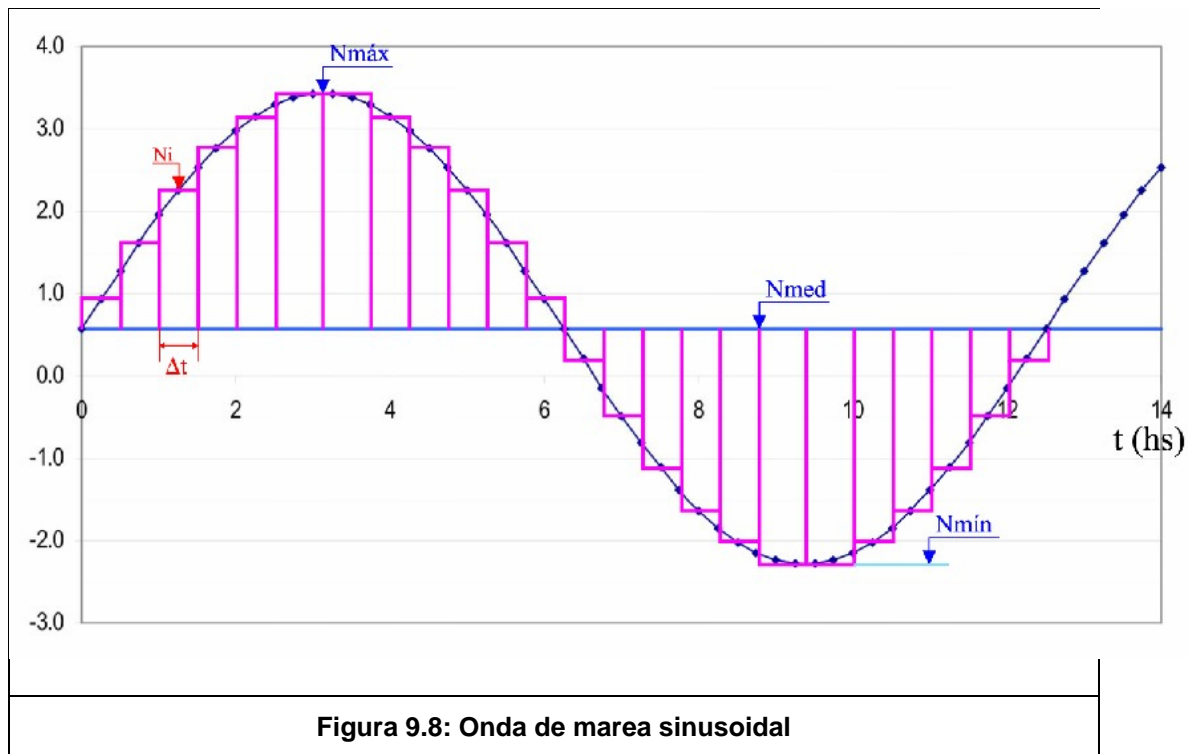
Claramente se observa en la predicción, que el rango de marea es importante y ubica a esta zona dentro de los sistemas denominados *macromareales*.

9.6.1 Cálculo del transporte litoral con marea

Con el fin de estudiar la influencia de la marea en el transporte sólido litoral, se aproximó la onda de marea a una onda sinusoidal simple. La amplitud de dicha onda corresponde a la amplitud media de la predicción presentada anteriormente.

Luego se dividió la onda de marea en intervalos de igual tiempo. De esta manera se aproxima dicha onda, con una serie de niveles discretos con un porcentaje de tiempo determinado (**Figura 9.8**).

⁸ Servicio de Hidrografía Naval – Tablas de Mareas – Predicción 2005



Las fórmulas de transporte utilizadas hasta el momento, no incorporan en forma directa el nivel del mar. La forma de vincular el nivel del mar y la tasa de transporte Q_L , es a través del cálculo de la altura de ola en rotura (H_b).

Para ello se realiza la transformación de las rosas de olas locales y oceánicas, para cada nivel discreto. Es decir, para cada dirección y para cada período, se traslada la onda hacia la playa desde el punto de control cercano a la costa, utilizado en la aplicación del modelo SWAN (ver **Capítulo 7**).

Esta transformación unidimensional del oleaje se realiza en base a la siguiente expresión:

$$H = H_0 K_s K_r$$

Donde:

H_0 = altura de ola en aguas profundas

K_s = coeficiente de bajío

K_r = coeficiente de refracción

De esta manera se obtiene un clima medio anual de olas conformadas por valores de **H_b** y **T_m** con una frecuencia de ocurrencia determinada. Estos valores se encuentran agrupados en un conjunto de matrices, cada una de ellas asociada a un rango de dirección de incidencia del oleaje. (**Anexo V**)

Dicho procedimiento y la aplicación del modelo de Soulsby se realizó inicialmente para los tramos de mayor interés en este estudio, tramos 11–12 y 12–13 (ver **Figura 9.1**)

Dado que el modelo de Soulsby permite incorporar la pendiente de la playa y el tamaño del sedimento, en la **Tabla 9.6** se indican los niveles de mar utilizados en el cálculo y sus correspondientes pendientes y tamaño del sedimento.

