

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS

SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS

SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA  
DEL CLIMA DE OLAS EN EL PUERTO DE RAWSON

INFORME FINAL

Mayo, 2009  
Informe LHA- 304-01-09

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DEL  
CLIMA DE OLAS EN EL PUERTO DE RAWSON

INFORME FINAL

RESUMEN

Mediante la aplicación de un modelo matemático se evaluaron las características de la agitación resultante en el interior del Puerto de Rawson por acción del oleaje exterior. Sobre la base de un conjunto de simulaciones se realizó una estimación de la persistencia (expresada en horas anuales) de determinados valores de altura significativa de ola en distintas posiciones del área portuaria.

PALABRAS CLAVE

olas – clima de olas – – modelación matemática – puertos – Rawson

Informe	LHA-304-01-09
Fecha	Mayo, 2009
PROYECTO	891
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección Puertos

**INA  
LABORATORIO DE HIDRAULICA**

**DIRECTOR**

*Ing. J.C. De Lio*

**JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA**

*Ing. R. D. Castellano*

---

**Informe producido por**

*Ing. N. Tomazin*

**Equipo de trabajo**

*Ing. R. Cáceres  
Téc. Mec. C.A. Haspert  
M.M.O. S.L. Peralta*

## TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
2	OBJETIVOS.....	1
3	METODOLOGIA.....	2
4	INFORMACION DE BASE .....	2
4.1	Batimetría .....	3
4.2	Marea astronómica .....	3
4.3	Marea meteorológica .....	4
4.4	Régimen de Olas y vientos .....	5
4.5	Olas resultantes.....	8
4.6	Datos de oleaje en el área costera.....	9
5	MODELACION MATEMÁTICA .....	21
5.1	Implementación .....	22
5.2	Grillas de cálculo.....	22
5.3	Condiciones de contorno .....	24
5.4	Escenarios de cálculo.....	25
5.5	Selección de puntos de control.....	27
5.6	Análisis de Resultados para Nivel Medio del mar .....	28
5.7	Influencia de la variación del nivel del mar .....	32
6	ANÁLISIS DE EXCEDENCIA PARA $H_s = 0.5$ M.....	40
7	CONCLUSIONES.....	44

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DEL CLIMA  
DE OLAS EN EL PUERTO DE RAWSON

INFORME FINAL

Mayo, 2009

## 1 INTRODUCCION

A requerimiento de la Dirección General de Puertos de la Secretaría de Infraestructura, Planeamiento y Servicios Públicos de la Provincia del Chubut, se realiza una evaluación del clima de olas en el interior del Puerto de Rawson.

El estudio se realiza bajo los Términos de Referencia establecidos en el Acta Complementaria N°10 al Convenio Marco de Asistencia Recíproca suscripto en agosto de 2002 entre la Provincia y el INA, y ratificado entre las partes mediante Acta 740 del 9 de agosto de 2007.

## 2 OBJETIVOS

El propósito fundamental de este estudio consiste en evaluar las características de agitación que se genera en el interior del Puerto de Rawson por acción del oleaje exterior.

Contando una descripción detallada del clima de olas en la zona de influencia, se pretende además realizar una estimación de la persistencia (expresada en horas

anuales) de determinados valores de altura significativa de ola en distintas posiciones del área portuaria.

### 3 METODOLOGIA

Se aplicó el modelo BOUSS2D para determinar la transformación del oleaje desde una posición exterior en la cual se conocen sus propiedades estadísticas (altura, dirección, período y frecuencia de ocurrencia) hasta tres posiciones ubicadas en el interior del puerto: una en la boca, otra en el área central del vaso portuario y una tercera frente al muelle.

Se evaluó un conjunto de eventos caracterizado por alturas de ola, dirección de incidencia y período medio.

La frecuencia de ocurrencia de un determinado evento en la posición exterior es conocida y fue adoptada para caracterizar la frecuencia del evento homólogo resultante de la transformación realizada en las posiciones interiores.

### 4 INFORMACION DE BASE

La información básica utilizada es la caracterización del clima de olas en una región costera próxima al puerto de Rawson producido por el INA:

*DEFENSA COSTERA EN PLAYA MAGAGNA PARTE 1 - CARACTERIZACION DEL CLIMA DE OLAS. Informe LHA- 268-01-07. Diciembre, 2007.*

#### **4.1 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 y de un relevamiento local realizado al efecto. En particular se utilizó la *Carta N° 68. Río Chubut y Proximidades. Escala 1:25.000*

La DGIP proveyó de un relevamiento batimétrico realizado entre abril y julio de 2006 a fin de caracterizar la configuración topográfica y batimétrica del área costera aledaña y el interior del vaso portuario.

El relevamiento fue realizado a lo largo del el frente costero sobre 29 perfiles desde cota +7 MOP hasta cota -10 MOP. La extensión de los perfiles fue de unos 2000 m.

En el interior del puerto se dispuso de un relevamiento batimétrico efectuado en julio de 2006 para el control de sedimentación del canal de acceso. Las cotas están referidas al 0 MOP.

#### **4.2 Marea astronómica**

La profundidad de agua tiene un efecto sustancial sobre los patrones de propagación del oleaje, especialmente en el área costera. Se dispuso de información mareológica en el Puerto de Rawson, (43° 20' S, 65° 04' W) (**Tabla 4.1.**).

Alturas en m sobre el plano de reducción				Amplitud	
Pleamar		Bajamar			
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
5,22	4,46	0,19	1,02	4,95	3,44

**Tabla 4.1. Marea astronómica en el Puerto de Rawson (SHN, 2007)**

El régimen mareológico es semidiurno. Las alturas de marea determinadas por el SHN están referidas al plano de reducción que pasa a 2,75m por debajo del nivel medio.

De acuerdo a la relación entre planos de referencia indicados precedentemente, la pleamar máxima referida al 0 MOP resulta + 3.59 m y la pleamar media + 2,83 m. La posición del nivel medio resulta + 1,12 m MOP.

### 4.3 Marea meteorológica

La marea meteorológica es la modificación por causas climáticas de los niveles del mar debidos a los factores puramente astronómicos.

Varios mecanismos pueden contribuir a ello en áreas costeras: a) variaciones de la presión atmosférica. b) apilamiento causado por vientos soplando hacia la costa. c) la inclinación de la superficie libre debido a efectos geostróficos sobre el agua moviéndose a lo largo de la costa por efecto del viento soplando en esa misma dirección. d) sobre-elevación por efecto del paso de las olas (wave set-up).

La cuantificación de este fenómeno es de extrema importancia porque determina entre otros efectos, la magnitud de las olas capaces de alcanzar la costa. En

general se admite a partir de observaciones que este fenómeno adquiere valores del orden de 0.80 a 1.00 m para la costa patagónica argentina, pero no se conoce una cuantificación del mismo sobre bases analíticas y para el sitio específico de Puerto de Rawson.

Con motivo de la ampliación del Puerto de Rawson, entre el 21/01/02 y el 30/01/04 se realizaron medición de niveles de mareas dentro del recinto portuario, cuyos niveles se referenciaron al cero MOP.

Aunque el registro presenta discontinuidades, han permitido estimar los valores máximo, medio y mínimo se indican en la **Tabla 4.2.** y establecer que los mismos están en consonancia con los predichos por el Servicio de Hidrografía Naval en sus tablas de marea del 2007 (**Tabla 4.1.**)

Nivel máximo	+3.55 MOP
Nivel medio	+0.96 MOP
Nivel mínimo	-1.74 MOP

**Tabla 4.2: Valores medidos de nivel de marea**

Como conclusión, en los dos años de registro disponibles no se apreciaron efectos meteorológicos combinados con los niveles máximos de marea, ya que no se superó la cota + 3.59, que es la máxima marea astronómica.

#### **4.4 Régimen de Olas y vientos**

Los datos de base utilizados en este estudio corresponden a aguas intermedias y fueron generados por un Modelo Global de Generación de Oleaje (**ARGOSS**, Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services). Esos

resultados son calibrados y validados, mediante la utilización de información satelital (entre otros datos), lo cual mejora la confiabilidad de los datos en áreas muy extensas de todos los océanos.

Los datos utilizados en este estudio corresponden a la ubicación 44° 00'S y 63° 46' W entre el 1/1/96 y el 31/12/2005.

Los datos han sido generados por el modelo Wavewatch III (Tolman, 2002) que es un modelo de oleaje de 3<sup>a</sup> generación, desarrollado por la NOAA/NCEP (*National Oceanic and Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Predictions*).

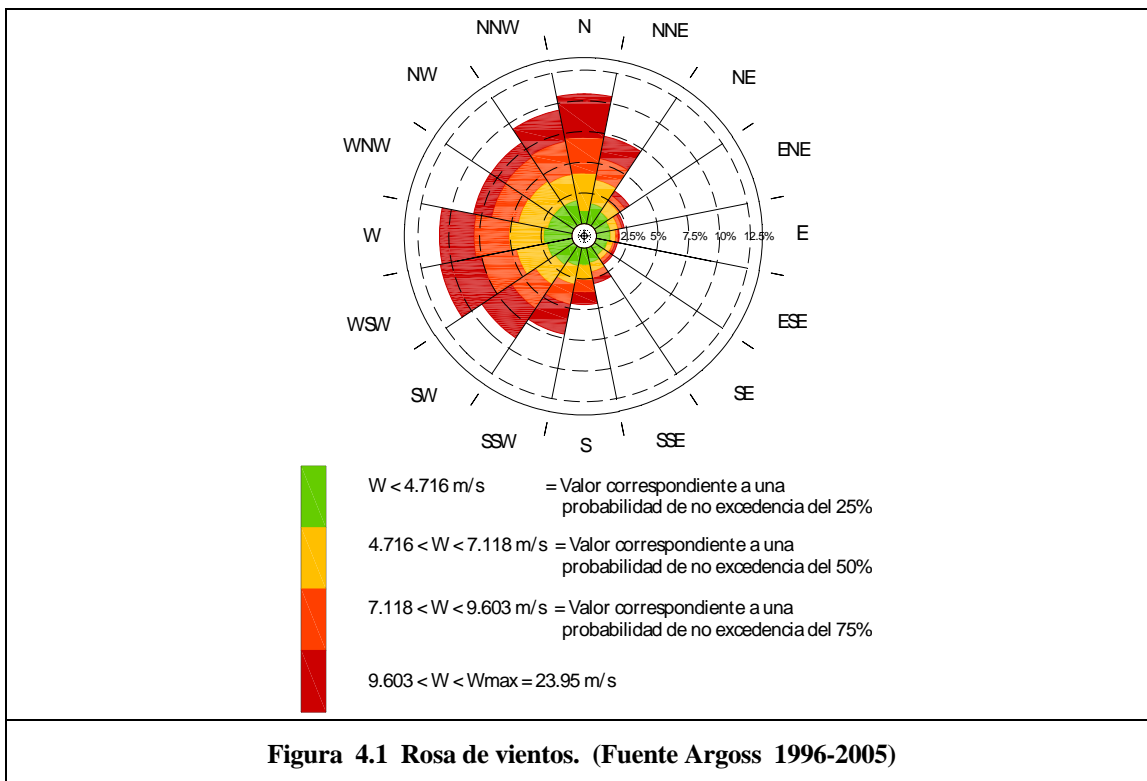
Los datos generados consistieron en una serie cronológica que abarca de 10 años con un intervalo de 3 horas. La serie comprende un total de 29.224 datos. La ubicación del nodo de cálculo se halla a unos 125 Km al ESE del Puerto de Rawson.

Los vientos en superficie (a 10 m de altura) son caracterizados por intensidad media y dirección, con un dato cada 3 horas. La **Tabla 4.3.** muestra los valores clasificados en intervalos de intensidad de 2,5 m/s para una rosa de 16 direcciones y frecuencias indicadas son por mil.

W (m/s)	DIRECCION (°)																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 2.5	6.1	5.0	5.0	4.6	4.6	4.6	3.6	4.6	5.3	4.4	6.0	5.8	6.7	5.9	6.9	6.4	85.7
2.5 - 5	13.1	13.6	9.2	7.3	6.9	5.2	5.3	8.1	9.8	11.7	13.8	17.6	18.9	16.2	15.0	14.6	186.3
5 - 7.5	25.5	20.9	10.5	6.6	4.2	3.9	4.6	7.5	12.3	16.2	21.4	26.2	29.6	25.7	25.0	24.4	264.6
7.5 - 10	29.1	16.0	5.1	2.9	1.7	1.9	2.6	5.2	9.6	16.2	21.8	28.7	27.0	20.1	21.1	25.3	234.3
10 - 12.5	19.6	11.4	2.9	0.8	0.5	1.2	1.3	2.3	4.9	12.0	13.4	18.6	16.8	9.8	10.1	15.2	140.8
12.5 - 15	8.6	4.2	0.6	0.4	0.1	0.3	0.2	0.9	2.4	6.2	8.5	7.6	5.3	2.6	1.8	5.7	55.3
15 - 17.5	1.7	0.6	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.4	0.6	2.5	2.6	2.2	1.5	0.2	0.2	1.2	14.0
17.5 - 20	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	0.8	0.7	0.0	0.0	0.0	0.2	3.4
20 - 22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
22.5 - 25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4
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
<b>TOTAL</b>	<b>104.0</b>	<b>71.7</b>	<b>33.6</b>	<b>22.8</b>	<b>18.2</b>	<b>17.3</b>	<b>17.6</b>	<b>29.1</b>	<b>45.2</b>	<b>70.6</b>	<b>88.6</b>	<b>107.6</b>	<b>106.0</b>	<b>80.4</b>	<b>80.1</b>	<b>92.9</b>	<b>985.59</b>
	CALMA																<b>14.406</b>
	TOTAL																<b>1000</b>

**Tabla 4.3– Distribución frecuencial de vientos por dirección e intensidad**

La **Tabla 4.3** muestra que las direcciones en las que el viento sopla hacia la costa acumulan un 18.4 % del total de casos registrados. Los vientos más frecuentes son del WSW, W y del N y no son generadores de oleaje que pueda alcanzar la costa. Se observa además, que los valores de intensidades máximas corresponden al cuadrante SW y también a la dirección WNW, resultando del orden de 80 a 90 Km/h.



En el gráfico polar de la **Figura 4.1.** se observa la gran predominancia de los vientos que en el área del Puerto de Rawson soplan desde tierra. La dirección incidente en la costa que mayor persistencia tiene es el NNE, aunque las olas generadas por estos vientos resultan casi paralelas a la línea general de la costa.

#### 4.5 Olas resultantes

Las olas en el área son el resultado de la superposición de olas generadas localmente por el viento (olas locales o *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 oceánica, el 46,3 % de los datos se componen de la superposición de olas oceánicas y locales. Las olas oceánicas están presentes en el 77,5% de los datos, mientras que las olas de viento se hallan en el 68,9%.

El 22,5% de datos está constituido sólo por olas locales y el 31,1% sólo por olas oceánicas (swell).

#### **4.6 Datos de oleaje en el área costera**

La modelación de la propagación de las olas desde el punto de pronóstico indicado hasta el área costera se realizó en 2 etapas. En primera instancia se aplicó el modelo SWAN para caracterizar el clima de olas sobre la isobata -12 m frente al área costera en estudio, a partir de los datos disponibles costa afuera. Las coordenadas de la posición más próxima al puerto y que en consecuencia son de interés para el presente estudio son: X=3.579.309 (Este), Y=5.199.077 (Norte), y se halla a unos 3000 m al SE de la entrada al puerto. Los resultados en esa posición serán considerados como característicos del área costera en las proximidades del puerto

Los resultados de la modelación realizada correspondientes a la posición indicada se presentan a continuación. En general los porcentajes se refieren al total de datos del tipo de oleaje analizado. Debe tenerse en cuenta que, como se ha indicado previamente, en el área oceánica las olas locales generadas por viento representan un 68,9% del total de olas, mientras que las olas oceánicas constituyen el 77,5% del total de datos.

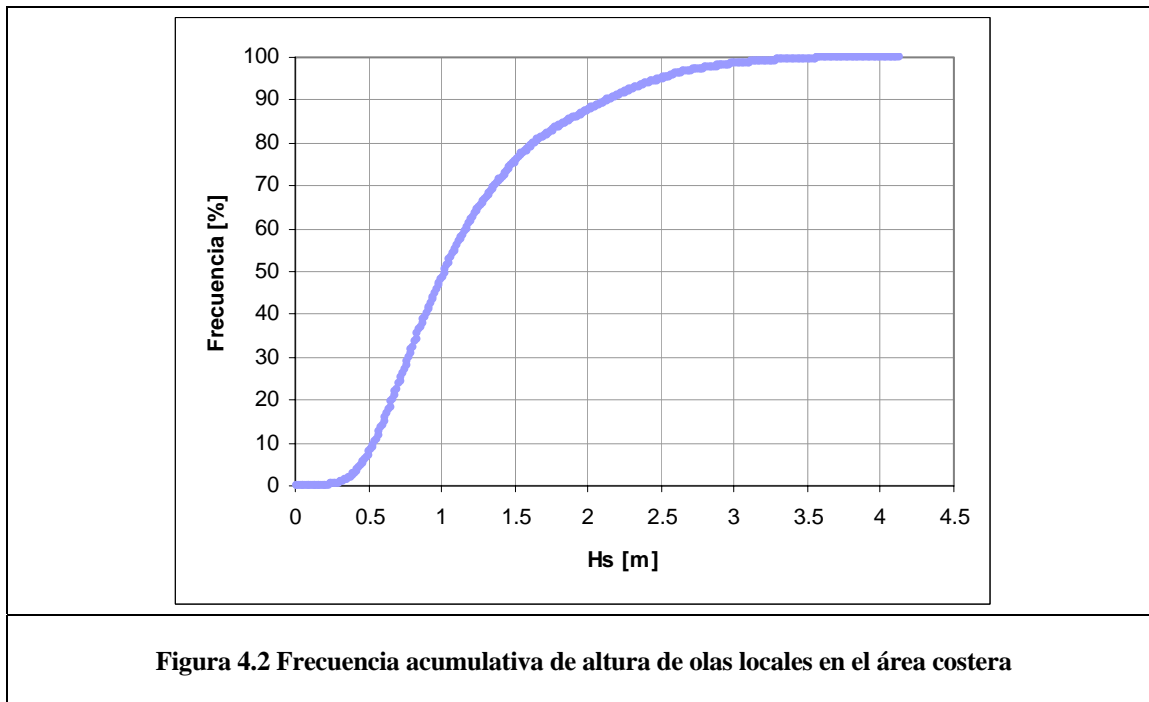
Dada la persistencia de vientos del sector SW, al área costera arriba sólo una fracción limitada de las olas generadas por vientos locales, que como se verá es

---

aproximadamente un 35%. Las olas oceánicas (swell) por el contrario, debido a su origen en aguas oceánicas abiertas, pueden alcanzar la costa casi en su totalidad. Como consecuencia de lo indicado, en el área costera predominan notablemente las olas oceánicas (swell) caracterizadas por amplitudes en el entorno de 1 m y un amplio rango de periodos entre 10 y 20 segundos.

### ***Olas Locales***

La **Figura 4.2.** muestra la distribución acumulativa de altura de olas locales (wind sea) en la posición indicada, de acuerdo a los resultados de la transformación efectuada mediante simulación numérica de los datos suministrados en la posición 44° 00'S, 63° 46'W.



En el área costera el máximo valor calculado resultó  $H_s = 4.13$  m. El 90 % de las olas es menor que 2.15 m. En términos de cuartiles, el 25% de las olas resultan inferiores a 0.73 m, el 50% inferior a 1.03 m y el 75% inferior a 1.49 m.

La **Tabla 4.4.** muestra la distribución altura significativa-período medio para la totalidad de datos resultantes en el área costera.

La **Tabla 4.4.** permite además determinar que 10.537 datos (sobre un total de 29.224) son olas locales que han llegado al área costera, lo que indica que este tipo de oleaje persiste aproximadamente un 35% del tiempo en el área costera.

Hs(m)	Tm(s)							Total [%]
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	
0 - 0.5	68	580	0	0	0	0	0	6.4
0.5 - 1	1	2878	1277	0	0	0	0	40.9
1 - 1.5	0	131	2621	69	0	0	0	27.8
1.5 - 2	0	0	655	595	0	0	0	12.3
2 - 2.5	0	0	34	653	66	0	0	7.4
2.5 - 3	0	0	0	241	122	0	0	3.6
3 - 3.5	0	0	0	41	87	2	0	1.3
3.5 - 4	0	0	0	6	25	0	0	0.3
4 - 4.5	0	0	0	0	3	0	0	0.0
4.5 - 5	0	0	0	0	0	0	0	0.0
<b>Total [%]</b>	0.7	35.3	45.2	15.8	3.0	0.0	0.0	100.0

**Tabla 4.4. Olas locales en el área costera. Distribución por altura y periodo**

Las **Figuras 4.3, 4.4 y 4.5** presentan la distribución direccional, por altura y por período respectivamente de las olas locales en el área costera. Los porcentajes se refieren al total de olas locales.