Tabla 9.6: Pendientes y tamaños del grano para el cálculo del transporte

Nivel del Mar	Pendiente de la Playa		Tamaño del sedimento	
	tramo 11-12	tramo 12-13	tramo 11-12	tramo 12-13
-2.15 -1.62 -1.11	1 en 65.5	1 en 28.56	2.36mm	
-0.48 0.21 0.93	1 en 69.82	1 en 10.89	4.25mm	
1.62 2.25 2.77 3.29	1 en 36.06	1 en 7.78	6.00mm	

9.6.2 Resultados y conclusiones

Luego de aplicar la transformación del clima de olas para los niveles de cálculo, e incorporar estos datos al modelo de Soulsby, las tasas de transporte longitudinal neto resultante fueron:

Tabla 9.7: Resultados del transporte sólido neto con marea

niveles marea	% de tiempo	tramo 11 -12	tramo 12 -13
		QL	QL
-2.15	18%	-6331	-5421
-1.62	8%	-2801	-2463
-1.11	8%	-2805	-2505
-0.48	8%	-3245	-4181
0.21	8%	-3186	-4118
0.93	8%	-3351	-4007
1.62	8%	-3469	-4655
2.25	8%	-3826	-4532
2.77	8%	-3737	-4547
3.29	8%	-7880	-10457
		-40630m³/año	-46886 m³/año

En la tabla presentada se observa claramente que los resultados son muy similares a los obtenidos anteriormente considerando el cálculo del transporte sólo con el nivel medio:

Tabla 9.8 Comparación de resultados

tramo	orientación (°)	QL (sin marea)	QL (con marea)	$Q_{\text{sin m}} / Q_{\text{con m}}$
11 a 12	-15	-41525	-40630	0.978
12 a 13	-3	-49958	-46886	0.939

Se concluye entonces, que la influencia de la gran amplitud de marea en el cálculo del transporte es despreciable. Dado que la tasa neta de transporte *sin considerar* el efecto de la marea es levemente *mayor*, el error que se incorpora se encuentra del lado de la seguridad para la planificación de obras.

10 CONCLUSIONES

Una serie de 15 años de datos generados por un Modelo Global de Olas en el Golfo San Matías fue utilizada como entrada para una modelación a escala regional, y permitió establecer las propiedades del oleaje en las proximidades de Puerto Lobos. Entre otras, se evaluaron las distribuciones direccionales, la distribución de altura y período, las variaciones estacionales y valores probables a largo plazo.

En el área costera las olas locales generadas por viento muestran una persistencia limitada (26,5%) debido a los vientos dominantes de tierra. Las olas de temporal en el área costera pueden superar los 5 m. Las olas más frecuentes proceden del sector ENE y las de mayor amplitud del sector E.

Las olas oceánicas alcanzan la costa desde el sector E, con alturas máximas de 1 a 1,50 m, aunque las olas frecuentes presentan amplitudes inferiores a 0,50 m.

Mediante la aplicación de algunos modelos de transporte de sedimentos, y a partir del clima de olas determinado, pudo establecerse un transporte neto anual del orden de los 40.000 m³. El transporte se produce esencialmente de N a S, siendo la componente de S a N poco significativa.

Las determinaciones de transporte litoral efectuadas deben ser considerados como una estimación preliminar, ya que no se ha dispuesto de información referente a las características granulométricas del material que compone la playa. Igualmente la complejidad de la morfología costera (presencia de restingas, cambios en la orientación de la playa) dificultan la aplicación de fórmulas de cálculo.

ANEXO I - RELEVAMIENTO TOPOBATIMETRICO EN PUERTO LOBOS

El trabajo se desarrollo entre los días 28 de marzo al 21 de abril de 2007 y dado las cambiantes condiciones climáticas en la zona resultó que se demoraron las navegaciones para el relevamiento en agua ya que se espero a que se presenten condiciones propicias donde se presenten simultáneamente buen estado del mar, es decir con poco oleaje, ausencia de vientos, etc.

ZONA RELEVADA

En los trabajos de tierra se procedió a relevar una franja de aproximadamente 150 mts al oeste de la línea de máxima marea y en agua, es decir al oeste, hasta la profundidad de 20,00mts. En dirección norte-sur se extendió unos 1.100mts al norte y 2050mts al sur del punto N°:9 DCEIT-Chubut, que es prácticamente coincidente con el paralelo 42° y a que su latitud es de -42° 00' 00,07911".

RED DE APOYO PLANIMETRICO

Se generó una red de apoyo con una poligonal de cuatro (4) vértices que son los siguientes: A, B, C y GPSN°:9 DCEIT. El punto A está ubicado a 1100mts al Norte del Punto GPS N° 9 DCEIT y los B y C a 1000mts y 2050mts al Sur del mismo respectivamente.

Todo el relevamiento se relacionó en planimetricamente con el punto GPS N°:9 DCEIT, cuyas monografías y balizamiento se adjuntan y que esta ubicado en las inmediaciones de las ruinas del viejo Hotel de Puerto Lobos.

Todas las coordenadas planas de los puntos relevados son consignadas en proyección Gauss-Kruger con elipsoide WGS84.

Las coordenadas elipsoidicas están expresadas en sistema WGS84.

APOYO ALTIMETRICO

Todas las cotas consignadas en el presente trabajo están en Sistema MOP.

Para obtener apoyo altimétrico se efectuó una consulta al Instituto Geográfico

Militar (IGM) y como resultado de la misma se nos informó de la existencia de dos puntos fijos en la zona a relevar que corresponden a la línea 142 del IGM y que son los siguientes:

1-punto fijo NPF1, cuya cota en sistema IGM es 10,097 por lo que su cota MOP es de 9,541.

2-punto fijo NPF2, cuya cota en sistema IGM es 14.645 por lo que su cota en sistema MOP es 14,089.

Los puntos NPF1 y NPF2 se encuentran a 3010mts y 6370mts al sur del Punto GPSN°:9 DCeIT y cerca de la costa (se adjuntan fotografías).

Se apoyo todo el trabajo en el punto NPF1 por ser el más cercano a la zona de trabajo.

EQUIPOS UTILIZADOS

Para el relevamiento se utilizaron receptores geodésicos marca TRIMBLE modelo 4600LS, con colectora TSC1 por método cinemático y con post procesamiento.

Para el relevamiento batimétrico se utilizó una ecosonda Hydrotrac gráfica digital.

Se realizaron algunos trabajos de vinculación planimétrica con estación total marca PENTAX, modelo R-315NX y altimétrica con nivel PENTAL AL-320.

TRELEW, Mayo de 2007

ANEXO II MODELOS GLOBALES PARA PREDICCIÓN DE OLEAJE

INTRODUCCIÓN

La realización de los estudios hidráulicos de costas y puertos requiere del conocimiento de las características del oleaje en el área costera en las inmediaciones del sitio de implantación.

Aunque en el pasado se han realizado esfuerzos con vistas a la caracterización del oleaje, incluyendo mediciones directas, en la actualidad se dispone de fuentes de información que responden a nuevos avances tecnológicos logrados en numerosos campos.

Una alternativa disponible hoy día es la utilización de modelos matemáticos a escala global, cuyos resultados se verifican y ajustan, entre otros medios, con mediciones directas a través de instrumentos apropiados y con información provista por satélites equipados con sensores adecuados. Este conjunto de técnicas permite proveer de información homogénea bajo la forma de series históricas de datos por lapsos que en la actualidad se extienden por hasta 20 años, según el área que se considere. Muchas agencias públicas y privadas, entre las que cabe mencionar la Oficina Meteorológica del Reino Unido (United Kingdom Meteorological Office, UKMO) y firmas privadas como Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services (ARGOSS) disponen de un servicio que permite disponer de tal información.

DATOS DISPONIBLES

El estado del mar en un punto cualquiera puede suponerse como compuesto de la suma de muchas ondas individuales, cada una con una particular dirección de procedencia, amplitud y período. Esto se denomina el espectro de energía.

Cada pronóstico es producido por el modelo global utilizando datos de olas en el paso anterior y datos de viento. En cada paso de tiempo se calcula el espectro del mar utilizando la ecuación de balance de la densidad de energía. La evolución del espectro de energía de las olas es forzada por tres mecanismos: el efecto del viento, la disipación de energía por rotura, y la transferencia de energía entre componentes espectrales debido a efectos no lineales. La energía se propaga por advección desde un punto de cálculo al siguiente a la velocidad de grupo. Los modelos de olas utilizan vientos horarios de superficie producidos por un modelo numérico climático global.

Las salidas de las simulaciones son corregidas localmente en función de mediciones vientos y de altura de ola, período y dirección disponibles. Para ello, además de la posibilidad de resolver mediante modelos numéricos la generación y propagación del espectro direccional de energía de las olas, es necesario disponer de datos referentes a altura, período y dirección de las olas, para corregir las salidas de la modelación. En algunas regiones donde la actividad marina es intensa existen redes de boyas marinas que proveen tal información.

Los sensores de microondas a bordo de los satélites ERS (altímetros, escatómetros y radar de apertura sintética SAR) ofrecen información adicional para este propósito, ya que permiten una cobertura global, continua y homogénea y con una resolución mejorada respecto de lo que pueden ofrecer las redes de boyas. Esto posibilita mejorar la descripción del campo de vientos. La

observación de olas y del *swell* generado por tormentas lejanas puede ser entonces utilizada para mejorar la modelación.

La comparación entre los resultados del modelo global muestran que la altura significativa así determinada resulta en buena concordancia con tanto las determinaciones altimétricas satelitales como también de boyas amarradas.

Hay tres configuraciones de modelación diferentes que abarcan distintas áreas y con distintas resoluciones. Todos los modelos incluyen efectos de aguas costeras es decir, aguas poco profundas, refracción, bajío y fricción del fondo.

El modelo global cubre una superficie desde los 80,28°N hasta 79,17°S sobre una grilla de latitudes/longitudes regular, con una resolución de 5/6° en longitud y 5/9° en latitud.

Los vientos que se usan como entrada tienen la misma resolución espacial que el modelo de olas.

En general, las variables provistas en los registros son las siguientes:

- *Intensidad del viento*
- *Dirección del viento*
- *Altura de ola (Hs), periodo medio y dirección de propagación para el espectro resultante.*
- *Altura de ola (Hs), periodo medio y dirección de propagación para el espectro de olas generadas localmente por vientos.*
- *Altura de ola (Hs), periodo medio y dirección de propagación para el espectro de swell (olas que se propagan fuera de su área de generación).*
- *Período de pico (Tp) del espectro resultante*

Un aspecto importante que surge de lo expuesto es que la caracterización del estado del mar permite discriminar entre olas generadas localmente por el viento (olas locales o wind sea), de aquéllas que se propagan fuera de su región de generación, con frecuencia en áreas lejanas (olas oceánicas o swell). Otro aspecto importante es que cada valor de ola (caracterizado por variables espectrales como la altura significativa y el período medio) se halla asociadas a una dirección de propagación. En virtud de las técnicas para su generación, la base de datos resulta homogénea en calidad, lo que favorece su tratamiento estadístico. Finalmente ofrece la posibilidad de su extensión futura (y bajo condiciones homogéneas) mediante la incorporación de nuevos períodos modelados.

En virtud de lo expuesto, tomando asimismo en consideración la información provista referente a las características técnicas de los modelos globales utilizados y a la calidad de los resultados, y sumando a ello la experiencia disponible con bases de datos similares utilizados en otras regiones, puede

concluirse que la información indicada resulta apropiada para describir las características del oleaje en una región costera.

Es muy importante recalcar que la disponibilidad de una serie histórica de 10 o 20 años de calidad homogénea permite la caracterización del régimen de olas con un enfoque estadístico y particularmente (mediante la aplicación de modelos estadísticos adecuados) la cuantificación de eventos extraordinarios probables de ocurrir dentro de períodos de retorno más extensos que la duración de los registros. Esto no sería posible con datos de relativamente corta duración (menos de 5 años).