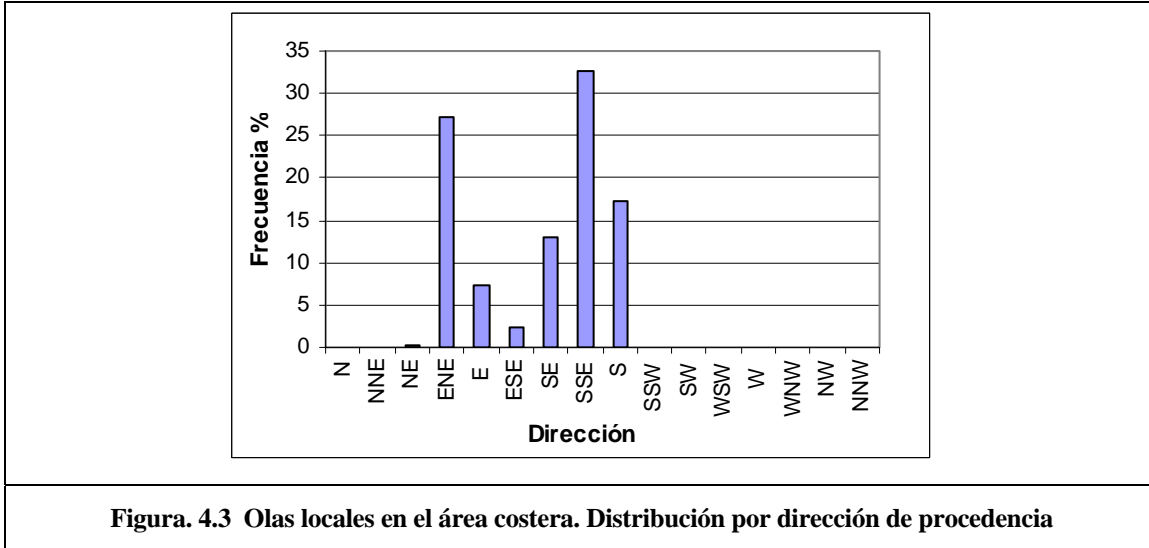


Figura. 4.3 Olas locales en el área costera. Distribución por dirección de procedencia

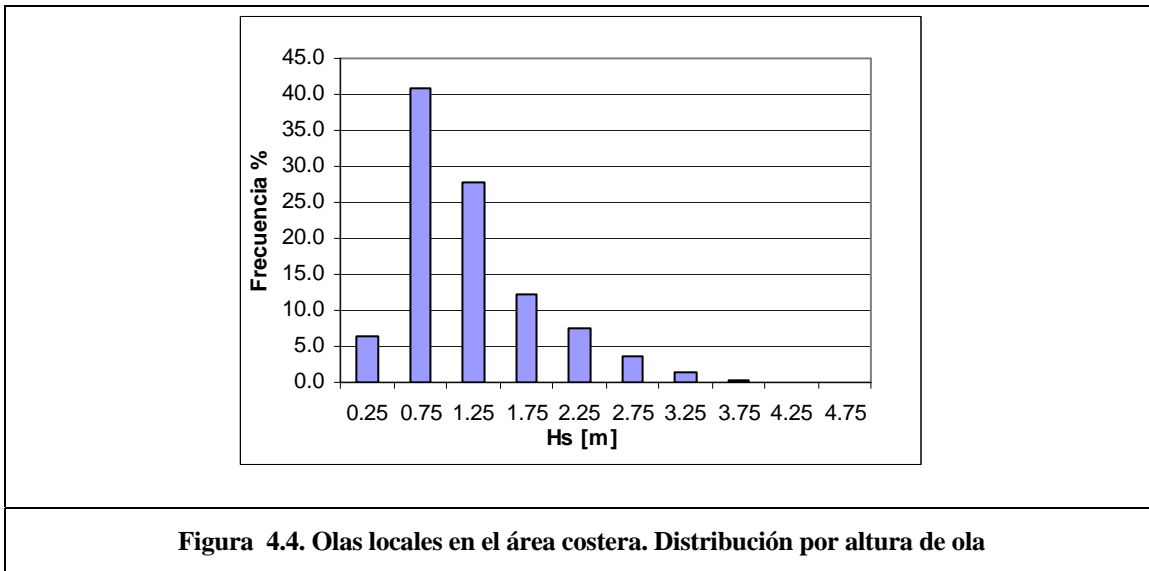
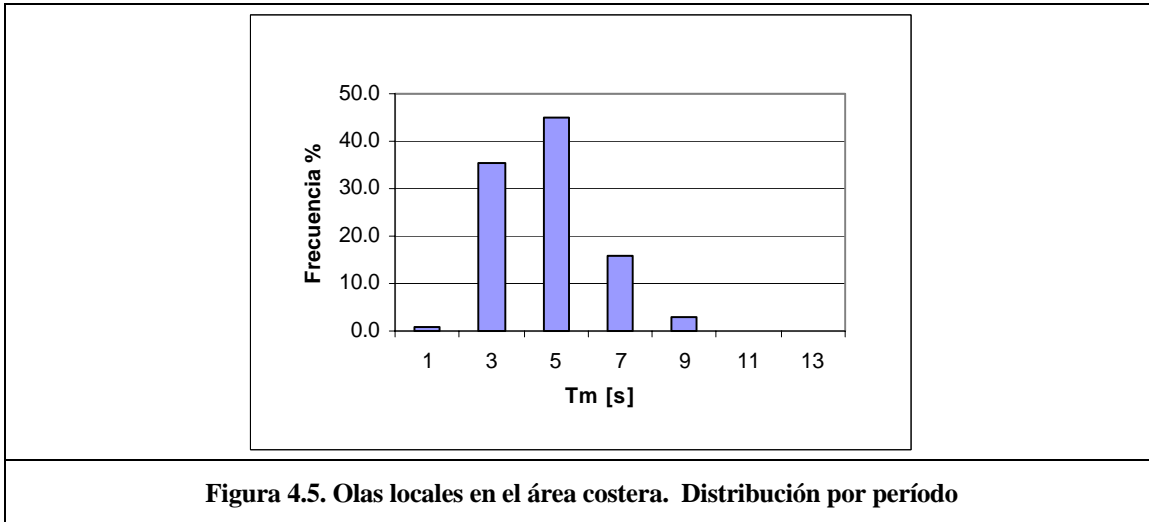
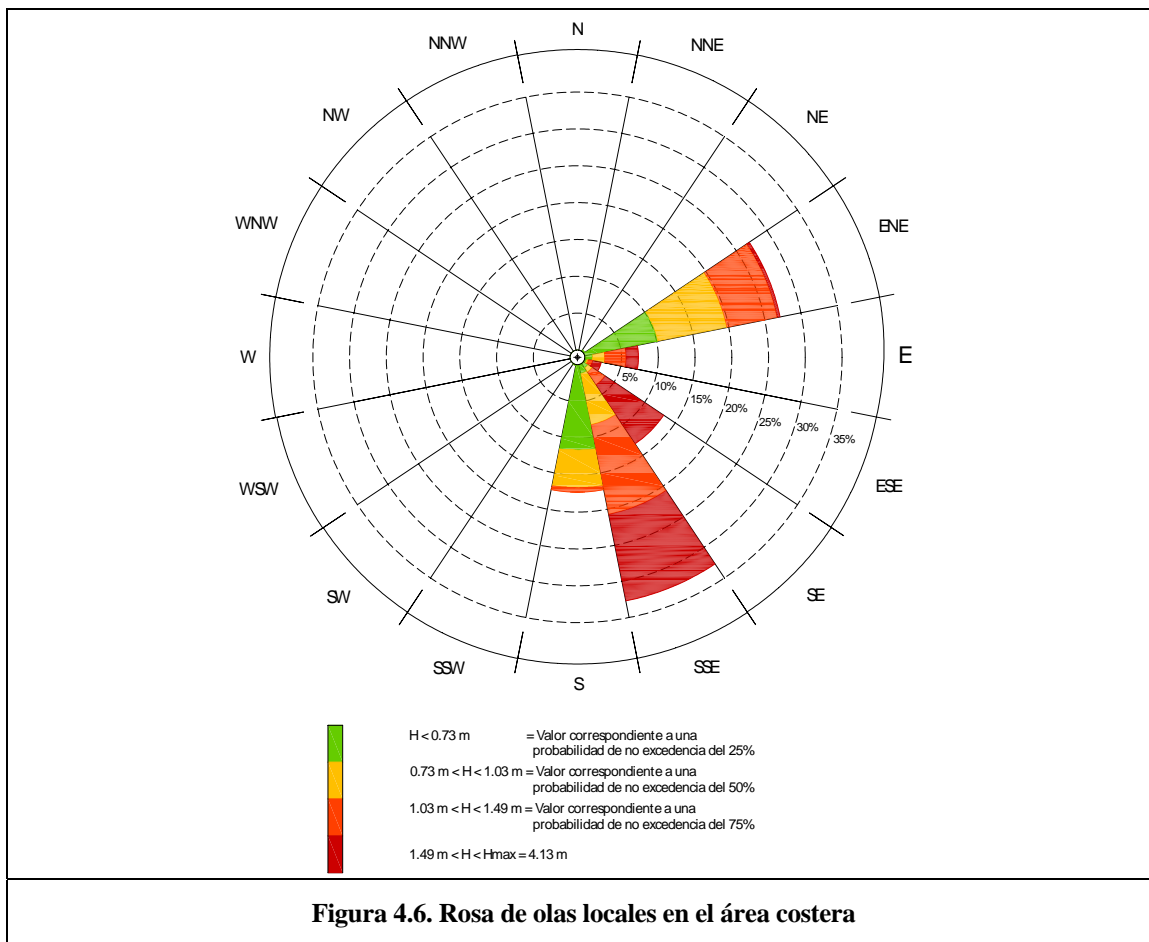


Figura 4.4. Olas locales en el área costera. Distribución por altura de ola



La **Figura 4.6** muestra la distribución polar de frecuencia de altura de olas en el área costera. La altura de olas se ha clasificado según los cuartiles definidos anteriormente y cuyos límites se indican en la Figura.



Puede notarse que en la región costera las olas locales generadas por viento más frecuentes proceden del sector SSE, y en menor porcentaje desde la dirección ENE. En el área costera, las olas de mayor amplitud proceden primordialmente del SE y SSE, y en menor medida del NE (Figura 4.6).

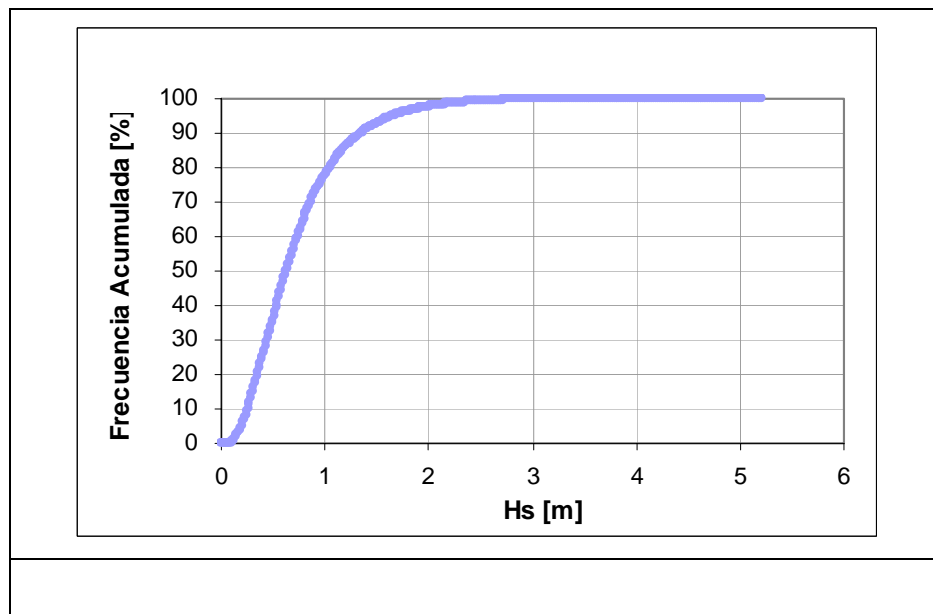
La Tabla 4.5. ha sido expresada en forma porcentual respecto del total de datos del archivo (29.216) y representa en consecuencia la persistencia en el tiempo de una condición dada. La persistencia de las olas de viento en la región costera alcanza casi el 35%, lo que representa algo más de 3000 horas por año.

Hs(m)	DIRECCION																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 0.5	0.00	0.00	0.06	0.89	0.09	0.02	0.06	0.02	1.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.22
0.5 - 1	0.00	0.00	0.00	5.63	0.80	0.16	0.40	2.51	4.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.23
1 - 1.5	0.00	0.00	0.00	2.74	1.05	0.21	0.77	4.65	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.66
1.5 - 2	0.00	0.00	0.00	0.15	0.48	0.17	0.80	2.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.28
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.16	1.24	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.58
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.87	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.24
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.32	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>	0.00	0.00	0.06	9.42	2.53	0.82	4.56	11.35	6.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>34.76</b>

**Tabla 4.5. Distribución direccional de olas locales en el área costera**

**Olas Oceánicas**

La **Figura 4.7** muestra la distribución frecuencial acumulada de altura de olas oceánicas en la región costera. La máxima altura resultó (para Nivel medio del mar) Hs = 5.22 m. El 90 % de las olas es menor que 1.35 m En términos de cuartiles, el 25% de las olas resultan inferiores a 0.40 m, el 50% inferior a 0.64 m y el 75% inferior a 0.95 m.



La **Tabla 4.6.** muestra la distribución Hs-Tm para la totalidad de los datos, en intervalos de altura de 0,50 m y de período de 2 s.

La **Tabla 4.6.** contiene 20.740 datos de olas oceánicas sobre un total de 29.224, es decir que el 71% del tiempo las olas oceánicas arriban al área costera del Puerto de Rawson.

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	
0 - 0.5	0	1	489	2041	2758	1311	448	154	38	6	0	34.9
0.5 - 1	0	0	765	3530	3542	863	62	1	3	0	0	42.3
1 - 1.5	0	0	109	1474	1271	331	7	0	0	0	0	15.4
1.5 - 2	0	0	0	440	490	115	9	0	0	0	0	5.1
2 - 2.5	0	0	0	58	235	46	11	0	0	0	0	1.7
2.5 - 3	0	0	0	7	81	12	4	0	0	0	0	0.5
3 - 3.5	0	0	0	0	16	0	3	0	0	0	0	0.1
3.5 - 4	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
4.5 - 5	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0.0
5 - 5.5	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0.0
5.5 - 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Total [%]	0.0	0.0	6.6	36.4	40.5	13.0	2.6	0.7	0.2	0.0	0.0	100.0

**Tabla 4.6. Olas oceánicas en el área costera. Distribución por altura y periodo**

Las olas oceánicas más altas se asocian a períodos medios de 8 a 10 s. Las olas oceánicas de períodos largos (14 a 20 s) presentan alturas significativas de hasta 1 m.

Las **Figuras 4.8, 4.9 y 4.10** muestran la distribución por dirección, altura y período respectivamente de las olas oceánicas en la región costera. Los porcentajes se refieren al total de olas oceánicas.

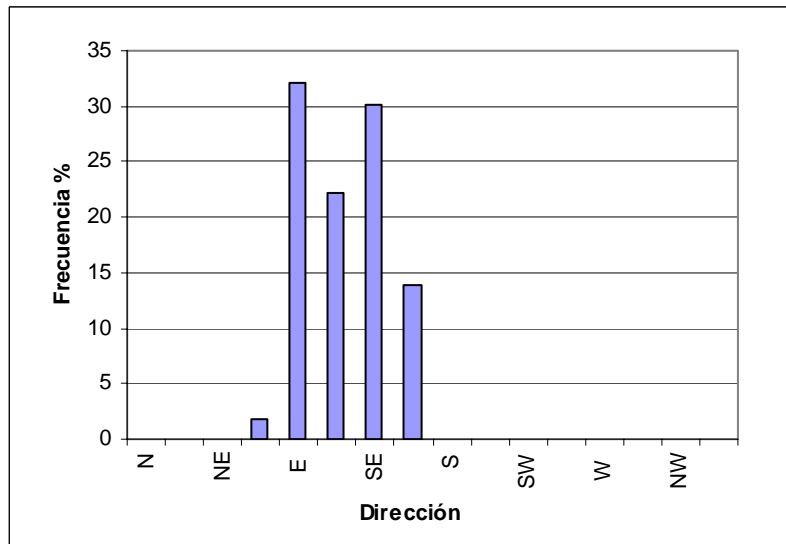


Figura 4.8. Olas oceánicas en la región costera. Distribución por dirección de procedencia

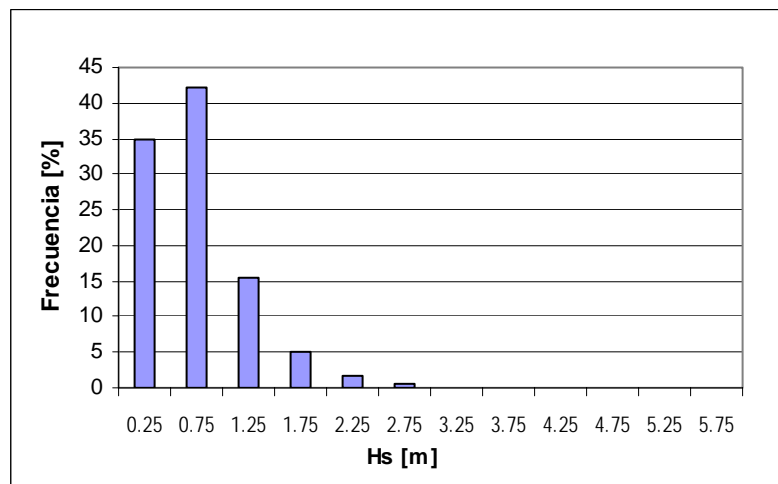
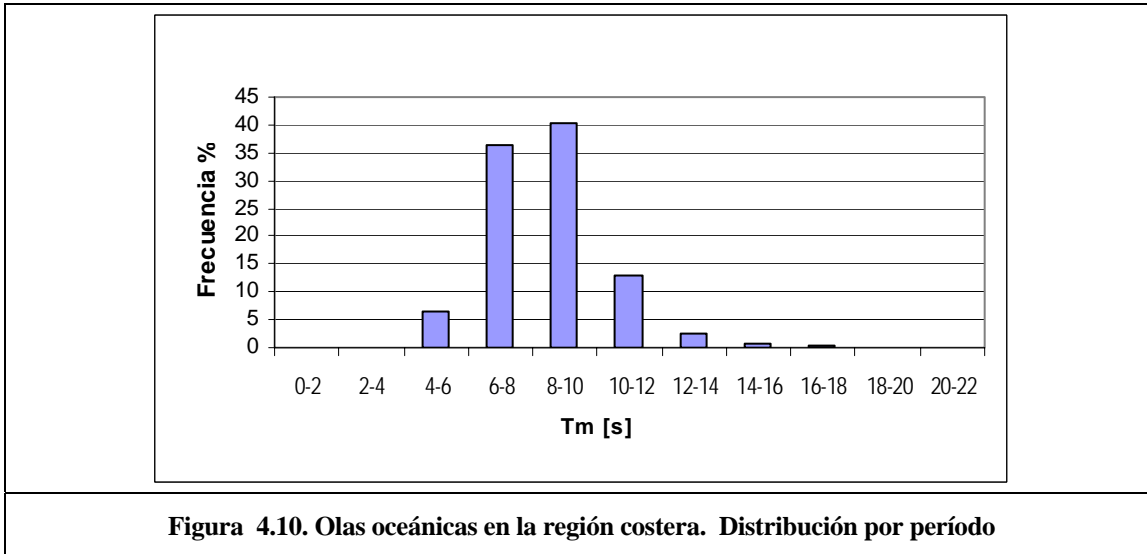
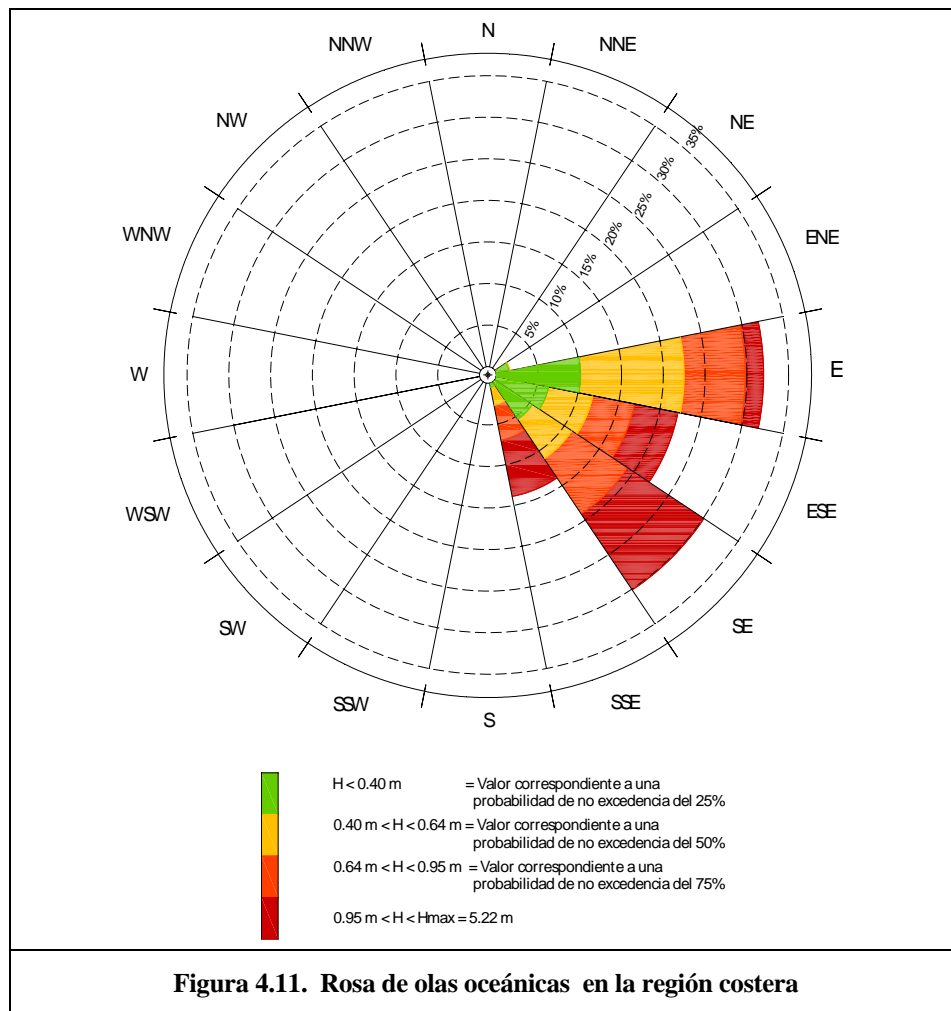


Figura 4.9. Olas oceánicas en la región costera. Distribución por altura de ola



Tal como lo muestran las **Figura 4.8** y **4.11** las olas oceánicas más frecuentes que se presentan en la región costera próxima al puerto proceden del E y del SE.

La **Tabla 4.7.** presenta información equivalente, clasificada en intervalos de altura de ola de 0,50 m, lo que permite discriminar con mejor resolución la distribución direccional del oleaje, y establecer que las olas oceánicas de mayor amplitud que llegan a la costa proceden del ESE.



La **Tabla 4.7.** ha sido expresada en forma porcentual respecto del total de datos del archivo. Las olas oceánicas se presentan durante un 71% del tiempo en el área costera, lo que representa unas 6.220 horas al año.

Hs (m)	DIRECCION																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 0.5	0.00	0.00	0.00	1.20	11.26	6.02	5.48	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.80
0.5 - 1	0.00	0.00	0.00	0.02	10.27	6.31	8.83	4.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.00
1 - 1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.12	2.40	4.48	2.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.93
1.5 - 2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.66	1.68	1.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.61
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.23	0.62	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.23	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
5 - 5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
5.5 - 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>TOTAL</b>	0.00	0.00	0.00	1.22	22.79	15.77	21.37	9.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>70.99</b>

**Tabla 4.7. Distribución direccional de olas oceánicas en el área costera**

## 5 MODELACION MATEMÁTICA

La modelación de la agitación interior de un puerto producida por acción de las olas requiere la consideración de procesos físicos lineales y no lineales generados por la acción combinada de la excitación exterior (oleaje), la presencia de estructuras portuarias con determinadas características geométricas y propiedades reflejantes o absorbentes de la energía y las características morfológicas del lecho marino que en aguas restringidas es generador de procesos de refracción y rotura del oleaje.

Por otra parte, la significativa variación de los niveles del mar en la zona del puerto de Rawson como consecuencia de los ciclos de marea, constituye un elemento que aporta mayor complejidad al estudio de esta problemática.

El desarrollo de un estudio de este tipo demanda la aplicación de técnicas numéricas avanzadas que permitan encarar la solución de problemas matemáticamente complejos. Dado este contexto, para el desarrollo del estudio solicitado en el Puerto de Rawson se aplicó el modelo BOUSS-2D<sup>1</sup>, el cual es considerado especialmente apto para este propósito y dada su versatilidad permitió estudiar los efectos de la incidencia de diferentes escenarios de propagación del oleaje sobre las características de la agitación interna del puerto.

BOUSS-2D es un modelo numérico perteneciente al sistema SMS (Surface-Water Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de U.S.Army. El mismo se encuentra basado en una solución dominio-tiempo de ecuaciones tipo Boussinesq. El **ANEXO I** presenta una descripción detallada de las principales características de este modelo.

---

*1 Nwogu, O. G. and Zeki D. "BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors". Report 1: Theoretical Background and User's Manual (2001).*

---

## **5.1 Implementación**

La implementación de modelo requiere básicamente de la definición del área a modelar, la elección de una resolución para la discretización espacial ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) y la construcción de una malla o grilla de cálculo, y de un paso temporal  $\Delta t$ . En segunda instancia es necesario definir las propiedades de los contornos y los escenarios hidrodinámicos que constituyen las condiciones de borde.

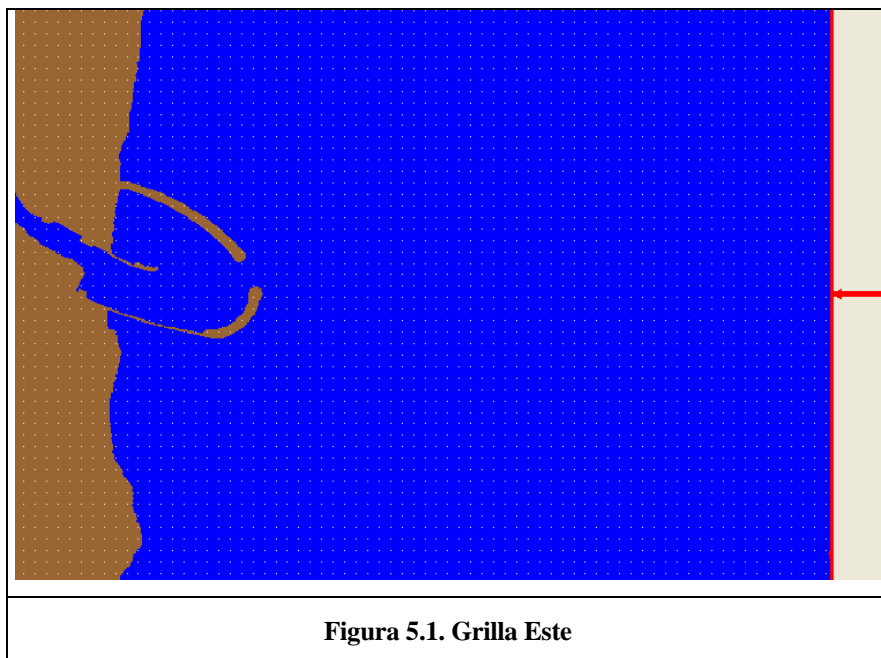
## **5.2 Grillas de cálculo**

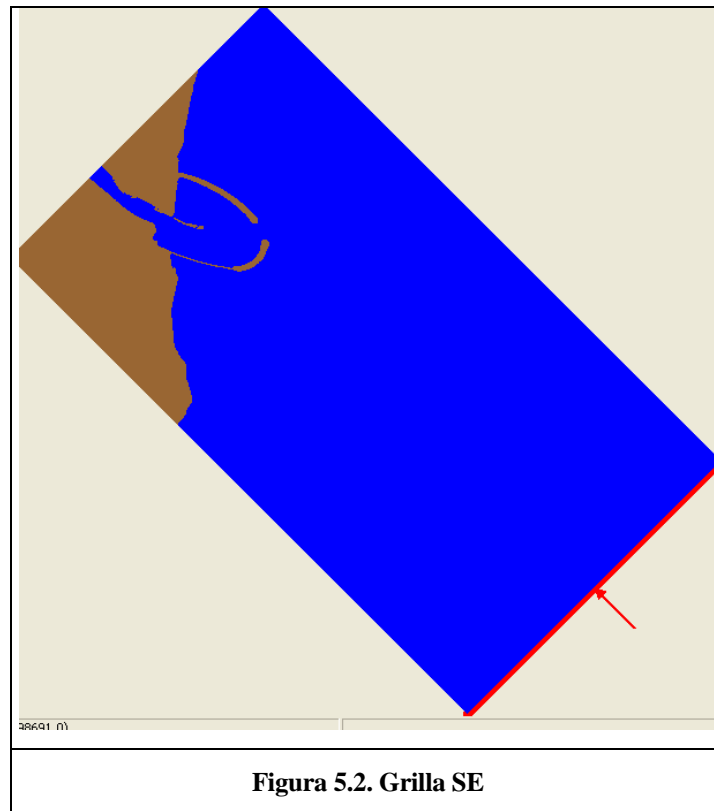
Para la construcción de las grillas de cálculo necesarias para la aplicación del modelo se utilizó la información batimétrica provista por la DGP e información adicional extraída de la Carta Náutica N° 68 del SHN, tal como se describe en el **Apartado 4.1.**

El área modelada para este estudio abarca una superficie del orden de 8 Km<sup>2</sup>, con más de 2.3 Km de extensión a lo largo de la línea de costa. En función del conjunto de escenarios de clima de olas a analizar, se construyeron dos grillas de cálculo con diferentes orientaciones, con lo cual fue posible analizar la propagación del oleaje desde todas las direcciones consideradas de interés para este estudio. El detalle de cada una de las grillas utilizadas es el siguiente:

- **Grilla Este:** con el eje x coincidente con la dirección Este ( $\alpha=0^\circ$ ). Con un paso de discretización espacial de  $\Delta x=\Delta y= 5$  m y un total de 446 filas x 640 columnas, contabilizando 219852 celdas oceánicas y 65588 celdas secas.
- **Grilla SE:** con el eje x coincidente con la dirección Sudeste ( $\alpha=-45^\circ$ ). Con un paso de discretización espacial de  $\Delta x=\Delta y= 5$  m y un total de 440 filas x 794 columnas, contabilizando 275984 celdas oceánicas y 73376 celdas secas.

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran las grillas de cálculo confeccionada para la aplicación del modelo, permitiendo observar la totalidad del área modelada y resaltando el borde matemático utilizado para el ingreso de los datos de olas y desde el cual se propaga el oleaje hacia la costa y el interior del puerto.





### 5.3 Condiciones de contorno

Los bordes laterales del modelo (bordes “oceánicos”) fueron considerados como fronteras totalmente absorbentes, permitiendo de esta manera el egreso del sistema de la energía reflejada por la presencia de las estructuras portuarias y la costa.

Para los contornos interiores del puerto y la costa se consideraron diferentes condiciones de reflexión, expresados en el modelo a través del coeficiente de atenuación (damping)  $\alpha$ , en este caso se utilizaron los siguientes valores:

- Zona de playa exterior:  $\alpha=0.75$

- Zona de playa interior del puerto:  $\alpha=0.5$
- Margen del río:  $\alpha=0.4$
- Escolleras Norte y Sur:  $\alpha=0.45$
- Zona de muelles:  $\alpha=0.1$

Estos valores fueron seleccionados sobre la base de recomendaciones bibliográficas y experiencias previas obtenidas en trabajos similares.

#### **5.4 Escenarios de cálculo**

Sobre la base de los resultados obtenidos en el análisis detallado del clima de olas en la región se seleccionó un amplio conjunto de escenarios destinados a evaluar las características más relevantes de la agitación interior del puerto. Cada uno de estos escenarios se encuentra definido por un espectro de energía que representa el oleaje que se propaga desde el borde oceánico de la grilla, y por un determinado nivel de la marea.

Para la representación del oleaje se seleccionó el espectro TMA, disponible en el menú de opciones del modelo Bouss 2D y especialmente recomendado para la propagación en aguas someras o poco profundas. La representación de las características del oleaje para cada espectro requiere la definición de un valor de altura de ola ( $H_s$ ), período pico ( $T_p$ ) y dirección de propagación.

En las **Tablas 5.1** y **5.2** se presenta el resumen de la información correspondiente al conjunto casos seleccionados para las simulaciones, tanto para olas locales como para olas oceánicas.

**Tabla 5.1. Caracterización del oleaje analizado para olas locales**

Hs (m)			DIRECCION							
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S		
0	-	0.5								
0.5	-	1								
1	-	1.5	H=1.25 ; Tp=5	H=1.25 ; Tp=5	H=1.25 ; Tp=5	H=1.25 ; Tp=5	H=1.25 ; Tp=5	H=1.25 ; Tp=5		
1.5	-	2	H=1.75 ; Tp=5.5	H=1.75 ; Tp=5.5	H=1.75 ; Tp=5.5	H=1.75 ; Tp=5.5	H=1.75 ; Tp=5.5	H=1.75 ; Tp=5.5		
2	-	2.5		H=2.25 ; Tp=6	H=2.25 ; Tp=6	H=2.25 ; Tp=6	H=2.25 ; Tp=6	H=2.25 ; Tp=6		
2.5	-	3		H=2.75 ; Tp=6.5	H=2.75 ; Tp=6.5	H=2.75 ; Tp=6.5	H=2.75 ; Tp=6.5	H=2.75 ; Tp=6.5		
3	-	3.5			H=3.25 ; Tp=7	H=3.25 ; Tp=7	H=3.25 ; Tp=7	H=3.25 ; Tp=7		
3.5	-	4				H=3.75 ; Tp=7.5				
4	-	4.5								

**Tabla 5.2 Caracterización del oleaje analizado para olas oceánicas**

Hs (m)			DIRECCION							
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S		
0	-	0.5								
0.5	-	1	H=0.75; Tp=14	H=0.75; Tp=14	H=0.75; Tp=14	H=0.75; Tp=14	H=0.75; Tp=14	H=0.75; Tp=14		
1	-	1.5		H=1.25; Tp=14	H=1.25; Tp=14	H=1.25; Tp=14	H=1.25; Tp=14	H=1.25; Tp=14		
1.5	-	2		H=1.75; Tp=13.5	H=1.75; Tp=13.5	H=1.75; Tp=13.5	H=1.75; Tp=13.5	H=1.75; Tp=13.5		
2	-	2.5		H=2.25; Tp=13	H=2.25; Tp=13	H=2.25; Tp=13	H=2.25; Tp=13	H=2.25; Tp=13		
2.5	-	3			H=2.75; Tp=12.5	H=2.75; Tp=12.5	H=2.75; Tp=12.5	H=2.75; Tp=12.5		
3	-	3.5				H=3.25; Tp=12	H=3.25; Tp=12	H=3.25; Tp=12		
3.5	-	4								
4	-	4.5								

En cuanto a la elección del nivel de mar que completa la definición de los escenarios de cálculo, se decidió (en una primera etapa) realizar todas las simulaciones considerando el nivel medio del mar definido en las tablas del SHN, representado por el valor NM=1.12 m MOP.

Esta elección se basó en el hecho de que siendo éste es el nivel más frecuente para el estado de mar, y teniendo en cuenta la necesidad de mantener acotado el número de simulaciones a realizar dado el tiempo de cálculo computacional que ello insume, fue considerado como el nivel más apropiado para la representación del clima de olas dentro del puerto.

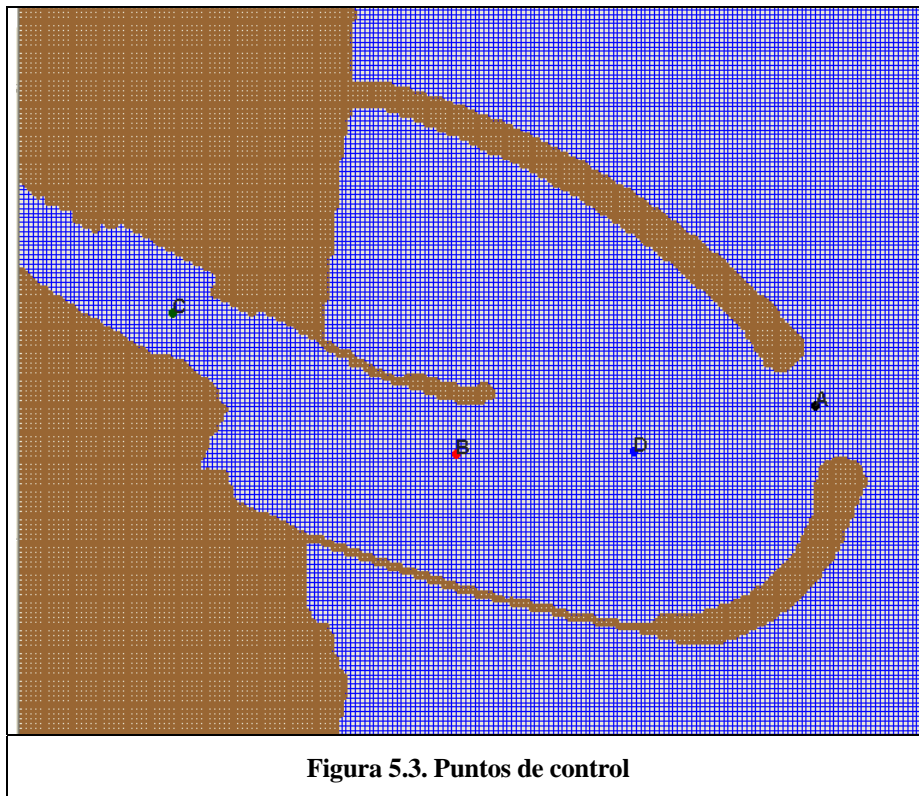
Por otra parte, puede admitirse la hipótesis de que las variaciones periódicas del nivel del mar (pleamar y bajamar) son capaces de inducir aumentos y disminuciones temporarias de los valores de altura de ola, los que oscilan en torno a los asociados al nivel más frecuente del mar.

Atento a ello se realizó complementariamente un conjunto de simulaciones con un nivel de mar equivalente a la pleamar media, lo que permitió evaluar las alteraciones en la agitación para el oleaje incidente desde distintas direcciones. Los resultados de este análisis se incorporaron en el *Apartado 5.7*.

### **5.5 Selección de puntos de control**

Con el propósito de facilitar la evaluación de los resultados surgidos de la aplicación del modelo, y poder analizar las características de la agitación para distintos sectores del puerto, se seleccionaron tres de puntos de control (A, B y C), los cuales permitieron obtener valores puntuales de altura significativa del oleaje para los distintos escenarios analizados. Posteriormente, en virtud de los resultados obtenidos, se consideró conveniente la incorporación de un cuarto punto de observación (D) que permitiera ampliar los alcances del análisis. La **Figura 5.3** muestra la ubicación del conjunto de puntos seleccionados para dicho propósito.

Las cuatro ubicaciones indicadas se encuentran sobre el canal de navegación del puerto y representan zonas de referencia para la operación del puerto.



## 5.6 Análisis de Resultados para Nivel Medio del mar

Los resultados para el Nivel Medio del mar (+ 1,12 m MOP) se presentan en forma de matrices de valores resultantes de altura de ola dentro del puerto (posiciones A, B, C y D), para sectores de dirección de incidencia y rangos de altura de ola en la posición exterior (Tablas A-1 a A-8 del Anexo II).