ANEXO III - MODELO GLOBAL DE ARGOSS



**Advisory and Research Group on
Geo Observation Systems and Services**

Overview of wave climate information available from ARGOSS

June 2007

www.waveclimate.com

Data

Measured and computed variables

The global database at ARGOSS contains the following wind and sea state data:

variables(s)	sensor(s)	satellite(s)	period covered
significant wave height	radar altimeter	Geosat	Mar 1985 - Dec 1989
significant wave height and wind speed	radar altimeter	ERS-1/2, Envisat Topex/Poseidon Jason-1/GFO	Aug 1991 – Dec 2006
wind speed and direction	scatterometer	ERS-1/2 Quikscat	Mar 1992 - Dec 2006
wave spectral density and mean direction per frequency band, together with coincident wind speed and direction	synthetic aperture radar (SAR) and scatterometer	ERS-1/2	Apr 1993 -Jun 2003
variables(s)	wave hindcast model	grid	period covered
wave spectral density and mean direction per frequency band, together with coincident wind speed and direction	global third generation wave model Wavewatch III driven by NCEP surface wind analyses	1 x 1¼ degrees all major ocean basins	1992-2006
wave spectral density and mean direction per frequency band, together with coincident wind speed and direction	regional third generation wave model Wavewatch III driven by high-resolution ECMWF surface wind analyses	¼ x ¼ degrees Mediterranean Red Sea Black Sea Caspian Sea Arabian Gulf	1992-2004

High-resolution models model hindcast data (3-hourly time series) will soon become available in the North Sea and in the Baltic Sea.

The dataset covers all of the world's oceans and seas. Note that climate products based on satellite wave and wind data can be obtained for areas not smaller than 50 km × 50 km (for products derived from SAR data, this is 200 km × 200 km). Climate based on wave model hindcast data is derived from the data at a single output grid point.

Data processing

Retrieval of oceanographic parameters

- ARGOS runs a global 3rd generation wave hindcast model in all major ocean basins (resolution 1x1¼ degree) as well as local models in semi-closed basins such as the Mediterranean (resolution ¼x¼ degree).
- Basic processing of altimeter and scatterometer returns to wave and wind data is performed under responsibility of the space agencies supplying the data. It is not straightforward to interpret SAR spectra: the motion of the waves relative to the satellite interferes with the way in which the radar constructs the image. However, the mechanism by which this happens is well understood, and ARGOS has developed a technique for retrieving the ocean wave spectrum from the SAR spectrum (see *J. Geophys. Res.*, 105, 3497-3516). This technique uses the SAR spectrum as well as the scatterometer wind vector acquired at the same place and time by the ERS satellites.

Corrections

- Altimeter significant wave height from various sensors/years has been corrected for bias using in-situ wave data from wave buoys obtained from NOAA and Environment Canada. ARGOS performs a recalibration of altimeter wind speeds to correct for some downward bias present in the standard products.
- Scatterometer wind speed and direction: ambiguity in wind direction is removed in the basic product. ARGOS performs a recalibration of wind speeds to correct for some downward bias present in the standard products.
- Some information on short waves (short swells in particular) is missing in wave spectra retrieved from SAR spectra. This information is obtained from ECMWF global wave model spectra. Spectral features related to surface slicks are detected and removed.
- In the wave climate data products, significant wave heights derived from SAR data are calibrated on-the-fly using altimeter significant wave height observations obtained over the same area. A linear regression fit of SAR total wave energy quantiles to altimeter wave energy quantiles supplies the calibration coefficients (slope and intercept). This calibration improves the consistency between wave

climate products derived from different sensors. The corrections are small in the vast majority of cases. Radar altimeter is used as the standard for calibration because it the most reliable source of significant wave height data present in the database (see also below).

- Significant wave height and wind speed from the hindcast model point are calibrated offline using altimeter (significant wave height and wind speed) and scatterometer (wind speed) observations obtained within 50km and 90 minutes. This calibration removes the systematic error from the wave model data. Scatterometer is used for calibration of wind speed on open sea. In coastal areas, altimeter wind speed contributes most to the calibration.

Quality control

- Generally, quality control involves various automated procedures such as range checks, checks for error flags and detection of outliers. For wave spectra obtained from SAR, spectra with very low signal-to-noise levels are rejected. The data have been extensively compared against wave buoy data. Wave model data are calibrated with satellite data to remove any systematic error.

Accuracy

The accuracies of the different types of data present in the database are summarised below. The figures are based on comparisons against wave buoy data at 35 locations in the Pacific, Atlantic and Gulf of Mexico obtained from NOAA and Environment Canada. These buoys report hourly one-dimensional energy density spectra and wind.

The quality of the data is summarised in terms of the root-mean-square error as well as a relative error measure. The root-mean-square (RMS) error of say, significant wave height, is

$$\text{RMS error} = \sqrt{n^{-1} \sum_{i=1, \dots, n} |H_i^{\text{retrieved}} - H_i^{\text{buoy}}|^2}$$

with $H_i^{\text{retrieved}}$ the wave height of sample no. i retrieved from satellite data, and H_i^{buoy} the coincident buoy measurement. It is similar to the standard deviation, but also

includes the bias error. The relative error is the RMS error normalised by the root-mean-square value of the buoy wave height:

$$\text{relative error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,\dots,n} |H_i^{\text{retrieved}} - H_i^{\text{buoy}}|^2}{\sum_{i=1,\dots,n} |H_i^{\text{buoy}}|^2}}$$

With respect to wind and wave data obtained from satellite altimeter, SAR and wave model, we validated (scatterometer sensors provide wind speed only)

- significant wave height : H_s
- wind speed at 10m above sea level (1 hourly average) : U_{10}

Below, the quality of significant wave height and wind speed data is summarised. These are averages over all geographical regions and over the specified period. Note that the figures reported for significant wave height from SAR relate to data which are *not* re-calibrated on altimeter data.

variable	source	period	#samples	buoy mean	RMS error	rel. error (%)
wave height	altimeter	1985-2006	26858	2.22 m	0.30 m	12
wave height	SAR	1993-2003	1377	2.33 m	0.44 m	17
wave height	wave model	1992-2004	712800	2.15 m	0.43 m	17
wind speed	altimeter	1992-2006	25260	7.31 m/s	1.44 m/s	18
wind speed	scatterometer	1992-2006	62194	7.19 m/s	1.14 m/s	15
wind speed	wave model	1992-2004	339240	7.21 m/s	2.22 m/s	28

Error statistics of wave height and wind speed.