Se presenta además un conjunto de figuras que muestran la distribución de la altura de ola dentro del área modelada en forma de gráficos de isoamplitud para distintos escenarios analizados. (Anexo III)

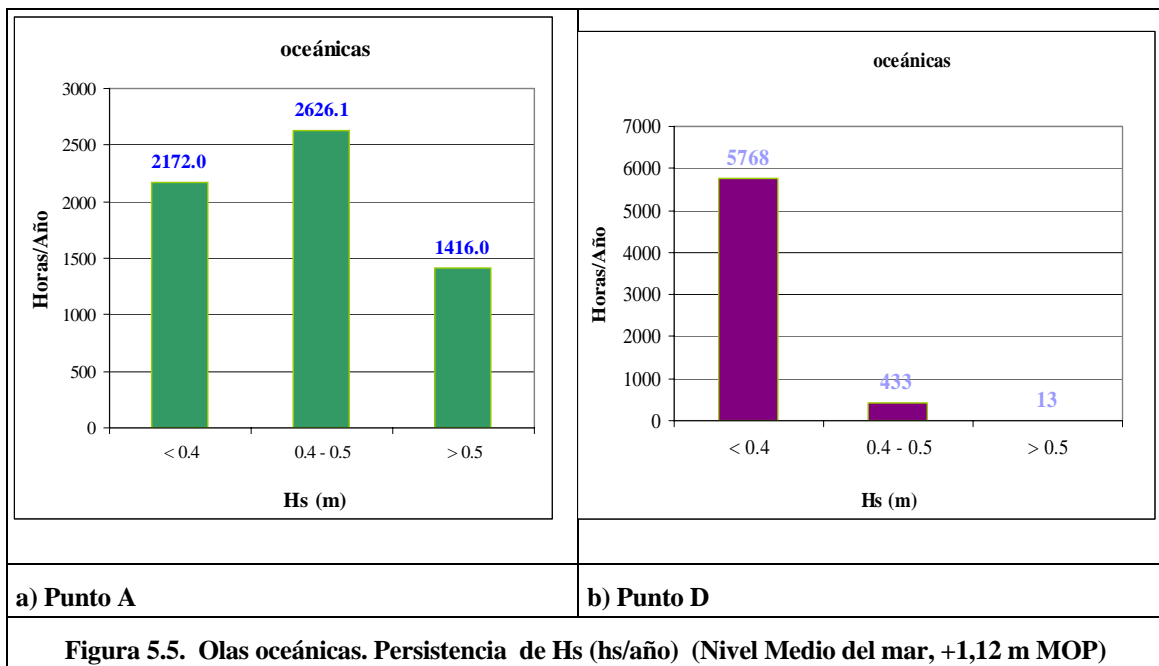
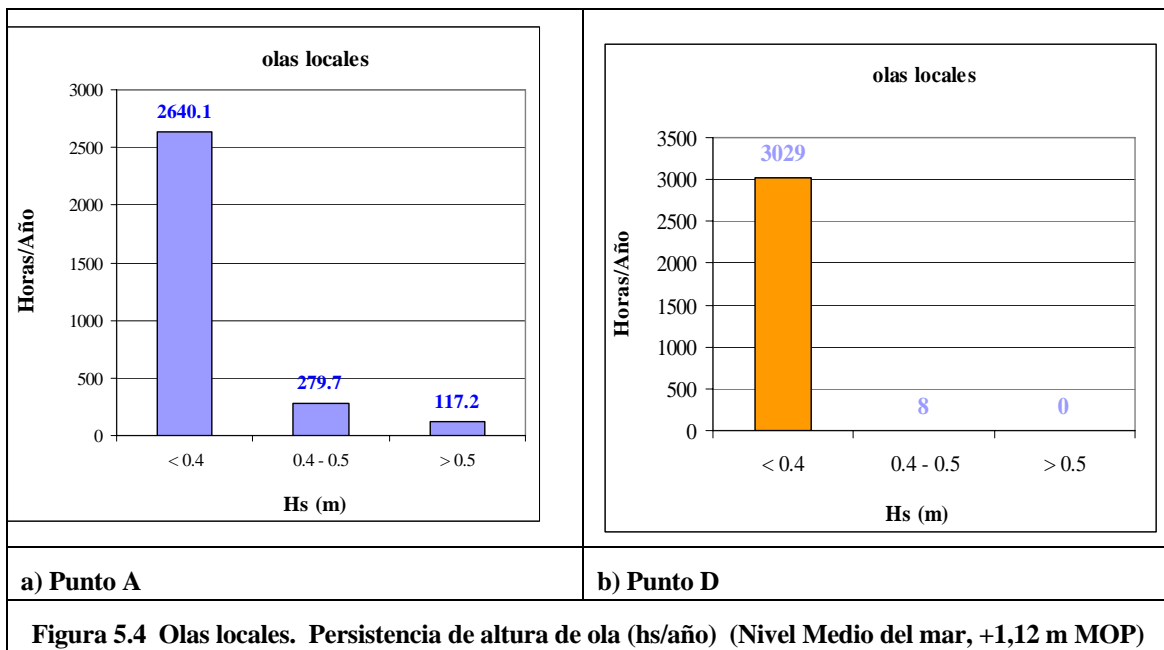
Puede notarse que para un nivel de agua coincidente con el nivel medio, las olas que superan los 0,50 m se producen en la posición A (boca del puerto), y en menor medida en la posición D.

Por otra parte, los resultados señalan claramente que las olas oceánicas, aún con menor altura que las olas locales en la zona exterior, presentan mayor capacidad para penetrar y propagarse dentro del área protegida por las escolleras.

Las **Tablas A-9** y **A-10** en el **Anexo II** muestran la persistencia (expresada en horas/año) de un valor determinado de altura de ola en la posición exterior al puerto y han sido generadas a partir de las **Tablas 4.5.** y **4.7,** respectivamente.

La combinación de ambos conjuntos de datos (alturas de ola en el interior del puerto y cantidad de horas al año para cada escenario) permitió construir los gráficos de las **Figuras 5.4** y **5.5,** correspondientes a olas locales y olas oceánicas respectivamente. Estas figuras indican persistencia de altura de ola para los puntos A y D, lo que se ha determinado acumulando el aporte de todos los sectores direccionales presentes en la tabla.

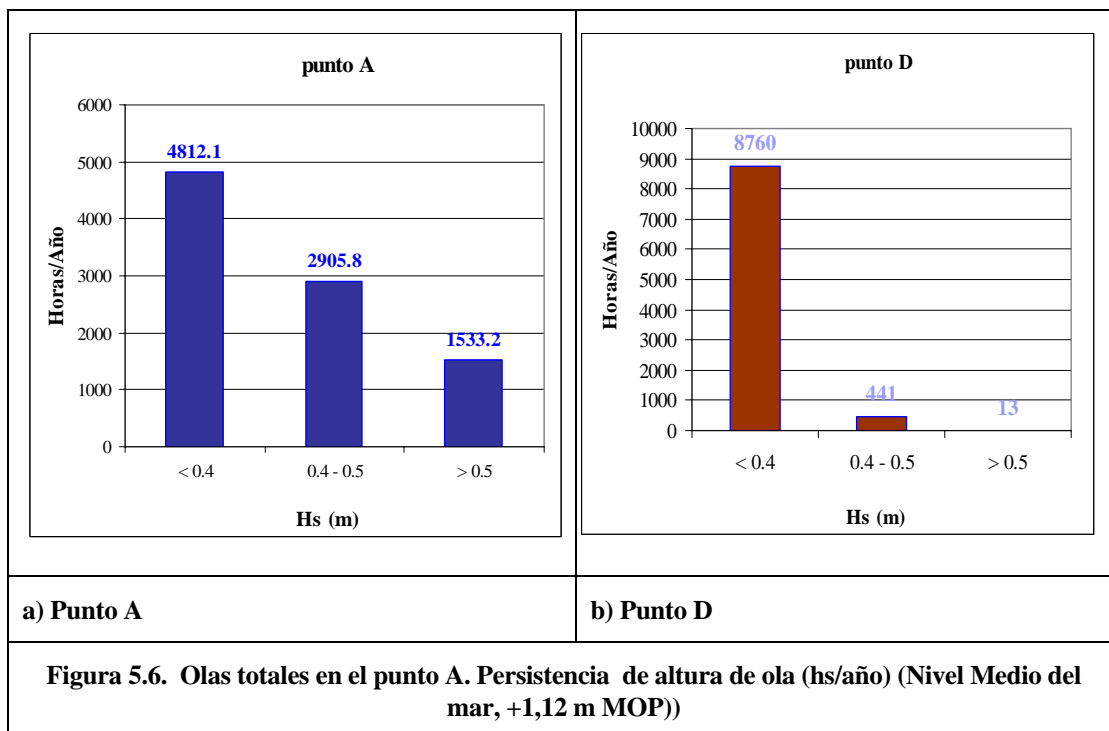
Como se ha indicado previamente sólo las posiciones A y D mostraron valores de interés práctico de altura de ola para nivel medio del mar, por lo que las figuras indicadas sólo incluyen a estas dos posiciones. Los rangos de valores de Hs seleccionados para la presentación de las figuras hacen referencia a dichos fines prácticos.



La comparación de las Figuras 5.4 y 5.5. muestra significativas diferencias entre los resultados correspondientes a olas locales y olas oceánicas.

Las olas oceánicas, además de presentarse con una frecuencia mucho más elevada que las locales, generan condiciones de agitación muy superiores para el punto A. Observando los valores presentados en las figuras se deduce que la cantidad de horas al año para las cuales en el punto A se supera el valor de  $H_s=0.5$  m, en el caso de olas oceánicas resulta del orden de 10 veces mayor que para las locales.

Sumando el aporte de ambos tipos de oleaje se obtiene la estimación final ilustrada en la **Figura 5.6**, la cual señala que la cantidad esperable de horas para la cual la altura de ola en la boca del puerto (punto A) se supere el valor de  $H_s=0.5$  m es de 1533, mientras que para el sector central de la zona abrigada (punto D) es sólo de 13. Esto representa aproximadamente un 18% del total de horas anuales (8760) para la posición A y 0.15% para la posición D.



### **5.7 Influencia de la variación del nivel del mar**

El nivel local del mar interviene en los mecanismos de propagación, atenuación y rotura del oleaje, y es por lo tanto una variable importante a considerar en la determinación del oleaje en el interior del puerto. Niveles mayores que el nivel medio facilitarán el ingreso de olas mayores y niveles menores favorecerán los procesos de disipación y rotura del oleaje, reduciendo la altura resultante en el interior del puerto.

Esto significa que en términos cualitativos cabe suponer la existencia de alguna redistribución de los valores del gráfico de la **Figura 5.6.** (determinados para el Nivel Medio del mar) si se consideraran todos los estados de la marea posibles.

Siguiendo el propósito de evaluar esta situación, se llevó a cabo un conjunto de simulaciones numéricas utilizando los mismos escenarios de oleaje definidos en el **Apartado 5.4** y considerando un nivel de Pleamar Media, definido por el valor  $N=+ 2.83$  m MOP.

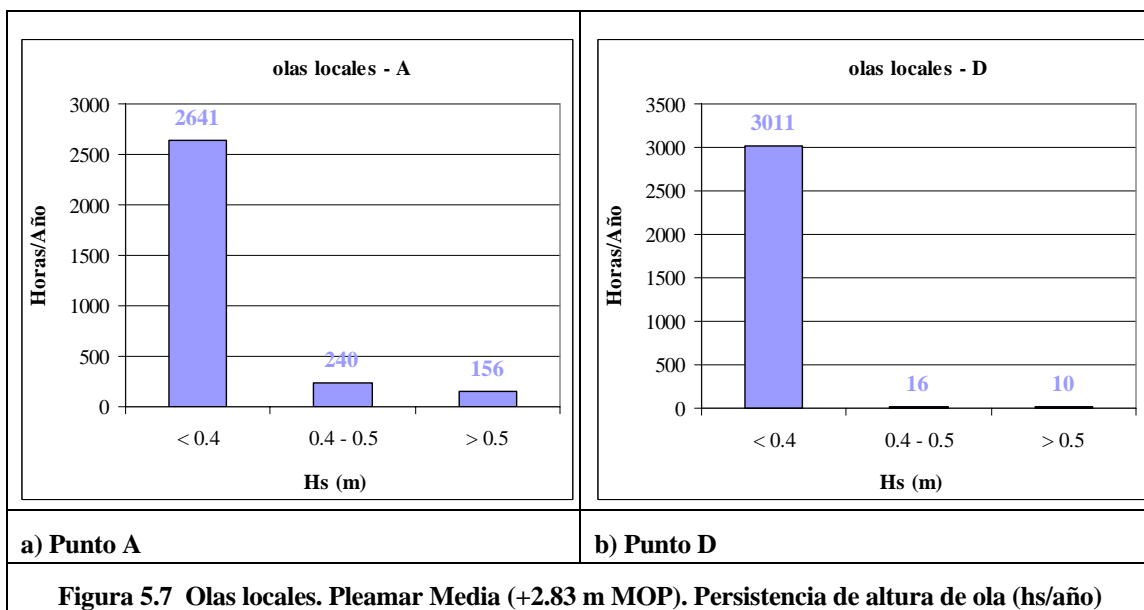
También se realizaron algunas simulaciones considerando niveles asociados a estados intermedios de la marea. En particular se evaluaron algunas situaciones para los niveles  $N=+ 1.95$  m, correspondiente al promedio entre la pleamar media y nivel medio; y  $N=+ 0.25$  m, correspondiente al promedio entre el nivel medio y la bajamar media. Cabe aclarar que la Bajamar Media no fue estudiada debido a que por la escasa profundidad que se observa en el área de estudio la aplicación del modelo resulta inviable para dicha situación.

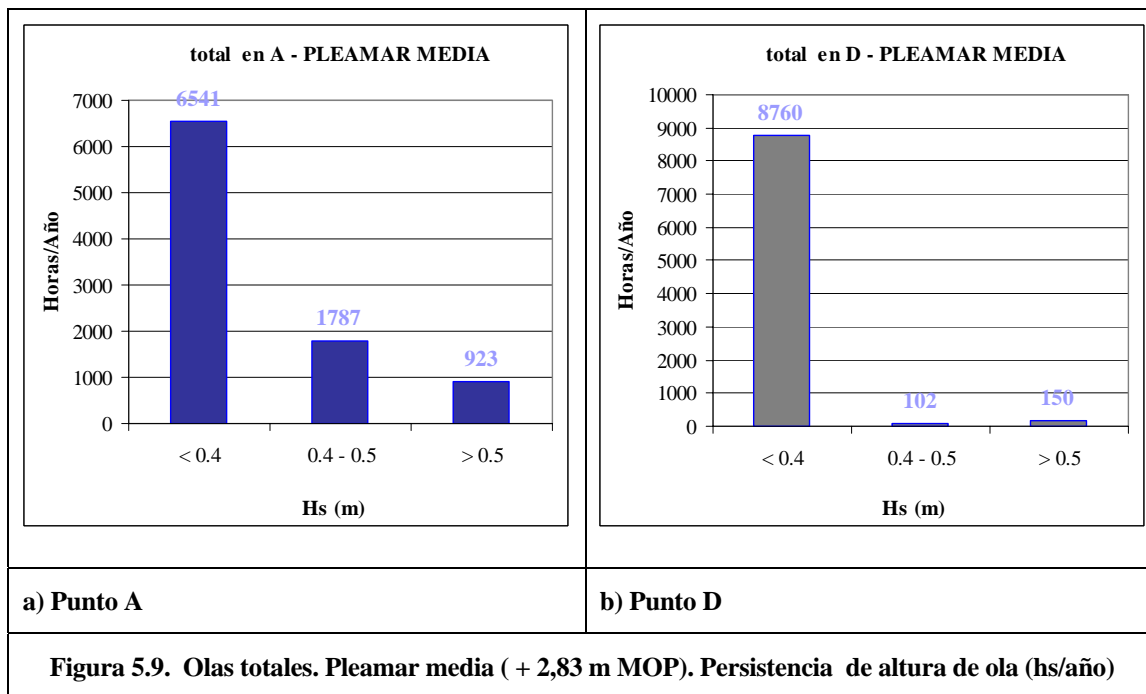
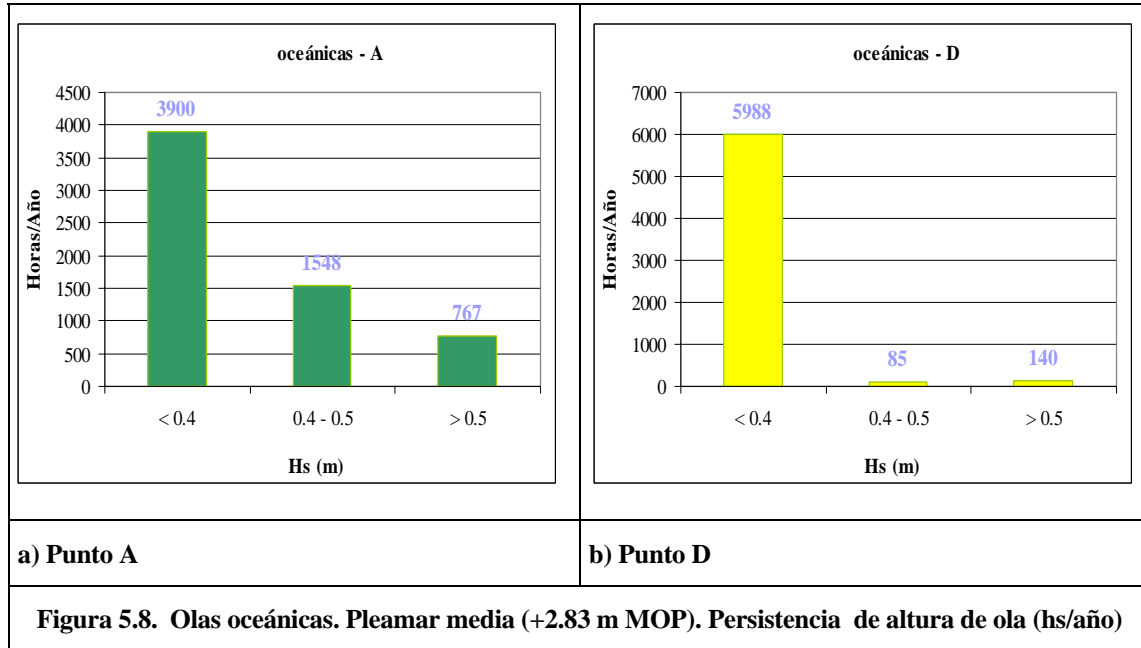
En el **Anexo IV** se presentan las figuras correspondientes a los gráficos de isoamplitud del oleaje obtenidos como resultado de las simulaciones realizadas con el nivel de Pleamar Media.

Estos resultados muestran que con la elevación del nivel del mar se incrementa considerablemente la capacidad de penetración y propagación de las olas en el interior del puerto, tal como se observa en las figuras del Anexo IV y queda evidenciado por los valores puntuales de las Tablas A-11 a A-18 (Anexo II).

Suponiendo que el nivel de Pleamar Media permaneciera en forma in interrumpida a lo largo del tiempo, y considerando la persistencia asociada a cada escenario exterior (Tablas A-9 y A-10 del Anexo II), se realizó el cómputo correspondiente a la persistencia de la altura de ola para los puntos A y D.

Del mismo modo que para el caso del nivel medio del mar , se construyeron los gráficos presentados en las Figuras 5.7 y 5.8 considerando el aporte de todos los sectores direccionales, tanto para olas locales como para el oleaje oceánico. La Figura 5.9 presenta el cómputo final para la persistencia de valores de Hs en ambos puntos, acumulando los aportes de los dos tipos de oleaje.





Como en el caso del nivel medio, para un estado de marea coincidente con la pleamar media las condiciones de mayor agitación en el interior del puerto se generan básicamente por el aporte del oleaje oceánico.

La comparación entre los resultados obtenidos para ambos niveles del mar mostró que al pasar del nivel medio a la situación de pleamar media en el punto A (boca de acceso al puerto) la cantidad de horas anuales para las cuales la altura de ola se mantiene por encima del valor  $H=0.5$  m se *reduciría* de 1533 a 923, mientras que para el punto D (centro de la zona abrigada) la cantidad de horas se *incrementaría* de 13 a 150.

La explicación de este hecho puede encontrarse en la predominancia de diferentes fenómenos físicos involucrados en la propagación del oleaje, los cuales fueron mencionados con anterioridad.

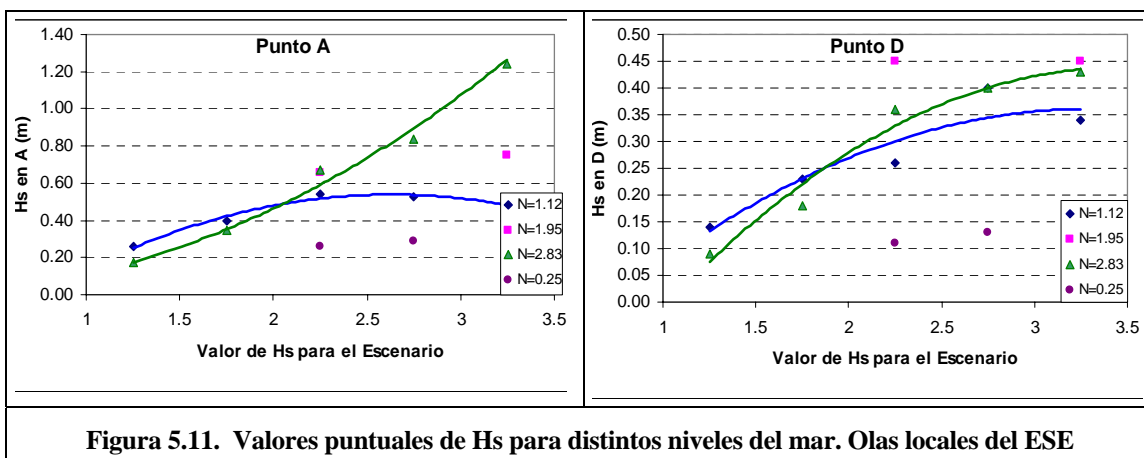
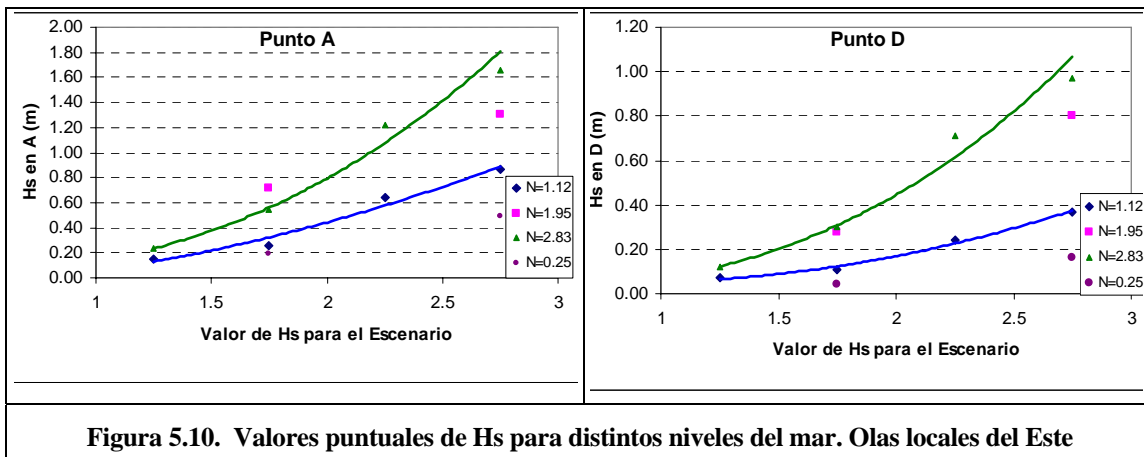
La propagación del oleaje en la zona exterior del puerto y hasta la boca del mismo (punto A) puede estar predominada por el efecto de bajío, por lo cual, de no existir condiciones para la rotura, las alturas de ola podrían experimentar incrementos con profundidades más reducidas para determinado rango de períodos del oleaje, particularmente para aquellos característicos de las olas oceánicas.

Por el contrario, la propagación del oleaje desde la boca del puerto hacia el interior del mismo (sector del punto D) se ve claramente favorecida con el incremento del nivel del mar dada la escasa profundidad natural que se observa esta zona. En este caso, los efectos predominantes serán la refracción y la difracción, siendo muy importante la dirección original de incidencia del oleaje.

Las **Figuras 5.10 a 5.15** pretenden ampliar la comparación y observar las diferencias entre los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con

---

distintos niveles de mar. En éstas se presentan los valores puntuales de Hs obtenidos en los puntos A y D para simulaciones con diferentes alturas de ola exterior pero con la misma dirección de incidencia. Además de los niveles medio y de pleamar media (representados por las curvas de tendencia) se incorporaron los resultados de las simulaciones adicionales realizadas con los niveles intermedios de  $N=+1.95$  m y  $N=+0.25$  m. Se presentan por separado resultados correspondientes a olas locales y a oleaje oceánico.



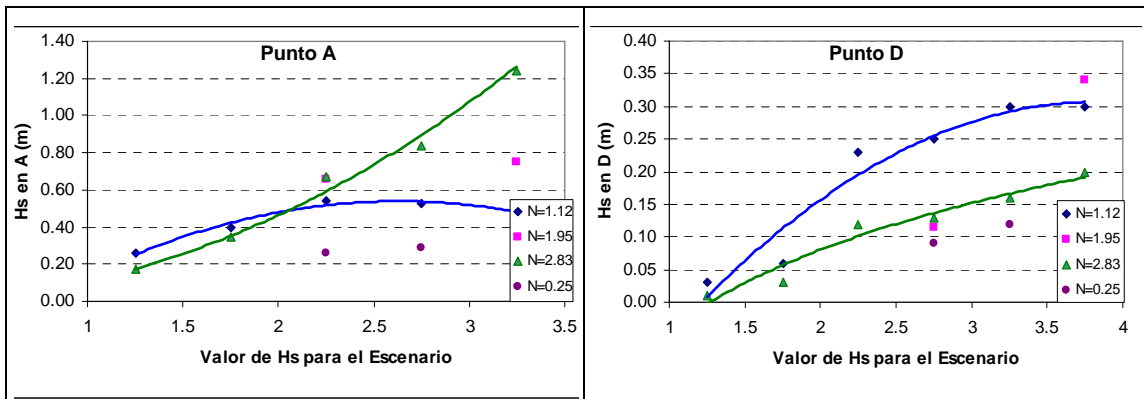


Figura 5.12. Valores puntuales de Hs para distintos niveles del mar. Olas locales del SE

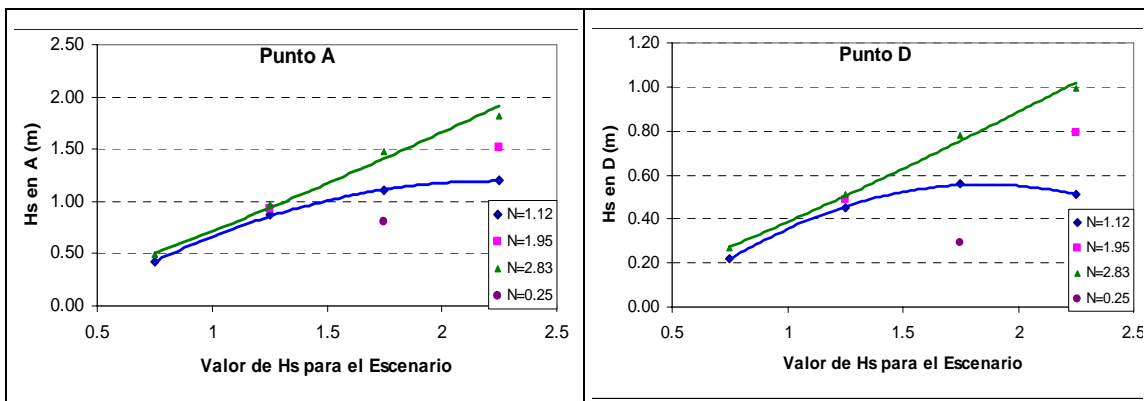


Figura 5.13. Valores puntuales de Hs para distintos niveles del mar. Olas oceánicas del Este

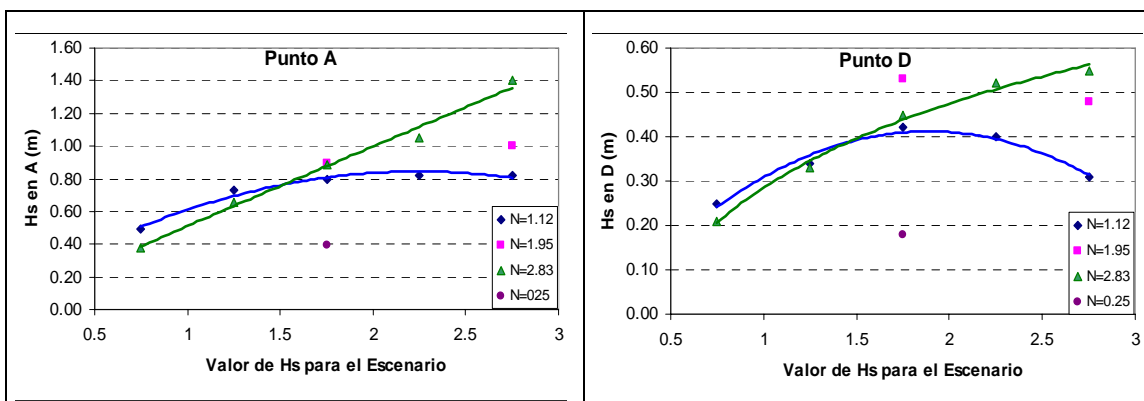
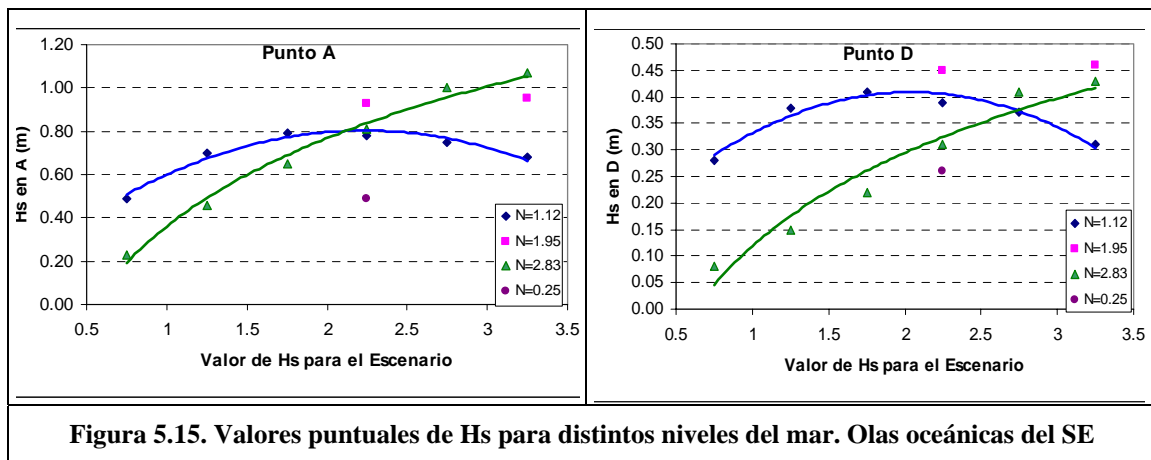


Figura 5.14. Valores puntuales de Hs para distintos niveles del mar. Olas oceánicas del ESE



Los valores puntuales de Hs indicados en las figuras son el resultado de la interacción entre los distintos procesos de transformación que sufre el oleaje al propagarse. Los efectos de refracción, bajío, difracción, atenuación y rotura, participan en distinta medida en función de la altura y el período de la ola, y dependen fundamentalmente de la dirección de propagación y de la profundidad definida por el nivel del mar, lo cual queda evidenciado en la característica fuertemente no lineal observada en las curvas de las figuras.

Este análisis muestra claramente que, para los puntos observados, los valores máximos de Hs no se encuentran necesariamente asociados a los niveles de mar más elevados (fundamentalmente para el punto A).

Dentro del mismo análisis de influencia de la elevación del nivel del mar, resta mencionar que para el Punto B se observaron incrementos porcentuales de Hs del mismo orden que los de los Puntos A y D. Es importante señalar que solamente para un único escenario se superó el valor de 0.5 m, siendo éste el caso de olas oceánicas con dirección E ( $H=2.25$  m y  $T_p=13$  s), para el cual se obtuvo en el Punto B el valor de  $H_s=0.51$  m. Debe recordarse que esta situación se presenta

con muy baja frecuencia como escenario de oleaje (0,03% según lo indica la **Tabla 4.7.**), y que la frecuencia combinada con nivel de pleamar es todavía más reducida, por lo que no tiene un significado práctico.

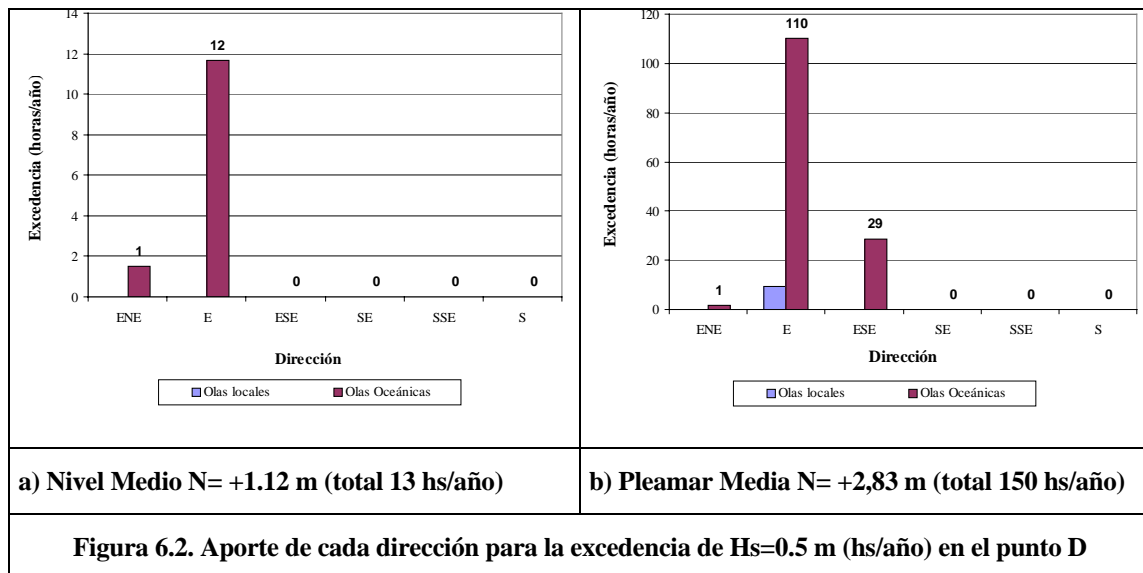
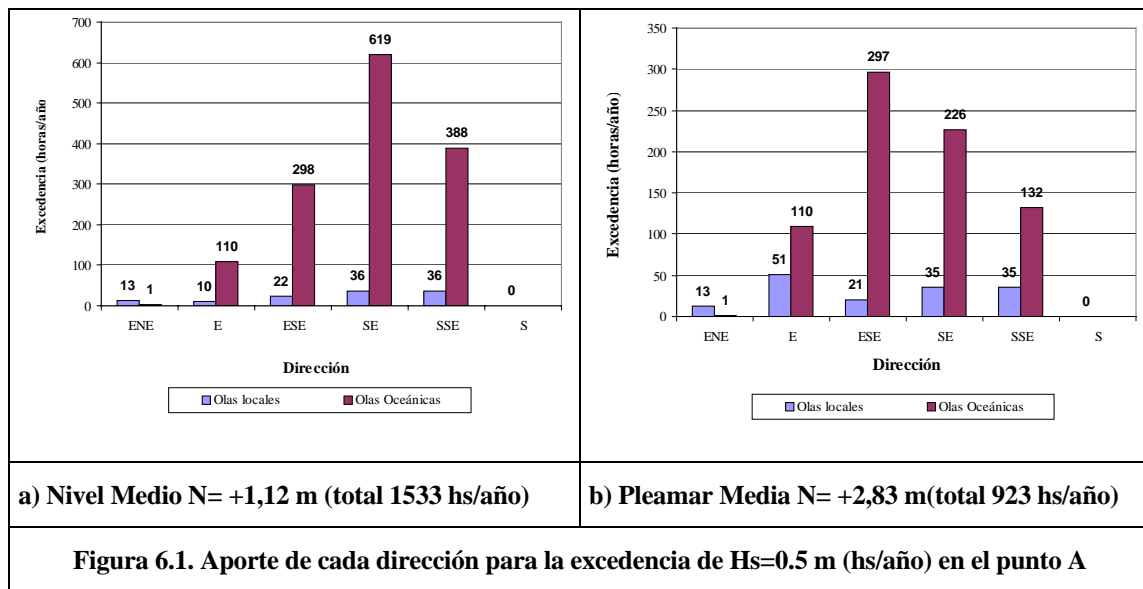
Para todos los escenarios analizados, en el Punto C (muelle) nunca se superó el valor de  $H_s=0.05$  m.

## 6 ANÁLISIS DE EXCEDENCIA PARA $H_s = 0.5$ M

Como objetivo final para este trabajo se propuso realizar una estimación que, contemplando los efectos de la variación del nivel del mar, permitiera conocer en forma aproximada de la cantidad de horas a lo largo del año en las cuales la altura de ola podría superar el valor de  $H_s=0.5$  m en los puntos A y D.

Para realizar esta estimación se utilizó la información presentada en los *apartados 5.6 y 5.7*, donde se calculó la cantidad de horas anuales en las cuales se superaría el mismo valor de altura de ola en los puntos A y D si se mantuvieran en forma ininterrumpida los niveles medio y de pleamar media, respectivamente.

Las **Figuras 6.1 y 6.2** muestran dicha información señalando el aporte de cada una de las direcciones de incidencia del oleaje para ambos niveles del mar. Las diferencias que se observan al comparar los gráficos correspondientes al nivel medio con los de pleamar media, reflejadas por la redistribución de valores asociados a cada dirección, se encuentran en concordancia con el análisis realizado en el *apartado 5.7*, referido a la influencia de la variación del nivel del mar sobre los procesos de transformación del oleaje en su propagación desde distintas direcciones.



La estimación del número de horas anuales de excedencia de olas de Hs= 0,50 m deber realizarse teniendo en cuenta la variación periódica del nivel del mar, e

integrando las contribuciones (en cuanto a persistencia) de cada nivel y cada dirección de oleaje.

Para ello se consideró conveniente adoptar una serie de hipótesis simplificativas referidas a la persistencia anual de los niveles del mar (extraídos de la Tabla de Mareas del SHN) y su relación con los niveles analizados en este informe.

A partir de los resultados previos pudo establecerse que no hay diferencias sustanciales entre los niveles  $N=+ 1.95$  m y  $N=+ 2.83$  m. Por simplicidad de cálculo y para reducir el número de simulaciones, se decidió consecuentemente asimilar los resultados de este nivel intermedio ( $N=+ 1.95$  m) a la Pleamar Media ( $N=+ 2,83$  m).

En virtud de ello, se definieron tres situaciones representativas de diferentes estados de mar caracterizados de la siguiente manera:

- **Condición de Nivel Medio:** se adoptó un intervalo para la variación del nivel del mar en torno al nivel medio  $N= + 1.12$  m MOP con límites superior e inferior de  $\pm 1$  m. Este intervalo abarca el 47.9% del tiempo total, y a esta condición de mar se asignaron las características de agitación obtenidas en las simulaciones realizadas con el Nivel Medio
- **Estado de Pleamar:** para el intervalo de tiempo en el cual el nivel del mar supera la condición de  $N= + 2.12$  m MOP ( $NM+ 1m$ ) se consideraron las características de agitación obtenidas con la consideración del nivel de pleamar media ( $N=+ 2.83$  m MOP). Este intervalo abarca el 26.2% del tiempo total. La proximidad de los resultados obtenidos en las simulaciones

realizadas para los niveles de  $N = +2.83$  m y  $N = +1.95$  m (Figuras 5.10 a 5.15 del *apartado 5.7*) permitieron la adopción de esta hipótesis.

- **Estado de Bajamar:** para el intervalo de tiempo en el cual el nivel del mar se encuentra por debajo de la condición de  $N = +0.12$  m MOP (NM-1m) se consideró que los niveles de agitación permanecen por debajo del valor  $H_s = 0.5$  m tanto en el punto A como en el D. Este intervalo abarca el 25.9% del tiempo total. Esta decisión se justifica en la apreciación de los resultados obtenidos en el *apartado 5.7* (Figuras 5.10 a 5.15) para las simulaciones realizadas con un nivel de  $N = +0.25$  m, donde se observó que para este estado de mar los valores de  $H_s$  se reducen significativamente respecto de los asociados al nivel medio.

Dadas estas consideraciones se realizó el cómputo final considerando la contribución de todas las direcciones de incidencia del oleaje, lo que permitió establecer como resultado final la cantidad de **976 horas al año** para que el valor de  $H_s = 0.5$  m sea superado en los puntos A y de **46 horas al año** para la posición D. Esto representa casi un 12% y 0.5% del tiempo en las posiciones A y D respectivamente.

## 7 CONCLUSIONES

1. Se presentó el desarrollo de un extenso análisis que permitió describir las principales características del clima de olas en el interior del puerto de Rawson a partir del estudio de la agitación producida por la incidencia del oleaje exterior y considerando diferentes niveles del mar.
2. El resultado de este análisis permitió hacer una estimación de la persistencia (medida en cantidad de horas anuales) asociada a determinados valores de altura de ola para cuatro ubicaciones puntuales de particular interés para el funcionamiento del puerto.
3. Se observó que las olas oceánicas, además de ser más frecuentes que las olas locales, llegan a la boca del puerto (punto A) con mayor altura y poseen mayor capacidad de penetración en el puerto, con lo cual, la persistencia (medida en horas/año) asociada al valor de  $H_s=0.5$  resulta mayor para las primeras que para las segundas en un orden de 10 veces.
4. La marea astronómica modifica periódicamente el nivel del mar. Siendo éste último una variable que influye fuertemente sobre la propagación del oleaje, afecta en consecuencia y en forma temporaria las condiciones de agitación dentro del puerto aunque las condiciones de oleaje en el exterior se mantengan constantes. Acorde a ello se realizó una evaluación de la influencia de la marea sobre la altura de ola resultante en el interior del puerto, habiéndose considerado en primera instancia el Nivel Medio ( $N=+ 1.12$  m) y el nivel correspondiente a la Pleamar Media ( $N=+ 2.83$  m). Adicionalmente, se realizaron algunas evaluaciones para los niveles intermedios de  $N=+ 0.25$  m y  $N=+ 1.95$  m.