To validate the wave spectra obtained from SAR and wave model, the buoys are grouped into two geographical regions: Pacific (N. American west coast and Hawaii) and Atlantic (N. American east coast and Gulf of Mexico). In addition to significant wave height and wind speed, we validated the following wave parameters derived from retrieved ocean wave spectra:

- mean wave period : T_m
- zero-crossing wave period : T_z
- significant height of long waves with periods above 12 s : $H_{T>12}$

The mean period and zero-crossing wave period are defined as:

$$T_m = \frac{\int f^{-1} F(f) df}{\int F(f) df} \quad T_z = \sqrt{\frac{\int F(f) df}{\int f^2 F(f) df}}$$

with f denoting the frequency in Hz and $F(f)$ the sea surface variance spectrum [in m^2/Hz] in f .

variable	buoy mean	RMS error	rel. error (%)
wave height	2.67 m	0.41 m	14
mean period	8.85 s	0.74 s	8
zero-crossing period	6.90 s	0.62 s	9
height of long waves	1.16 m	0.40 m	25

Error statistics of SAR wave parameters in Pacific 1993-2003 (based on 767 samples)

variable	buoy mean	RMS error	rel. error (%)
wave height	1.89 m	0.47 m	21
mean period	6.74 s	1.23 s	18
zero-crossing period	5.68 s	0.95 s	17
height of long waves	0.30 m	0.35 m	61

Error statistics of SAR wave parameters in Atlantic 1993-2003 (based on 610 samples)

variable	buoy mean	RMS error	rel. error (%)
wave height	2.62 m	0.45 m	16
mean period	8.76 s	0.97 s	11
zero-crossing period	6.86 s	0.66 s	10
height of long waves	1.10 m	0.48 m	32

Error statistics of wave model parameters in Pacific 1992-2004 (based on 386593 samples)

variable	buoy mean	RMS error	rel. error (%)
wave height	1.60 m	0.41 m	21
mean period	6.36 s	0.84 s	13
zero-crossing period	5.40 s	0.67 s	12
height of long waves	0.46 m	0.44 m	54

Error statistics of wave model parameters in Atlantic 1992-2004 (based on 326207 samples)

ARGOSS

Postal address:
P.O. Box 61
8325 ZH Vollenhove
the Netherlands

Telephone +31 527 242299
Telefax +31 527 242016
E-mail info@argoss.nl
Website www.argoss.nl

Wind Fields

The wave hindcast model is driven by wind fields from a numerical weather prediction (NWP) model, because model data are the only datasets with complete coverage in space and time. Running NWP models and the required comprehensive data assimilation procedures are a huge task, presently only carried out by a few weather prediction centres like NCEP and ECMWF. We obtain our data from these sources, and then perform a procedure to correct the surface winds for local biases.

The choice of wind field source for a wave hindcast is necessarily a compromise between

- quality
- consistency and /or availability in time

Over the years, weather observation systems have been steadily evolving. Therefore, the best data of more recent wind fields are (on average) of higher quality than the best data of wind fields further into the past. If one tries to make a dataset covering a long period of time and of *uniform quality*, it is necessary to skip certain more recent types of observations. Examples of efforts to produce consistent weather hindcast data are the ECMWF ERA-40 and NCEP reanalysis projects.

At ARGOSS, we have chosen an NCEP operational global weather analysis (Final Analysis) from the [GFS \(global forecast system\)](#) model as the core dataset. It covers the period of 1998 till present; we are using this data from May 1997 until December 2004. Wind data for the period January 1992 until May 1997 are taken from the [NCEP reanalysis project](#).

The motivation for this choice is as follows

- The core dataset of analyses from the NCEP GFS model (GFS_AtmosphericModel.doc) is of the highest quality available. Most of the last ten years are covered by these data.
- The reanalysis data (NCEP_reanalysis.doc) is of somewhat lower quality as it has been produced on a coarser grid. However, we have compared both datasets on a fine grid with satellite wind data and concluded that the biases in both datasets are rather similar, and that the main difference is a 30% higher standard deviation in the reanalysis data.
- Our standard procedure to correct any local bias in NWP wind data by calibration to satellite wind data guarantees that the statistical properties of reanalysis data and FNL data are practically the same after the correction has been applied. Appendix B gives a detailed description of the procedure, which has been developed after evaluating many different options and variations. The only remaining difference is a somewhat higher scatter in the wind data before May 1997.

With this approach, we are confident that we have made a very good compromise between accuracy and consistency.

The wave model in hindcast mode

ARGOSS has a 3rd generation wave model running on a global grid as well as on several regional grids for hindcast and forecast purposes. The model is based on the WaveWatch III model.

A 3rd generation wave model involves

- ❑ A spectral approach and
- ❑ Non-linear wave-wave interaction to re-distribute energy over frequency bins.

ARGOSS has set up a global model with a resolution of $2\frac{1}{2}^{\circ} \times 2^{\circ}$ on the open ocean and $1\frac{1}{4}^{\circ} \times 1^{\circ}$ in coastal zones of about 1000 km wide. The model uses ice- and wind-data provided by the National Center of Environmental Prediction (NCEP), the marine modelling branch. The global model provides enough data along the coasts of the larger oceans and is the source for boundary data for regional models around the world. The global model provides 3-hourly time series of wave spectra covering a period of thirteen years (1992-2004).

In addition to the global model, ARGOSS has set up a number of regional models covering the period 1992-2004. The regional models are implemented on a 0.25×0.25 degree grid for the following (semi) enclosed basins:

- ❑ the Mediterranean Sea
- ❑ the Arabian Gulf
- ❑ the Red Sea
- ❑ the Black Sea
- ❑ the Caspian Sea

The global and regional models are calibrated using satellite radar altimeter and scatterometer data. The compressed model output data has been added (per year and month) to the operational database. The database contains 'raw' wave model spectra.