5. Se llevó a cabo un amplio conjunto de simulaciones con diferentes escenarios de oleaje considerando la permanencia ininterrumpida del nivel  $N=+1.12$  m (Nivel Medio), repitiéndose luego para  $N=+2.83$  m (Pleamar Media). La comparación entre ambos conjuntos de resultados mostró que con la elevación del nivel del mar la cantidad de horas anuales para las cuales la altura de ola en el punto A (boca del puerto) se mantiene por encima del valor  $H=0.5$  m se *reduciría* de 1533 a 923, mientras que para el punto D (centro de la zona abrigada) la cantidad de horas se *incrementaría* de 13 a 150.
  
6. La explicación de este hecho se fundamenta en la predominancia de diferentes fenómenos físicos involucrados en la propagación del oleaje. La propagación del oleaje en la zona exterior del puerto y hasta la boca del mismo (punto A) se encuentra fuertemente influenciada por el efecto de bajío, Por el contrario, la propagación del oleaje desde la boca del puerto hacia el interior del mismo (sector del punto D) se ve claramente favorecida con el incremento del nivel del mar dada la escasa profundidad natural que se observa esta zona. En este caso, los efectos predominantes son la refracción y la difracción,
  
7. Pudo establecerse que los incrementos en la altura del oleaje por efecto de la elevación del nivel del mar dependen sustancialmente de la dirección de propagación del oleaje en el exterior del puerto. Para el punto A, las direcciones ENE y E son la que presentan mayores posibilidades de aumentar los valores de  $H_s$  para la condición de pleamar; no ocurre lo mismo para el oleaje que se propaga desde el ESE, SE y el SSE, donde la cantidad de horas para las cuales la altura significativa de ola supera el

valor de  $H_s=0.5$  m tiende a decrecer con la elevación del nivel del mar. Este efecto es más notorio para el caso del oleaje oceánico que para las olas locales.

8. Se realizó un cómputo final para estimar la excedencia del valor de  $H_s=0.5$  m en los puntos A y D considerando la influencia de los distintos estados de mar. Adoptando un conjunto de hipótesis simplificativas para cada situación, se llegó a determinar las cantidades de **976 y 46 horas al año** para que el valor de  $H_s=0.5$  m sea superado en los puntos A y D, respectivamente. Esto representa casi un 12% y 0.5% del tiempo, respectivamente.

## **ANEXO I - EL MODELO BOUSS2D**

BOUSS-2D es un modelo numérico perteneciente al sistema SMS (Surface-Water Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. El mismo se encuentra basado en una solución dominio-tiempo de ecuaciones tipo Boussinesq.

La forma clásica de las ecuaciones de Boussinesq para la propagación del oleaje en aguas de profundidad variable fue derivada por Peregrine (1967). La aplicación de estas ecuaciones se encuentra restringida a zonas de aguas relativamente poco profundas dado que se asume que una variación cuadrática para el perfil de velocidades verticales, lo cual puede considerarse válido para los casos donde se cumple que la profundidad del agua,  $h$ , sea menor que la quinta parte de la longitud de onda incidente,  $L$ .

Nwogu (1993) extendió el rango de aplicabilidad de estas ecuaciones describiéndolas en términos de una velocidad arbitraria definida a una distancia  $Z\alpha$  del nivel estático de la superficie del agua, en lugar de la velocidad promediada en la profundidad utilizada en la versión original. De esta manera, la elevación de la variable de velocidad  $Z\alpha$  se transforma en un parámetro libre que se elige para optimizar las características de la dispersión lineal de las ecuaciones. Este nuevo planteo de las ecuaciones permite su aplicación en zonas de aguas de profundidades intermedias, donde  $h$  puede llegar hasta  $\frac{1}{2}$  de la longitud de onda incidente.

A pesar de la mejora introducida por Nwogu (1993) las ecuaciones se encontraban basadas sobre la hipótesis de que las alturas de ola debían ser mucho menores que la profundidad. Esto limitaba la posibilidad de describir procesos fuertemente no

lineales en aguas poco profundas, lo cual, condujo a Wei et al. (1995) a derivar la forma completamente no lineal de las ecuaciones. Este nuevo aporte resultó particularmente útil para la simulación de ondas altamente asimétricas en aguas poco profundas, corrientes inducidas por oleaje, wave setup cercano a la línea de costa, y la interacción ola-corriente.

Dada la importancia de los procesos de turbulencia y corrientes generadas por el rompimiento de olas, los cuales conducen los mecanismos de transporte de sedimentos y contaminantes, Nwogu (1996) extendió la forma completamente no lineal de las ecuaciones tipo Boussinesq a la zona de surf. Para ello acopló las ecuaciones de conservación de masa y momento con un modelo de evolución espacial y temporal para la energía cinética de la turbulencia producida por el rompimiento de olas.

Estas ecuaciones han sido modificadas también para incluir los efectos de fricción de fondo y caudal a través de estructuras porosas, y pueden ser utilizadas para simular la mayoría de los fenómenos de interés en el ámbito de la ingeniería de costas y puertos, como ser:

- Bajío.
- Refracción.
- Difracción.
- Reflexión parcial o total.
- Fricción de fondo.
- Interacción no lineal entre distintas componentes de onda.
- Rompimiento de olas y Run-up.
- Corrientes inducidas por acción del oleaje.
- Interacción entre olas y corrientes.

Planteamiento del problema matemático

El perfil vertical del campo de caudal puede ser obtenido a partir de la expansión de la función potencial de velocidades,  $\Phi$ , como una serie de Taylor alrededor de una elevación arbitraria,  $z_\alpha$ , en la columna de agua. Para ondas con longitud,  $L$ , mucho mayor que la profundidad,  $h$ , la serie es truncada al segundo orden, resultando una variación cuadrática del potencial de velocidad sobre la profundidad:

$$\Phi(\bar{x}, z, t) = \phi_\alpha + \mu^2 (z_\alpha - z) [\nabla \phi_\alpha \cdot \nabla h] + \frac{\mu^2}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2] \nabla^2 \phi_\alpha + O(\mu^4)$$

donde  $\phi_\alpha = \Phi(\bar{x}, z_\alpha, t)$ ,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ , y  $\mu = h/L$  es una medida de la dispersión de frecuencia. Las velocidades horizontal y vertical son obtenidas de la función potencial como:

$$u = (\bar{x}, z, t) = \nabla \Phi = u_\alpha + (z_\alpha - z) [\nabla(u_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla u_\alpha) \cdot \nabla h] + \frac{1}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2] \nabla(\nabla u_\alpha)$$

$$w = (\bar{x}, z, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -[u_\alpha \cdot \nabla h + (z + h) \cdot \nabla u_\alpha]$$

donde  $u_\alpha = \nabla \Phi|_{z_\alpha}$  es la velocidad horizontal en la posición  $z = z_\alpha$ . Dado un perfil vertical para el campo de caudal, las ecuaciones de continuidad y de Euler (momentum) pueden ser integradas sobre la profundidad, reduciendo el problema tridimensional a uno de dos dimensiones. Para olas débilmente no lineales, con  $H$  mucho menor que la profundidad, las ecuaciones integradas en la vertical pueden ser escritas en términos de elevación de la superficie del agua  $\eta(\bar{x}, t)$  y velocidad  $u_\alpha(\bar{x}, t)$ , definidas por Nwogu (1993) de la siguiente manera:

$$\eta_t + \nabla u_f = 0 \quad (1)$$

$$u_{\alpha,t} + g \cdot \nabla \eta + (u_\alpha \cdot \nabla) u_\alpha + z_\alpha [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha,t}) \cdot \nabla h] + \frac{1}{2} [(z_\alpha + h)^2 - h^2] \nabla(\nabla u_{\alpha,t}) = 0 \quad (2)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $u_f$  es la densidad del flujo de volumen dado por:

$$u_f = \int_{-h}^{\eta} u \cdot dz = (h + \eta) u_\alpha + h \left[ \left( z_\alpha - \frac{h}{2} \right) \cdot [\nabla(u_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla u_\alpha) \cdot \nabla h] + h \cdot \left[ \frac{(z_\alpha + h)^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right] \nabla(\nabla u_\alpha) \right] \quad (3)$$

La elevación de la variable velocidad,  $z_\alpha$ , resulta un parámetro libre cuyo valor óptimo es:

$$z_\alpha = -0.535h.$$

Para zonas de aguas poco profundas donde las alturas de ola son del orden de la profundidad y, por lo tanto, existe la posibilidad del rompimiento, las ecuaciones del planteo débilmente no lineal pierden validez. Para estos casos se recomienda la aplicación de las expresiones derivadas por Nwogu (1996) correspondientes al modelo fuertemente no lineal, en las cuales puede observarse que aparecen algunos términos expresados en función de la velocidad en la superficie libre,  $u_\eta$ , en lugar de  $u_\alpha$ :

$$\eta_t + \nabla u_f = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 & u_{\alpha,t} + g \cdot \nabla \eta + (u_{\eta} \cdot \nabla) \cdot u_{\eta} + w_{\eta} \cdot \nabla w_{\eta} + (z_{\alpha} - \eta) \cdot [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha,t}) \cdot \nabla h] \\
 & + \frac{1}{2} [(z_{\alpha} + h)^2 - (h + \eta)^2] \nabla(\nabla u_{\alpha,t}) - [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (h + \eta) \cdot \nabla u_{\alpha,t}] \nabla \eta \quad (5) \\
 & + [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha,t}) \cdot \nabla h + (z_{\alpha} + h) \cdot \nabla(\nabla u_{\alpha,t})]_{z_{\alpha,t}} = 0
 \end{aligned}$$

donde  $z_{\alpha}$  es ahora función del tiempo y se encuentra dado por  $z_{\alpha} + h = 0.465(h + \eta)$ , y la densidad del volumen de flujo es:

$$u_f = (h + \eta) \cdot \left\{ u_{\alpha} + \left[ (z_{\alpha} + h) - \frac{(h + \eta)}{2} \right] \cdot [\nabla(u_{\alpha} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha}) \cdot \nabla h] + \left[ \frac{(z_{\alpha} + h)^2}{2} - \frac{(h + \eta)^2}{6} \right] \nabla(\nabla u_{\alpha}) \right\} \quad (6)$$

Este planteo fuertemente no lineal es apto modelar la mayoría de los procesos que se desarrollan en la zona de zurf, incluyendo la interacción ola-corriente. Las hipótesis básicas asumidas por el modelo para la simulación en la zona de rompiente son las siguientes:

- Las olas tienen un rompimiento tipo "spilling"
- La turbulencia es producida en la región cercana a la superficie cuando la velocidad horizontal en la superficie libre,  $u_{\eta}$ , supera a la velocidad de fase,  $C$ .
- La tasa de producción de energía cinética de la turbulencia es proporcional al gradiente vertical de la velocidad horizontal de la superficie libre,  $\partial u / \partial z|_{z=\eta}$ .
- La turbulencia inducida por el rompimiento es propagada por convección en la región cercana a la superficie con una velocidad igual a la velocidad horizontal de la superficie libre.

La relación de dispersión lineal utilizada en Bouss-2D es la siguiente:

$$C^2 = \frac{L^2}{T^2} = \left[ \frac{1 - (\alpha + 1/3)(kh)^2}{1 - \alpha(kh)^2} \right]$$

donde  $L$  y  $T$  son la longitud y el período de onda,  $C$  es la velocidad de fase,  $k = 2\pi / L$  es el número de onda, y  $\alpha = [(z_\alpha + h)^2 / h^2 - 1] / 2$ . Por lo tanto, dependiendo de la elevación de la variable de velocidad, es decir del valor de  $\alpha$ , se obtendrán diferentes valores para la relación de dispersión lineal.

## 1 Solución numérica

Las ecuaciones correspondientes a los planteos débilmente lineal (1 a 3) y fuertemente lineal (4 a 6) son resueltas utilizando un método de dominio-tiempo en diferencias finitas. El dominio computacional es discretizado por medio de una grilla rectangular con pasos de discretización  $\Delta x$  y  $\Delta y$  en las direcciones de los ejes respectivos.

Las variables de la ecuaciones  $\eta$ ,  $u_\alpha$  y  $w_\alpha$  son definidas sobre una grilla de puntos de manera escalonada, siendo la profundidad y elevación de la superficie definidas sobre cada nodo  $(i,j)$  de la grilla, mientras que las velocidades se definen sobre puntos intermedios ubicados sobre cada borde celda a una distancia  $\Delta x/2$  y  $\Delta y/2$  de los nodos, según corresponda el eje  $(i\pm 1/2, j\pm 1/2)$ .

Para la resolución numérica de las ecuaciones se utiliza un esquema Crank Nicolson con un método predictor-corrector que permite obtener una estimación inicial. Las derivadas parciales son aproximadas usando un esquema de diferencias hacia delante para el tiempo y diferencias centradas en el espacio.

El proceso de cálculo se mantiene estable siempre y cuando el número de Courant,  $Cr$ , sea menor que 1:

$$Cr = \sqrt{\left[ C^2 \Delta t^2 \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]} < 1$$

donde  $C$  es la velocidad de fase sobre el período de cruce de ceros promedio de las olas incidentes.

Esta condición, necesaria para asegurar la estabilidad del cálculo, impone restricciones sobre la relación entre el tamaño de los pasos de discretización de la grilla y el paso de tiempo utilizado para cada simulación. Es recomendable que en el inicio del proceso de cálculo el valor de  $Cr$  permanezca entre 0.5 y 0.7, puesto que la interacción no lineal entre distintas componentes de onda, el rompimiento de olas, la reflexión, y otros procesos físicos pueden afectar la estabilidad del modelo numérico.

## **2 Condiciones de borde**

Para poder resolver las ecuaciones es necesario aplicar condiciones de borde apropiadas sobre los contornos del dominio computacional. Esto requiere la especificación de zonas de ingreso de energía de olas al dominio de cálculo y zonas de absorción y propagación de energía hacia el exterior del dominio. Las ecuaciones también permiten simular la interacción de las olas con las estructuras presentes en el interior del dominio de cálculo, por lo cual, los tipos de bordes considerados en BOUSS-2D son:

- Bordes para la generación externa de olas
- Bordes para la generación interna de olas
- Bordes completamente reflejantes o paredes verticales sólidas
- Regiones de damping o absorción de energía de las olas

- Estructuras porosas.

En la definición de los bordes correspondientes a la generación de olas (wave maker) pueden considerarse características de oleaje tanto regular como irregular. La representación de olas regulares requiere la definición de valores de altura significativa  $H_s$ , período pico  $T_p$ , y dirección de incidencia. Para la representación del oleaje irregular BOUSS-2D dispone de un menú de espectros unidireccionales  $S_\eta(\omega)$  que describen la distribución de energía de las olas en función de la frecuencia, estos son:

- Espectro de Pierson-Moskowitz (PM): recomendado para estados de oleaje completamente desarrollado en aguas profundas, definido en términos de velocidad de viento.
- Espectro de Bretschneider (1959): tiene la misma forma que el anterior (PM) pero se define a partir de un valor de  $H_s$  y uno de  $T_p$ .
- Espectro de JONSWAP: para condiciones de fetch limitado en aguas profundas.
- Espectro TMA: para condiciones de fetch limitado en aguas poco profundas.
- Espectro Ochi-Hubble: espectro bimodal para estados de mar con superposición de olas oceánicas (swell) y olas generadas por vientos locales (wind-sea).

El modelo permite también la utilización de espectros direccionales, para los cuales la energía del oleaje se distribuye no sólo en frecuencia sino también en un rango de direcciones de incidencia:

$$S_\eta(\omega, \theta) = S_\eta(\omega) \cdot D(\omega, \theta)$$

esto requiere la definición adicional de los parámetros correspondientes para la función  $D(\omega, \theta)$ , lo cual se encuentra también disponible en BOUSS-2D.

La asignación de propiedades absorbentes o reflejantes para los distintos contornos de una modelación se hace por medio de la definición del coeficiente de damping ( $\alpha$ ), tanto para bordes que constituyan un límite del dominio de cálculo como para las estructuras interiores.

El coeficiente de damping puede adoptar valores entre 0 y 1, pudiendo representar tanto a paredes verticales totalmente reflejantes ( $\alpha = 0$ ), como a bordes oceánicos totalmente absorbentes ( $\alpha = 1$ ) que permiten el egreso de un sistema de la energía reflejada. Para regiones parcialmente reflejantes como playas o escolleras con taludes de rocas, se utilizan distintos valores intermedios para  $\alpha$ .

El modelo también permite simular situaciones en las que existen estructuras porosas, como breakwaters, para lo cual admite la asignación para una determinada región del dominio de un coeficiente de porosidad,  $p$ , utilizado para representar la disipación de energía generada por la estructura al ser atravesada por el oleaje.

## ANEXO II - RESULTADOS

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>						
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>						
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>	0.37	0.15	0.26	0.06	0.05	
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>	0.88	0.26	0.40	0.13	0.12	
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>		0.64	0.54	0.50	0.50	
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>		0.87	0.53	0.44	0.59	
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>			0.51	0.60	0.69	
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>				0.60		
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>						

**Tabla A-1 Olas locales en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto A**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>						
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>						
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>	0.04	0.02	0.04	0.01	0.00	
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>		0.05	0.09	0.04	0.04	
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>		0.08	0.14	0.07	0.06	
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>			0.12	0.11	0.13	
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>				0.10		
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>						

**Tabla A-2 Olas locales en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto B**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
0	-	0.5						
0.5	-	1						
1	-	1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.5	-	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	-	2.5		0.01	0.01	0.00	0.00	
2.5	-	3		0.01	0.01	0.00	0.00	
3	-	3.5			0.01	0.01	0.01	
3.5	-	4				0.01		
4	-	4.5						

**Tabla A-3 Olas locales en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto C**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
0	-	0.5						
0.5	-	1						
1	-	1.5	0.10	0.07	0.14	0.03	0.01	
1.5	-	2	0.39	0.11	0.23	0.06	0.03	
2	-	2.5		0.24	0.26	0.23	0.23	
2.5	-	3		0.37	0.40	0.25	0.21	
3	-	3.5			0.34	0.30	0.41	
3.5	-	4				0.30		
4	-	4.5						

**Tabla A-4 Olas locales en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto D**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>						
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>	1.22	0.42	0.49	0.49	0.45	
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>		0.87	0.73	0.70	0.63	
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>		1.10	0.80	0.79	0.73	
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>		1.20	0.82	0.78	0.78	
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>			0.82	0.75	0.73	
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>				0.68	0.69	
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>						
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>						

**Tabla A-5 Olas oceánicas en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto A**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>						
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>	0.17	0.06	0.07	0.10	0.09	
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>		0.13	0.09	0.13	0.12	
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>		0.16	0.11	0.14	0.14	
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>		0.17	0.11	0.13	0.14	
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>			0.10	0.13	0.13	
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>				0.11	0.12	
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>						
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>						

**Tabla A-6 Olas oceánicas en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto B**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>						
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>		0.01	0.01	0.01	0.01	
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>		0.02	0.01	0.01	0.01	
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>		0.01	0.01	0.01	0.01	
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>			0.01	0.01	0.01	
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>				0.01	0.01	
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>						
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>						

**Tabla A-7 Olas oceánicas en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto C**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>						
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>	0.67	0.22	0.25	0.28	0.25	
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>		0.45	0.34	0.38	0.34	
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>		0.56	0.42	0.41	0.41	
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>		0.51	0.40	0.39	0.41	
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>			0.31	0.37	0.35	
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>				0.31	0.32	
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>						
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>						

**Tabla A-8 Olas oceánicas en el interior del puerto. Nivel Medio. Punto D**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>	78	8	2	5	2	91
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>	494	70	14	35	220	414
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>	240	92	18	68	407	21
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>	13	42	15	70	235	0
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>	0	8	14	109	95	0
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>	0	2	4	76	27	0
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>	0	0	3	28	8	0
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>	0	0	2	7	1	0
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>	0	0	0	1	0	0

**Tabla A-9. Persistencia de alturas de ola expresada en horas/año. Olas locales en el exterior del puerto**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
<b>0</b>	-	<b>0.5</b>	105	987	528	480	74	0
<b>0.5</b>	-	<b>1</b>	2	900	553	774	401	0
<b>1</b>	-	<b>1.5</b>	0	98	210	393	256	0
<b>1.5</b>	-	<b>2</b>	0	9	58	147	102	0
<b>2</b>	-	<b>2.5</b>	0	3	20	55	27	0
<b>2.5</b>	-	<b>3</b>	0	0	9	20	2	0
<b>3</b>	-	<b>3.5</b>	0	0	1	5	0	0
<b>3.5</b>	-	<b>4</b>	0	0	0	0	0	0
<b>4</b>	-	<b>4.5</b>	0	0	0	0	0	0

**Tabla A-10. Persistencia de alturas de ola expresada en horas/año. Olas oceánicas en el exterior del puerto**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
0	-	0.5						
0.5	-	1						
1	-	1.5	0.41	0.23	0.17	0.03	0.04	
1.5	-	2	0.86	0.55	0.35	0.05	0.08	
2	-	2.5		1.22	0.67	0.21	0.10	
2.5	-	3		1.66	0.84	0.30	0.58	
3	-	3.5			1.24	0.55	0.83	
3.5	-	4				0.78		
4	-	4.5						

**Tabla A-11 Olas locales en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto A**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
0	-	0.5						
0.5	-	1						
1	-	1.5	0.05	0.04	0.05	0.00	0.00	
1.5	-	2	0.12	0.10	0.10	0.01	0.01	
2	-	2.5		0.27	0.23	0.05	0.01	
2.5	-	3		0.37	0.25	0.06	0.11	
3	-	3.5			0.22	0.08	0.22	
3.5	-	4				0.11		
4	-	4.5						

**Tabla A-12 Olas locales en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto B**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
0	-	0.5						
0.5	-	1						
1	-	1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1.5	-	2	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	
2	-	2.5		0.02	0.02	0.01	0.00	
2.5	-	3		0.05	0.02	0.01	0.00	
3	-	3.5			0.02	0.01	0.02	
3.5	-	4				0.01		
4	-	4.5						

**Tabla A-13 Olas locales en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto C**

Hs (m)			DIRECCION					
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S
0	-	0.5						
0.5	-	1						
1	-	1.5	0.21	0.12	0.09	0.01	0.01	
1.5	-	2	0.48	0.30	0.18	0.03	0.01	
2	-	2.5		0.71	0.36	0.12	0.02	
2.5	-	3		0.97	0.40	0.13	0.18	
3	-	3.5			0.43	0.16	0.31	
3.5	-	4				0.20		
4	-	4.5						

**Tabla A-14 Olas locales en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto D**

Hs (m)			DIRECCION						
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S	
0	-	0.5							
0.5	-	1	1.32	0.49	0.38	0.23	0.27		
1	-	1.5		0.97	0.66	0.46	0.46		
1.5	-	2		1.48	0.89	0.65	0.66		
2	-	2.5		1.82	1.05	0.81	0.88		
2.5	-	3			1.40	1.00	1.08		
3	-	3.5				1.07	1.10		
3.5	-	4							
4	-	4.5							

**Tabla A-15 Olas oceánicas en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto A**

Hs (m)			DIRECCION						
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S	
0	-	0.5							
0.5	-	1	0.38	0.15	0.13	0.05	0.07		
1	-	1.5		0.29	0.19	0.09	0.12		
1.5	-	2		0.42	0.28	0.15	0.17		
2	-	2.5		0.51	0.33	0.20	0.22		
2.5	-	3			0.33	0.28	0.29		
3	-	3.5				0.29	0.27		
3.5	-	4							
4	-	4.5							

**Tabla A-16 Olas oceánicas en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto B**

Hs (m)			DIRECCION						
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S	
0	-	0.5							
0.5	-	1	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
1	-	1.5		0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	
1.5	-	2		0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	
2	-	2.5		0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	
2.5	-	3			0.03	0.02	0.03	0.03	
3	-	3.5				0.03	0.03	0.03	
3.5	-	4							
4	-	4.5							

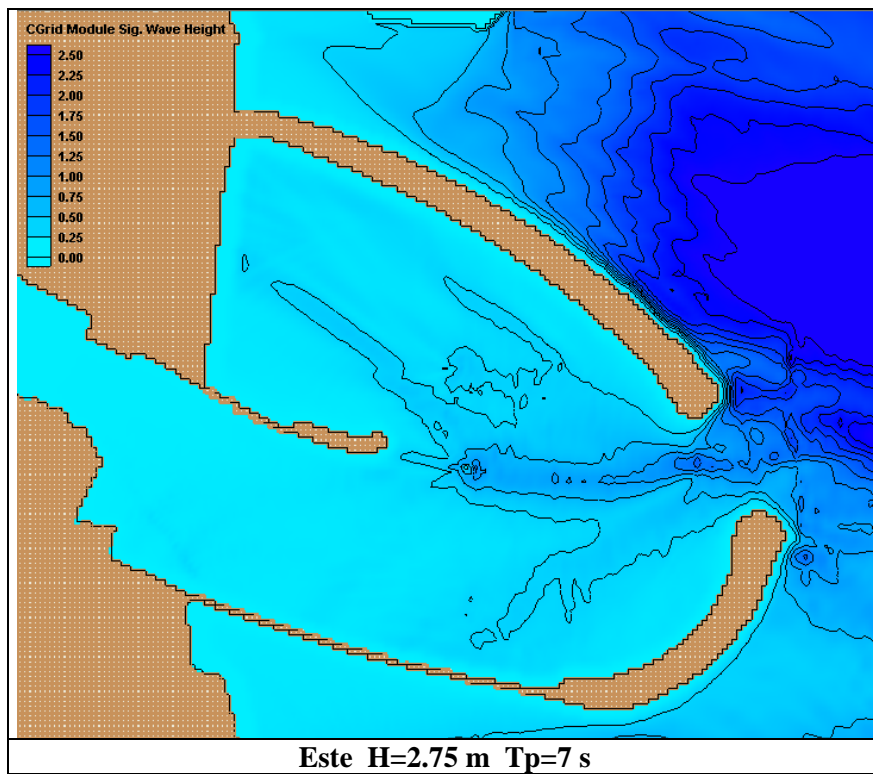
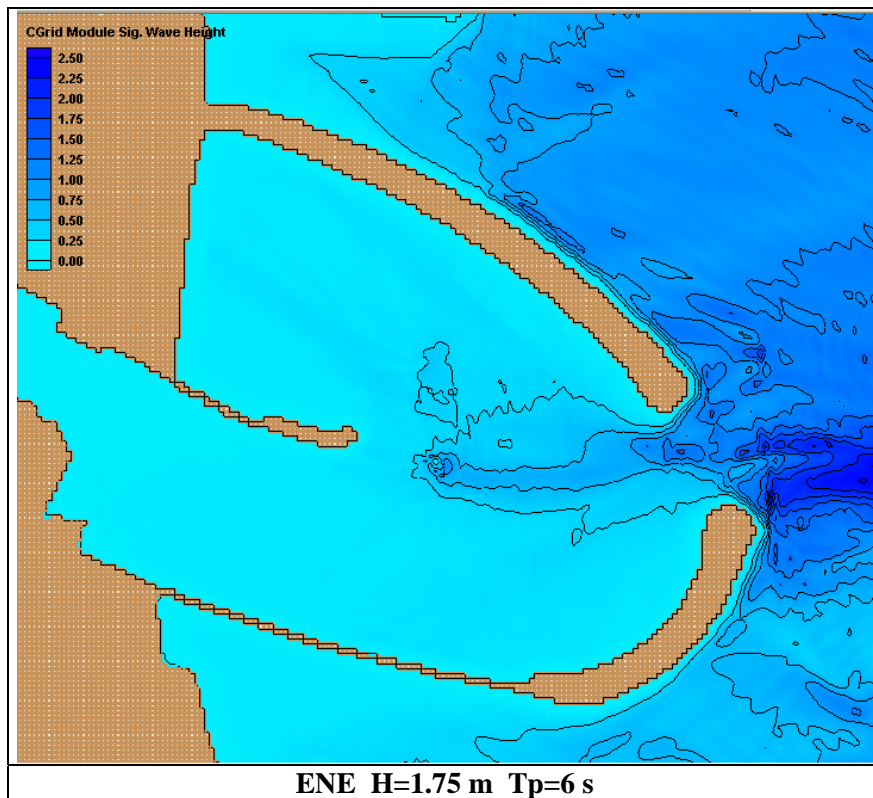
**Tabla A-17 Olas oceánicas en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto C**

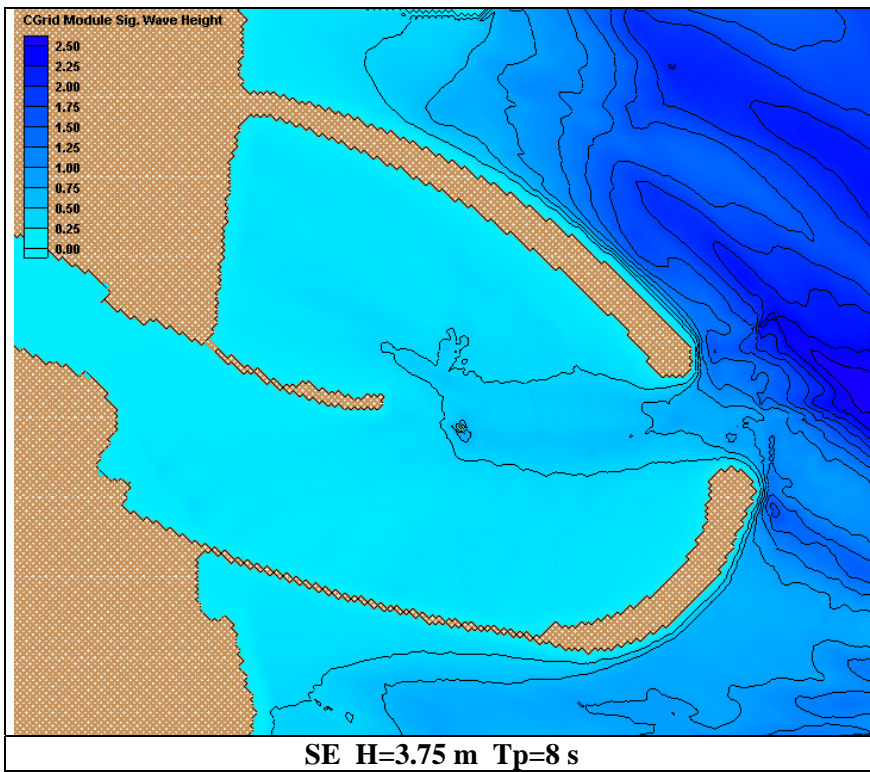
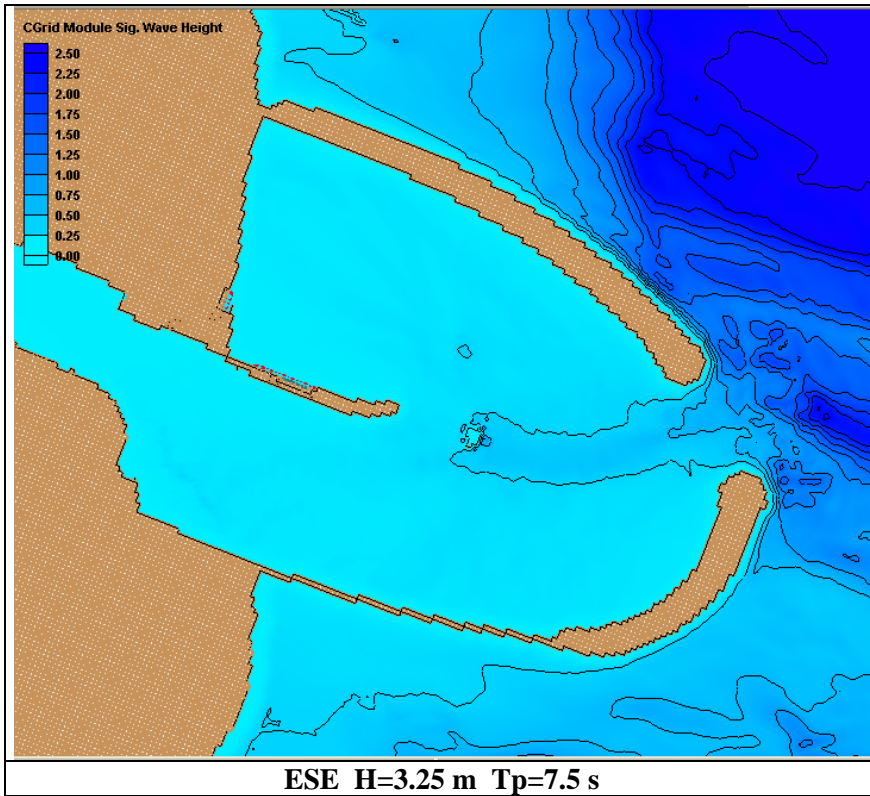
Hs (m)			DIRECCION						
			ENE	E	ESE	SE	SSE	S	
0	-	0.5							
0.5	-	1	0.67	0.22	0.25	0.28	0.25	0.25	
1	-	1.5		0.45	0.34	0.38	0.34	0.34	
1.5	-	2		0.56	0.42	0.41	0.41	0.41	
2	-	2.5		0.51	0.40	0.39	0.41	0.41	
2.5	-	3			0.31	0.37	0.35	0.35	
3	-	3.5				0.31	0.32	0.32	
3.5	-	4							
4	-	4.5							

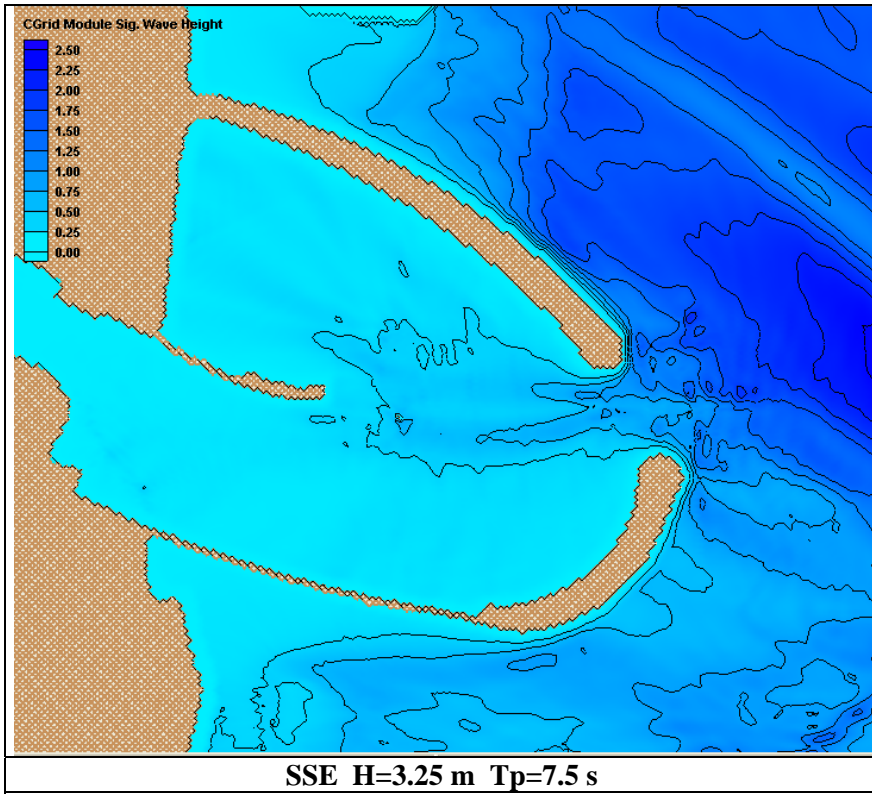
**Tabla A-18 Olas oceánicas en el interior del puerto. Pleamar Media. Punto D**

## **ANEXO III FIGURAS NIVEL MEDIO**

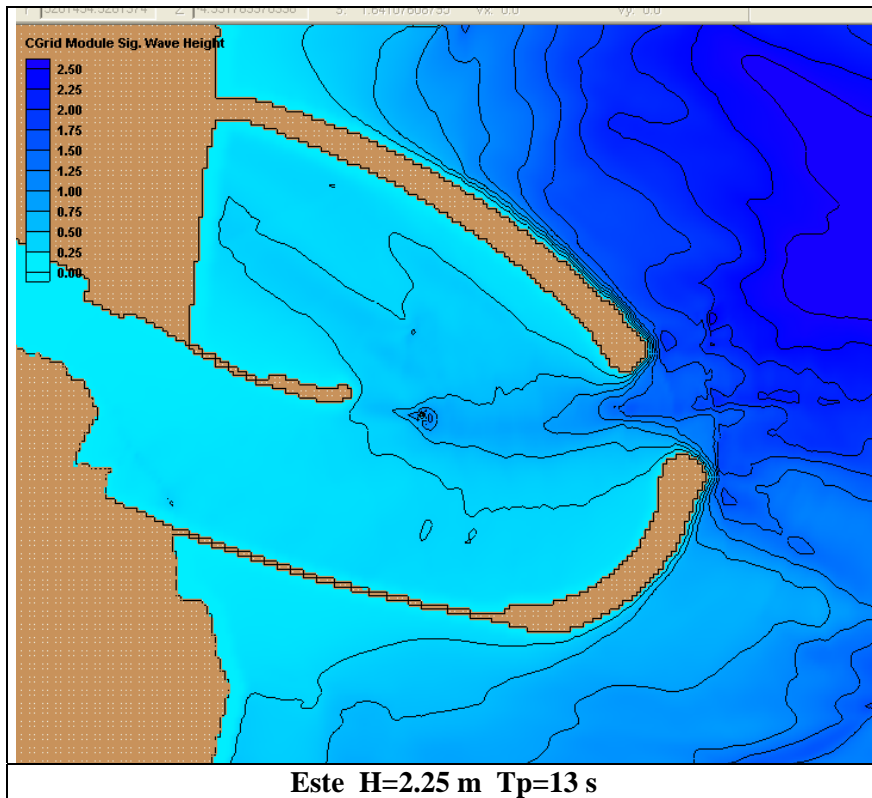
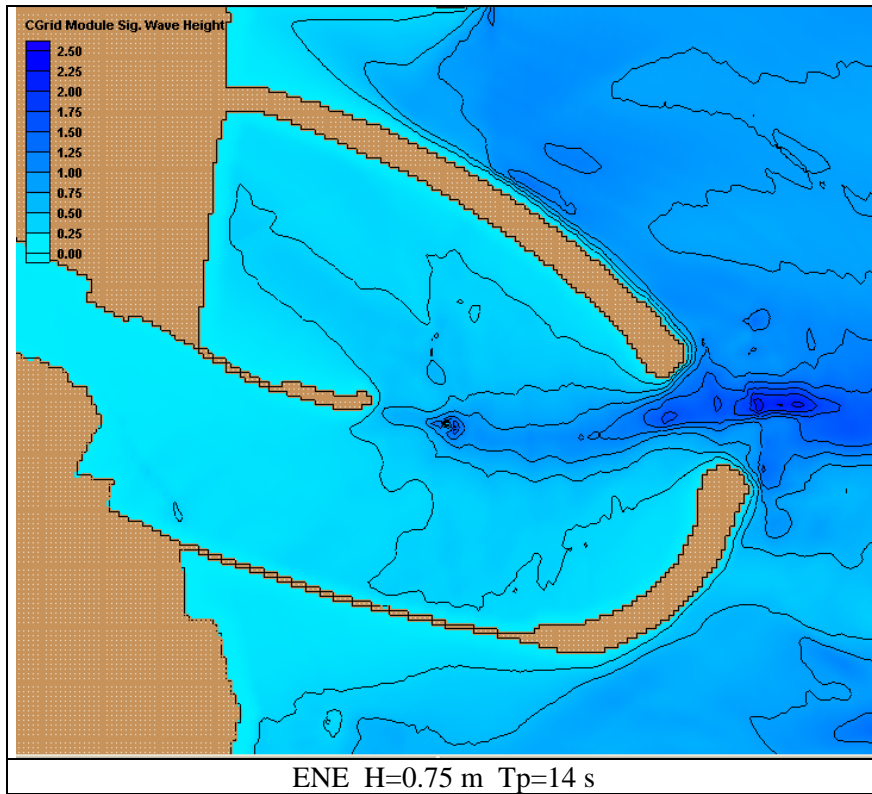
Resultados para olas locales con nivel medio