Model wind speed is calibrated beforehand. Calibration coefficients (slope and intercept) for wave energy and wind speed are found for each model grid point. Scatterometer wind speed is used on open sea to correct model wind speed. In coastal areas, we used altimeter wind speed for calibration. Model wave energy is calibrated by means of altimeter measurements.

In chapter 5 of the [validation document of the global wave climate database](#) error statistics on the comparison of raw model data and calibrated model data against buoy measurements can be found.

A more detailed description of the Wavewatch III model and model settings can be found in appendix A.

A - Wavewatch III model

WAVEWATCH III (Tolman, 2002) is a third generation wave model developed at NOAA/NCEP in the spirit of the WAM model (WAMDIG 1988, Komen *et al.* 1994). It is a further development of the model WAVEWATCH I, as developed at Delft University of Technology (Tolman 1989, 1991) and WAVEWATCH II, developed at NASA, Goddard Space Flight Center (e.g., Tolman 1992). WAVEWATCH III, however, differs from its predecessors in many important points such as the governing equations, the model structure, the numerical methods and the physical parameterisations. WAVEWATCH III solves the spectral action density balance equation for wavenumber-direction spectra. The implicit assumption of this equation is that properties of medium (water depth and current) as well as the wave field itself vary on time and space scales that are much larger than the variation scales of a single wave. A further constraint is that the parameterisations of physical processes included in the model do not address conditions where the waves are strongly depth-limited. These two basic assumptions imply that the model can generally be applied on spatial scales (grid increments) larger than 1 to 10 km, and outside the surf zone.

A1 Physical features

Physical features:

- The governing equations of WAVEWATCH III include refraction and straining of the wave field due to temporal and spatial variations of the mean water depth and of the mean current (tides, surges etc.), when applicable.
- Parameterizations of physical processes (source terms) include wave growth and decay due to the actions of wind, nonlinear resonant interactions, dissipation ('whitecapping') and bottom friction.
- Wave propagation is considered to be linear. Relevant nonlinear effects such as resonant interactions are, therefore, included in the source terms (physics).
- The model includes several alleviation methods for the Garden Sprinkler Effect (Booij and Holthuijsen, 1987, Tolman, 2002c).
- The model includes sub-grid representation of unresolved islands.
- The model includes options for choosing two source term packages: the first is based on cycles 1 through 3 of the WAM model (WAMDIG 1988); the second is based on Tolman and Chalikov (1996). The source term packages are selected at the compile level.
- For research purposes only, the model includes a full nonlinear interaction source term option.
- The model includes dynamically updated ice coverage.

A2 Numerical features

Numerical features:

- The model is written in ANSI standard FORTRAN 90, fully modular and fully allocatable.

- The model uses a regularly spaced longitude-latitude grid (longitude and latitude increment do not need to be equal) and, optionally, a Cartesian grid.
- Wave energy spectra are discretized using a constant directional increment (covering all directions), and a spatially varying wavenumber grid. The latter grid corresponds to an invariant logarithmic intrinsic frequency grid (Tolman and Booij 1998).
- Both a first order accurate and third order accurate numerical scheme are available to describe wave propagation (Tolman 1995). The propagation scheme is selected at the compile level.
- The source terms are integrated in time using a dynamically adjusted time stepping algorithm, which concentrates computational efforts in conditions with rapid spectral changes (Tolman 1992, 1997, 1999a).
- The model can optionally be compiled to include shared memory parallelisms using OpenMP compiler directives.
- The model can optionally be compiled for a distributed memory environment using the Message Passing Interface (MPI, see Tolman 2002a).

A3 Output options:

Output options:

- Gridded fields of 18 input and mean wave parameters such as the significant wave height, directions, frequencies etc.
- Output of wave spectra at selected locations.
- Output of wave spectra along arbitrary tracks.
- Up to 9 restart files per model run.
- Files with boundary data for up to 9 separate nested runs.
- The model provides binary or ASCII output

A4 Global model specifications

ARGOSS has implemented the global model with a resolution of $1^{1/4} \text{ }^\circ \times 1 \text{ }^\circ$. The model uses ice- and wind-data provided by the National Center of Environmental Prediction (NCEP), the marine modelling branch of National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA). The wind fields at 10m level from the GFS (global forecast system) model as the core dataset. It covers the period of 1998 till present; we are using the data from 1998-2004, covering a total of seven years. Wind data for the years before 1998 are taken from the NCEP reanalysis project.

The global model provides data at open sea and will be the source data for the near shore translations.

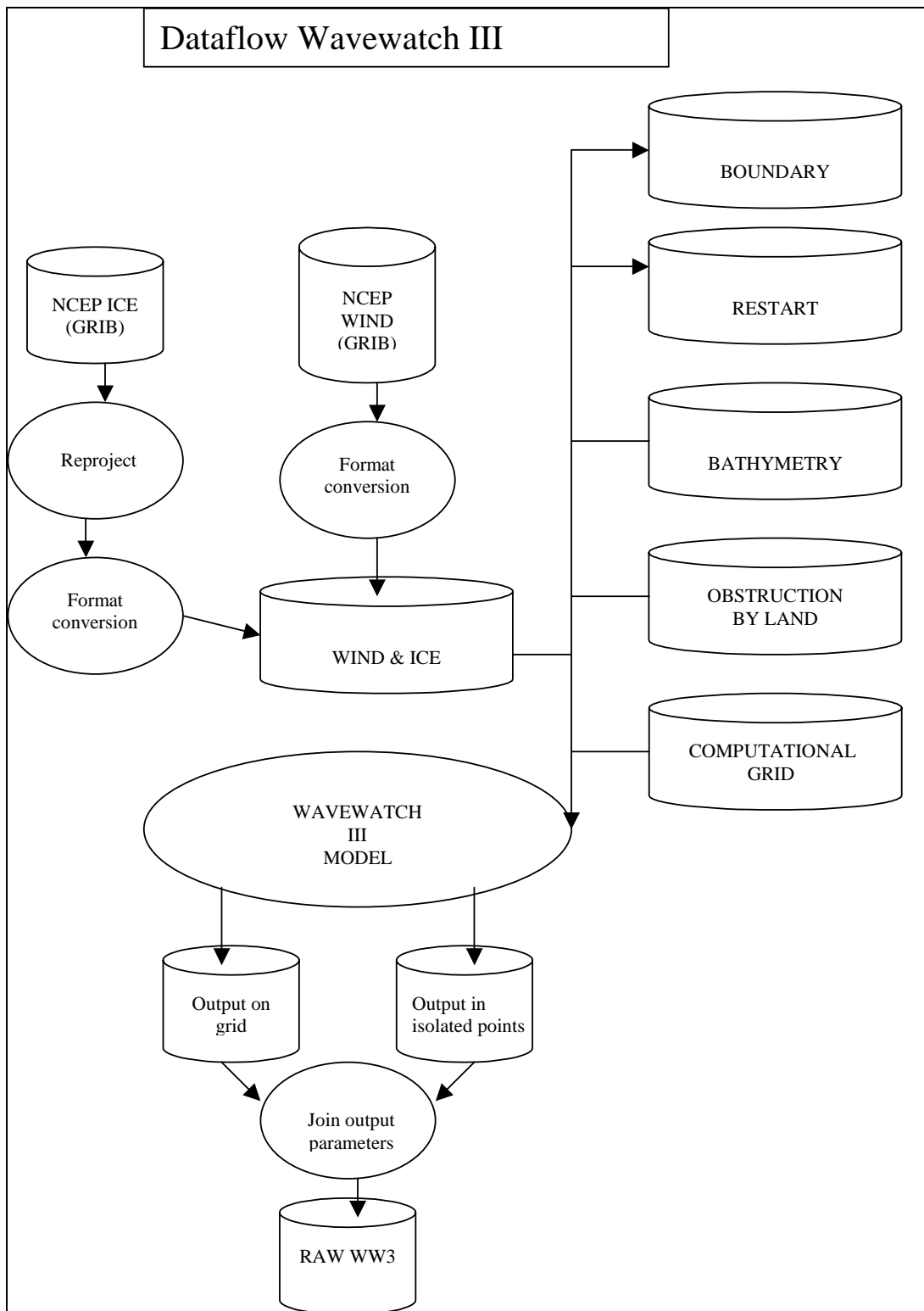


Figure A1 Dataflow Wavewatch III.

The obstruction file provides a mechanism to take into account sub-grid islands, i.e. islands that are smaller than the resolution of the model. The obstruction file is derived

from the NOAA GSHHS (Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline and GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) database, both provided by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

No wave data assimilation is performed. The model is based on deepwater physics without mean currents. Additional model information is provided in the bullets below.

- Coverage: 78°S to 78°N
- Time steps:
 - ◆ Global: 3600s
 - ◆ Propagation: 1200
 - ◆ Refraction: 3600s
 - ◆ Minimum source term step: 300s
 - ◆ Output: 3 hours
- Sea Ice coverage dynamically updated with a critical ice concentration set between $C_{ice}=0.33$ (0% obstruction) and $C_{ice}=0.67$ (100% obstruction)
- Spectral discretion considers 30 frequencies ranging from 0.0345 Hz to 0.5472 Hz, with a logarithmic distribution with increment factor 1.1 and 24 equally distributed directions.
- Minimum water depth of 7 m
- Third order propagation scheme with effective swell age of 4 days
- Hard boundary treatment and smoothing of the diffusion correction starting at 70°S and 70°N
- Air-Sea temperature difference not included.

ANEXO IV Descripción del modelo SWAN

El modelo SWAN es una herramienta utilizada ampliamente en el campo de la ingeniería de costas. En la bibliografía internacional se presentan numerosas aplicaciones de SWAN para la modelación del oleaje en zonas de costa marítima, lagos y estuarios.

En este capítulo se brinda una breve descripción de las características del modelo mencionado y se presentan algunos aspectos vinculados a su aplicación en este estudio.

El modelo SWAN permite la simulación de los siguientes procesos:

- Generación de olas por acción del viento
- Propagación a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.
- Disipación por descrestamiento (whitecapping).
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad
- Disipación inducida por la fricción del fondo
- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

SWAN es un modelo numérico que permite estimar los parámetros de oleaje en regiones costeras basándose en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas $N(\sigma, \theta)$, donde todos los procesos físicos están modelados explícitamente.

La densidad acción de ola se define como $N = E/\sigma$, donde E es la densidad energía (energía cinética más potencial por unidad de superficie), σ la frecuencia relativa y θ la dirección de propagación.

La ecuación de balance de la acción se escribe como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

El primer término a la izquierda expresa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción de ola, el segundo y tercero representan la propagación de la densidad de acción en el espacio con velocidades C_x y C_y . El cuarto describe los cambios de la frecuencia relativa debido a cambios en profundidad o a corrientes. El quinto término es el cambio debido a refracción.

El término S del miembro derecho de la ecuación representa las fuentes y sumideros de energía y puede ser descripto como la suma de varios y diferentes procesos físicos:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

donde

- S_{in} es la energía transferida por el viento,
- S_{ds} es la disipación de energía
- S_{nl} representa la transferencia de energía entre olas por efectos no lineales.

El término de disipación S_{ds} consta a su vez de tres componentes principales:

- Las “crestas blancas” o *whitecapping*, pequeñas rompientes sobre las crestas de las olas que ocurren por un exceso de entrada de energía.
- La fricción con el fondo.
- La rompiente inducida por la disminución de la profundidad.

Las interacciones no lineales ola-ola son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, y son las responsables de redistribuir la energía entre dichas componentes. En aguas profundas

la transferencia de la energía se realiza desde el pico espectral ya sea a las frecuencias más altas o más bajas (obligando al pico espectral a desplazarse en uno u otro sentido), dependiendo ello de si el oleaje está siendo disipado o no por las “crestas blancas” (whitecapping). En aguas someras la interacción entre diferentes frecuencias transfiere energía de frecuencias bajas a altas, obligando así al pico espectral a disminuir su período.