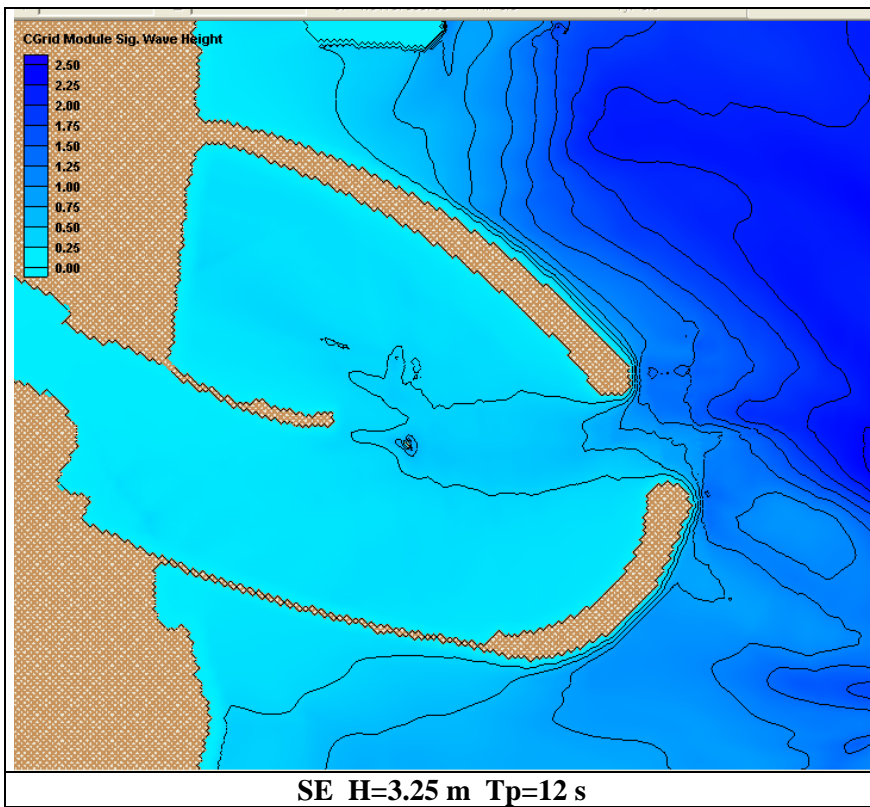
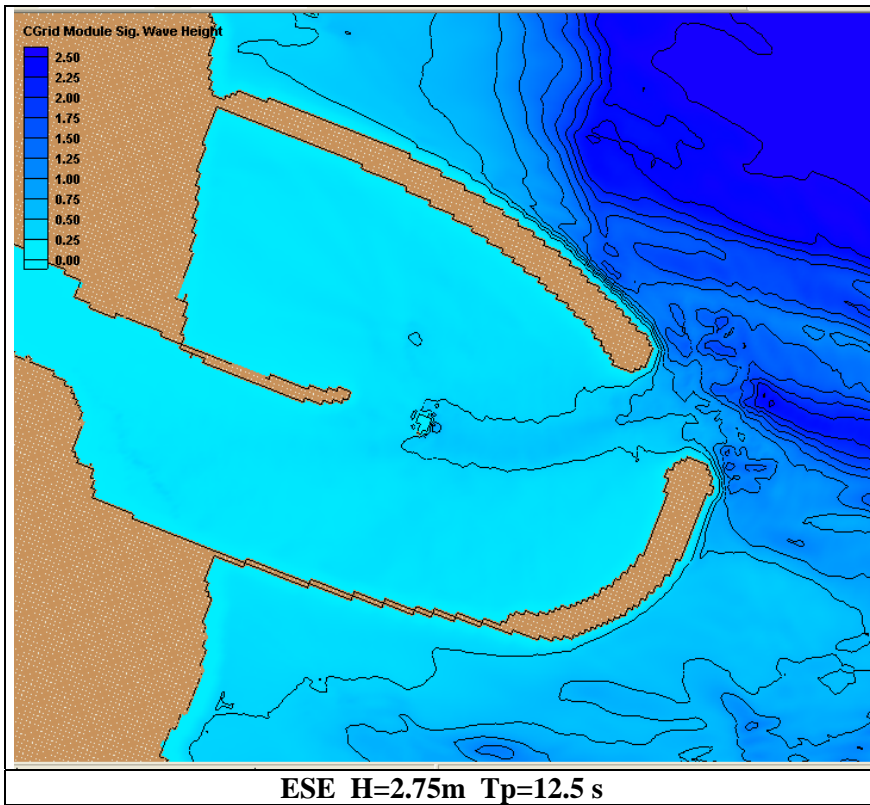


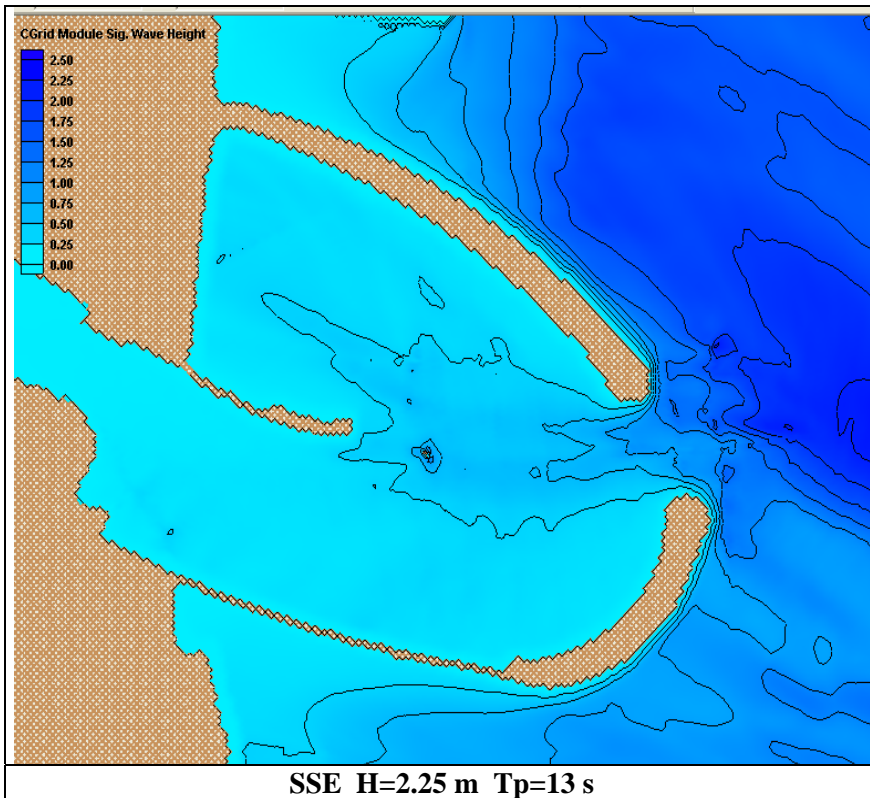
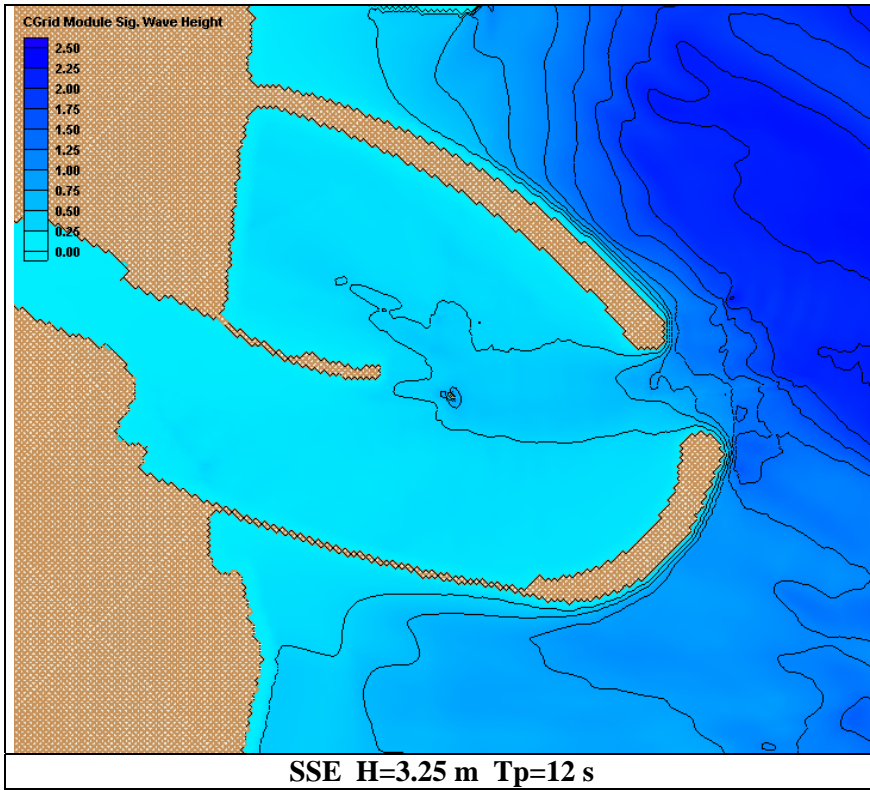


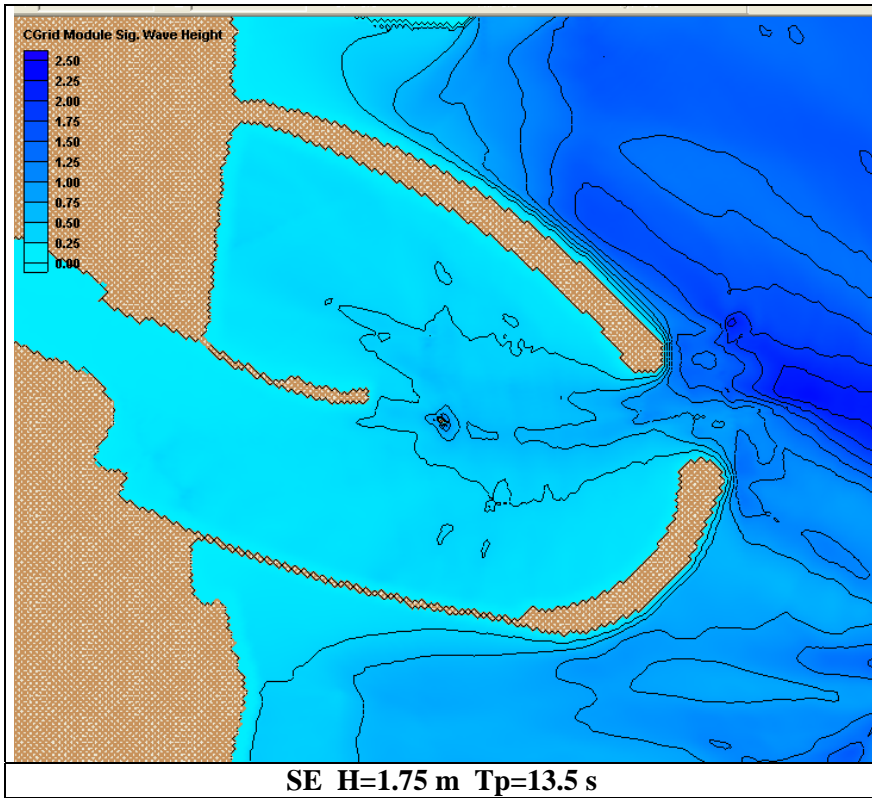


Resultados para olas oceánicas con nivel medio



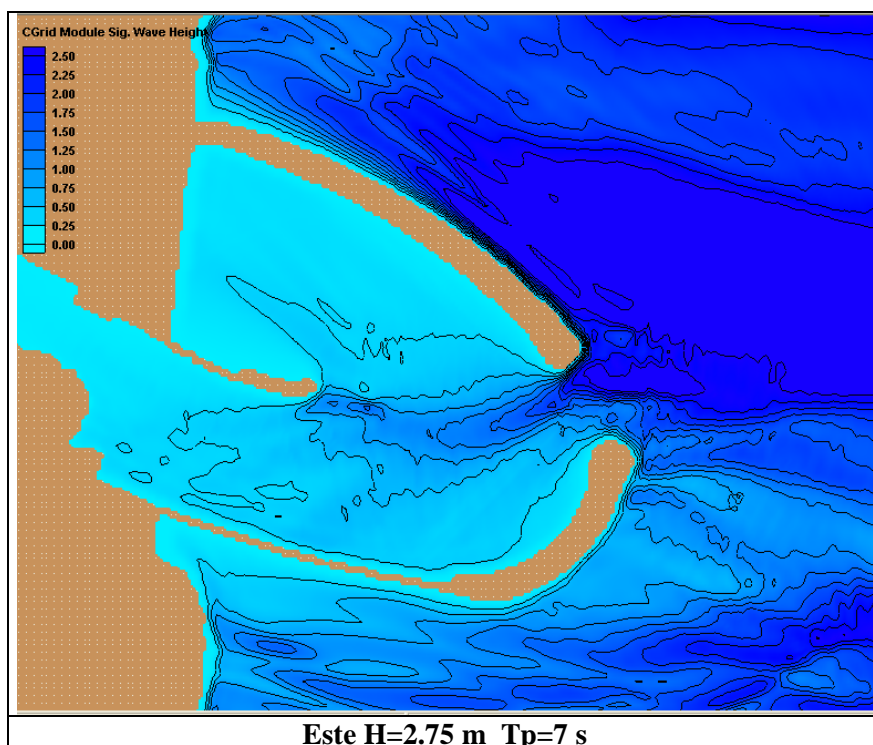
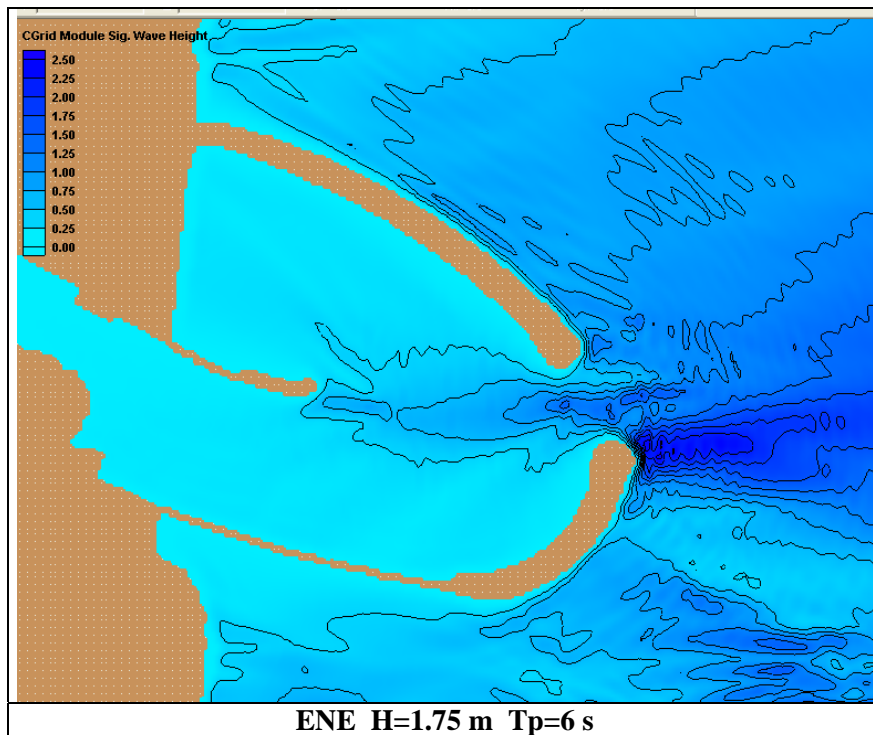


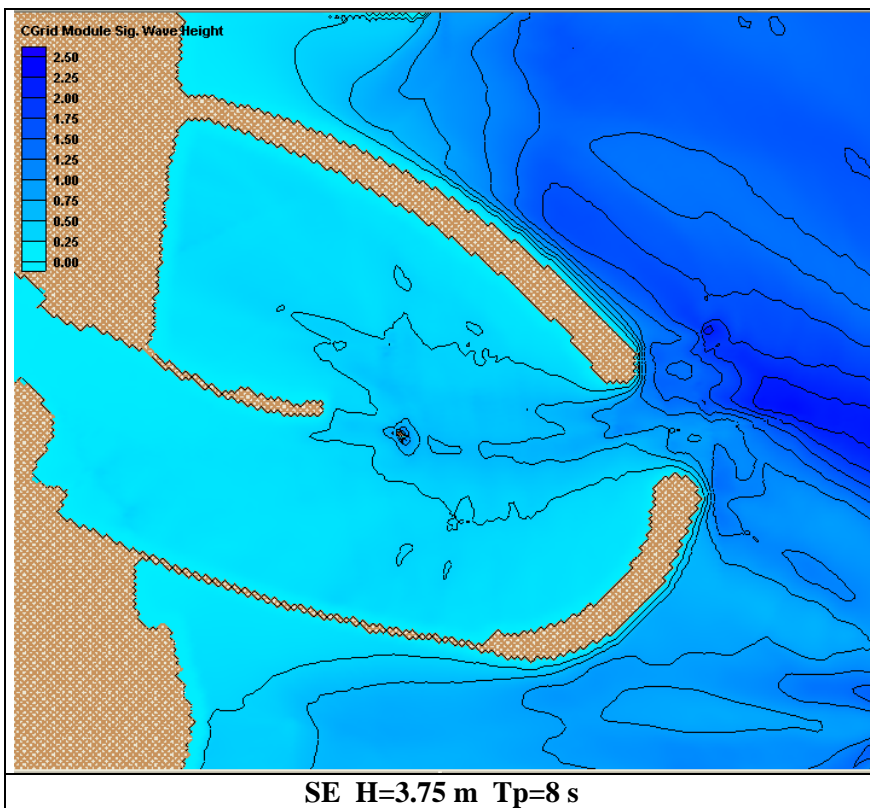
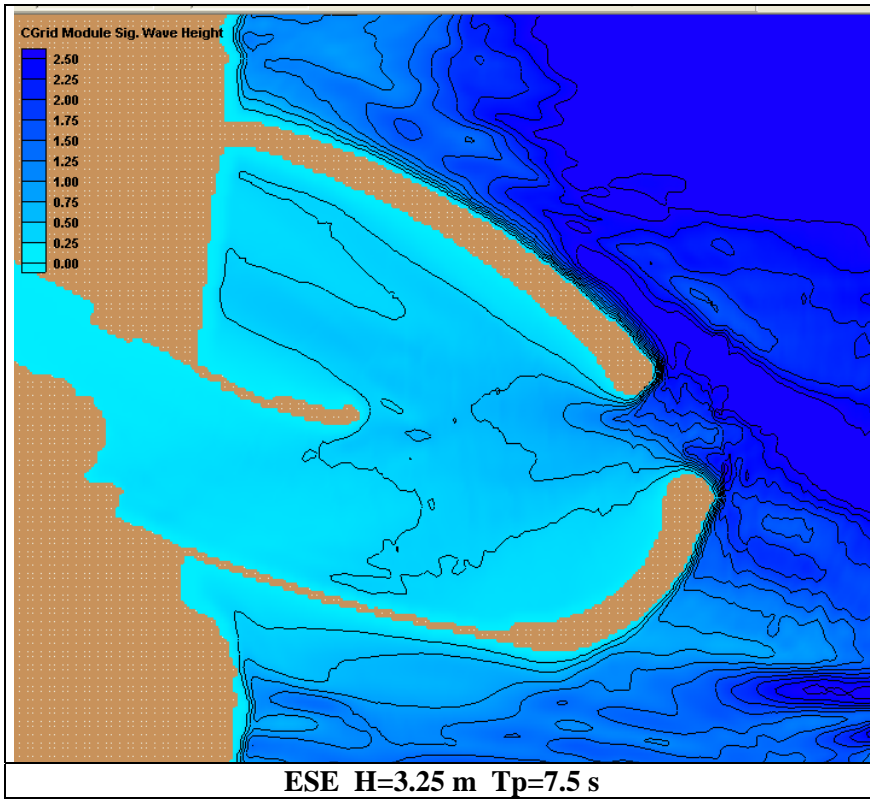


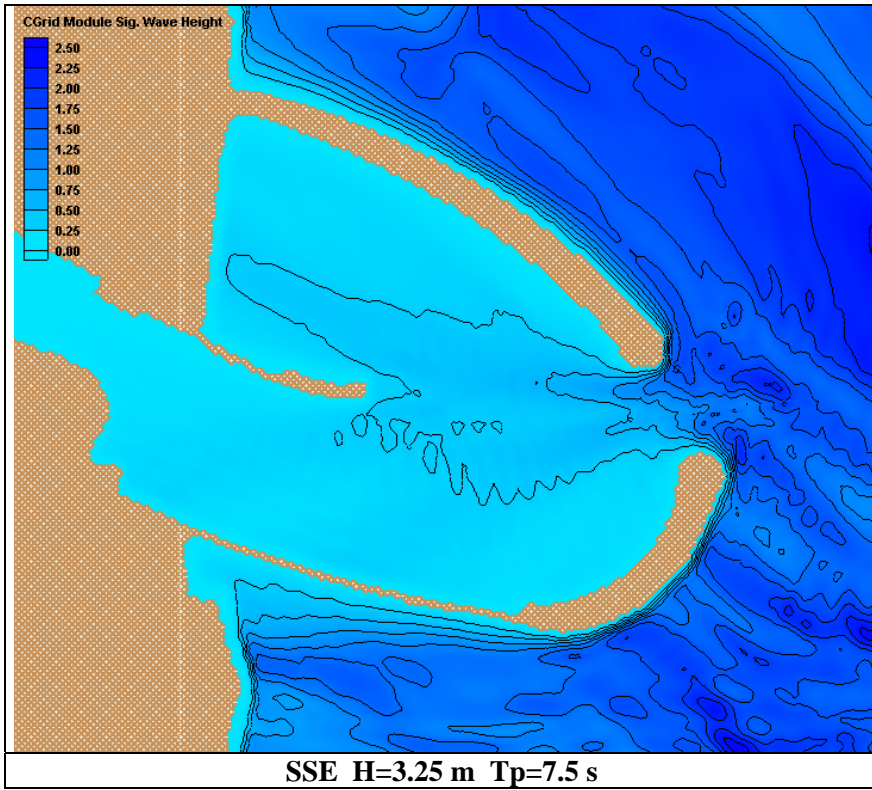


## **ANEXO IV FIGURAS PLEAMAR**

## Resultados para olas locales con Pleamar







## Resultados para olas oceánicas con Pleamar