La ecuación de balance (1) es una ecuación diferencial de primer orden, en la que las cinco variables independientes son tiempo t , las coordenadas espaciales x, y , la frecuencia relativa σ y la dirección de propagación θ . La variable dependiente a resolver es la densidad de acción de ola N .

La integración se implementa en un esquema en diferencias finitas, con paso de tiempo Δt (el mismo para los términos de propagación y el término fuente). El espacio geográfico se discretiza mediante una grilla de paso Δx y Δy . El espectro (direccional) se representa con una resolución $\Delta\theta$ en la dirección y una resolución constante $\Delta\sigma/\sigma$ en frecuencia.

La ecuación se resuelve mediante un esquema implícito que es incondicionalmente estable, lo que permite escoger pasos de tiempo prolongados. Puede ser de primer o segundo orden. El modelo está implementado en lenguaje FORTRAN.

Anexo V – Tablas de Oleaje para el Cálculo de Transporte Litoral de Sedimentos

N	-11.25 - 11.25
Hs(m)	T02(s)
	0-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12
0 - 0.5	0 0 0 0 0 0
0.5 - 1	0 0 0 0 0 0
1 - 1.5	0 0 0 0 0 0
1.5 - 2	0 0 0 0 0 0
2 - 2.5	0 0 0 0 0 0
2.5 - 3	0 0 0 0 0 0
3 - 3.5	0 0 0 0 0 0
3.5 - 4	0 0 0 0 0 0
4 - 4.5	0 0 0 0 0 0
4.5 - 5	0 0 0 0 0 0
5 - 5.5	0 0 0 0 0 0
5.5 - 6	0 0 0 0 0 0

Tabla V – 1 Olas locales - Sector NORTE

NNE	11.25 - 33.75
Hs(m)	T02(s)
	0-2 2-4 4-6 6-8 8-10 10-12
0 - 0.5	8 30 0 0 0 0
0.5 - 1	0 1 0 0 0 0
1 - 1.5	0 0 0 0 0 0
1.5 - 2	0 0 0 0 0 0
2 - 2.5	0 0 0 0 0 0
2.5 - 3	0 0 0 0 0 0
3 - 3.5	0 0 0 0 0 0
3.5 - 4	0 0 0 0 0 0
4 - 4.5	0 0 0 0 0 0
4.5 - 5	0 0 0 0 0 0
5 - 5.5	0 0 0 0 0 0
5.5 - 6	0 0 0 0 0 0

Tabla V – 2 Olas locales - Sector NNE

NE 33.75 - 56.25

Hs(m)	T02(s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0 - 0.5	20	365	0	0	0	0
0.5 - 1	1	2641	83	0	0	0
1 - 1.5	0	188	561	0	0	0
1.5 - 2	0	0	36	0	0	0
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0

Tabla V-3 Olas locales - Sector NE

ENE 56.25 - 78.75

Hs(m)	T02(s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0 - 0.5	6	127	0	0	0	0
0.5 - 1	7	1275	200	0	0	0
1 - 1.5	0	317	2466	0	0	0
1.5 - 2	0	0	1361	12	0	0
2 - 2.5	0	0	165	107	0	0
2.5 - 3	0	0	0	41	0	0
3 - 3.5	0	0	0	2	0	0
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0

Tabla V -4 - Olas locales - 4 Sector ENE

E 78.75 - 101.25

Hs(m)	T02(s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0 - 0.5	0	23	0	0	0	0
0.5 - 1	0	276	29	0	0	0
1 - 1.5	0	88	307	0	0	0
1.5 - 2	0	0	273	4	0	0
2 - 2.5	0	0	125	59	0	0
2.5 - 3	0	0	6	72	0	0
3 - 3.5	0	0	1	26	5	0
3.5 - 4	0	0	0	8	4	0
4 - 4.5	0	0	0	0	4	0
4.5 - 5	0	0	0	1	3	0
5 - 5.5	0	0	0	0	1	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0

Tabla V-5 Olas locales - Sector ESTE

ESE 101.25 - 123.75

Hs(m)	T02(s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0 - 0.5	0	38	0	0	0	0
0.5 - 1	0	162	17	0	0	0
1 - 1.5	0	13	48	0	0	0
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0

Tabla V-6 Olas locales - Sector ESE

SE 123.75 - 146.25

Hs(m)	T02(s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0 - 0.5	0	0	0	0	0	0
0.5 - 1	0	0	0	0	0	0
1 - 1.5	0	0	0	0	0	0
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0

Tabla V-7 Olas locales - Sector SE

SSE 146.25 - 168.75

Hs(m)	T02(s)					
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0 - 0.5	0	0	0	0	0	0
0.5 - 1	0	0	0	0	0	0
1 - 1.5	0	0	0	0	0	0
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0
3 - 3.5	0	0	0	0	0	0
3.5 - 4	0	0	0	0	0	0
4 - 4.5	0	0	0	0	0	0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0

Tabla V – 8 Olas locales - Sector SSE

ENE 56.25 - 78.75

Hs(m)	Tm(s)													
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	
0 - 0.5	0	142	1327	223	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.5 - 1	0	9	1321	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1 - 1.5	0	0	19	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.5 - 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla V – 9 Olas Oceánicas - Sector ENE

E 78.75 - 101.25

Hs(m)	Tm(s)													
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	
0 - 0.5	0	19	1379	4817	6560	4317	1385	372	134	34	1	4	0	
0.5 - 1	0	0	510	1404	745	203	13	0	0	0	0	0	0	
1 - 1.5	0	0	16	115	40	10	0	0	0	0	0	0	0	
1.5 - 2	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	
2 - 2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla V –10 Olas oceánicas - Sector ESTE