

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DE
OLAS Y CORRIENTES EN EL AREA COSTERA DE
RESTINGA DEL MEDIO**

INFORME FINAL

Octubre, 2008
Informe LHA- 276-02-08

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DE OLAS Y CORRIENTES EN EL AREA COSTERA DE RESTINGA DEL MEDIO

INFORME FINAL

RESUMEN

Se presenta una evaluación de las corrientes generados por oleaje en un área costera de la Provincia del Chubut. El frente costero se extiende a lo largo de de 7 Km, entre el Puerto de Comodoro Rivadavia al sur y el Cabo San Jorge (Restinga Alí) al norte.

La evaluación se realizó mediante modelación matemática, utilizando los módulos CMS-Wave y CMS-Flow del sistema SMS (Surface Modeling System).

PALABRAS CLAVE

Olas – corrientes litorales - clima de olas - - modelación matemática – Restinga del Medio - Comodoro Rivadavia

Informe	LHA-276-02-08
Fecha	Octubre, 2008
PROYECTO	683
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. N. Tomazin

Ing. R. Cáceres

Téc. Mec. C.A. Haspert

M.M.O. S.L. Peralta

E. Lacunza

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
2	OBJETIVOS.....	2
3	METODOLOGIA.....	3
4	DESCRIPCION GENERAL DEL AREA.....	4
5	DATOS DE BASE	7
5.1	Estudios previos.....	7
5.2	Planos de Referencia	7
5.3	Batimetría	7
5.4	Nivel del Mar.....	8
5.5	Olas y Vientos	8
5.6	Clima de olas en el área costera.....	10
5.6.1	Olas Locales	11
5.6.2	Olas Oceánicas	14
6	MODELACION MATEMÁTICA	17
6.1	Hidrodinámica en el área costera.....	17
6.2	Modelación matemática.....	18
6.2.1	Grillas de cálculo.....	18
6.2.2	Escenarios.....	23
6.2.3	Estabilidad de la solución numérica	25
6.3	Resultados para la simulación en condiciones de oleaje frecuente	27
6.3.1	Olas locales frecuentes en el tramo Sur.....	27
6.3.2	Olas oceánicas frecuentes en el tramo Sur	29
6.3.3	Olas locales frecuentes en tramo Norte	31
6.3.4	Olas oceánicas frecuentes en tramo Norte.....	33
6.4	Influencia de la variación del nivel del mar	35
6.4.1	Bajamar en el tramo SUR.....	35
6.4.2	Pleamar en el tramo Sur	37
6.4.3	Bajamar en el tramo Norte.....	39
6.4.4	Pleamar el tramo Norte.....	41
6.5	Resultados para condiciones de oleaje extremo	43

6.5.1	Olas locales extremas en el tramo Sur.....	43
6.5.2	Olas oceánicas extremas en el tramo Sur	46
6.5.3	Olas locales extremas en el tramo Norte	48
6.5.4	Olas oceánicas extremas en el tramo Norte.....	50
6.6	Corrientes generadas por la marea astronómica.....	52
7	CONCLUSIONES.....	56

Anexo I: Fotos

Anexo II: Descripción de los modelos matemáticos

Anexo III: Resultados de la modelación

PROVINCIA DEL CHUBUT

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA
DE OLAS Y CORRIENTES EN EL AREA COSTERA DE
RESTINGA DEL MEDIO**

INFORME FINAL

Octubre, 2008

1 INTRODUCCION

A requerimiento de la Dirección General de Infraestructura Portuaria de la Provincia del Chubut se llevó a cabo el presente estudio de caracterización del régimen de olas y corrientes litorales en el frente costero que se desarrolla al norte de la ciudad de Comodoro Rivadavia, comprendido entre el extremo sur de la Restinga Alfí y el puerto de la ciudad.

Los estudios se realizaron mediante la formalización del Acta Complementaria N° 8 al Convenio Marco de Cooperación e Investigación suscripto en Agosto de 2002 y renovado en 2007, entre el Instituto Nacional del Agua (INA) y la Provincia del Chubut.

En el Informe de Avance N° 1 se presentó una descripción de la metodología y resultados obtenidos en la primera etapa del estudio, consistente en evaluación del clima de olas en una posición costa afuera y en las proximidades del área costera de Restinga del Medio.

2 OBJETIVOS

Las tareas que se desarrollaron a lo largo del presente estudio tuvieron como objetivo final la caracterización del clima de olas y corrientes litorales sobre un tramo costero de la Provincia del Chubut (Restinga del Medio) comprendido entre el puerto de Comodoro Rivadavia y Restinga Alí, al norte del mismo. El desarrollo total de ese frente costero es de unos 7 Km.

3 METODOLOGIA

La metodología para el logro de los objetivos indicados se basó en el desarrollo de las siguientes etapas:

- Búsqueda, organización, análisis e interpretación de datos de base: olas, mareas, relevamientos batimétricos y topográficos, cartografía, vientos, etc. Otros estudios y antecedentes en la región.
- La implementación y aplicación de un modelo matemático de propagación de olas desde el punto donde se dispone de información hasta las proximidades del sitio de costero de interés. Los procesos básicos simulados en este caso son la refracción y el bajío por efecto del lecho marino.
- Evaluación de las corrientes costeras generadas por oleaje y mareas. Se aplicó un modelo matemático en el que los procesos básicos a modelar son los dominantes en la propagación de olas en áreas poco profundas: refracción, bajío y rotura de las olas. La generación de corrientes costeras está asociada a estos procesos.

4 DESCRIPCION GENERAL DEL AREA

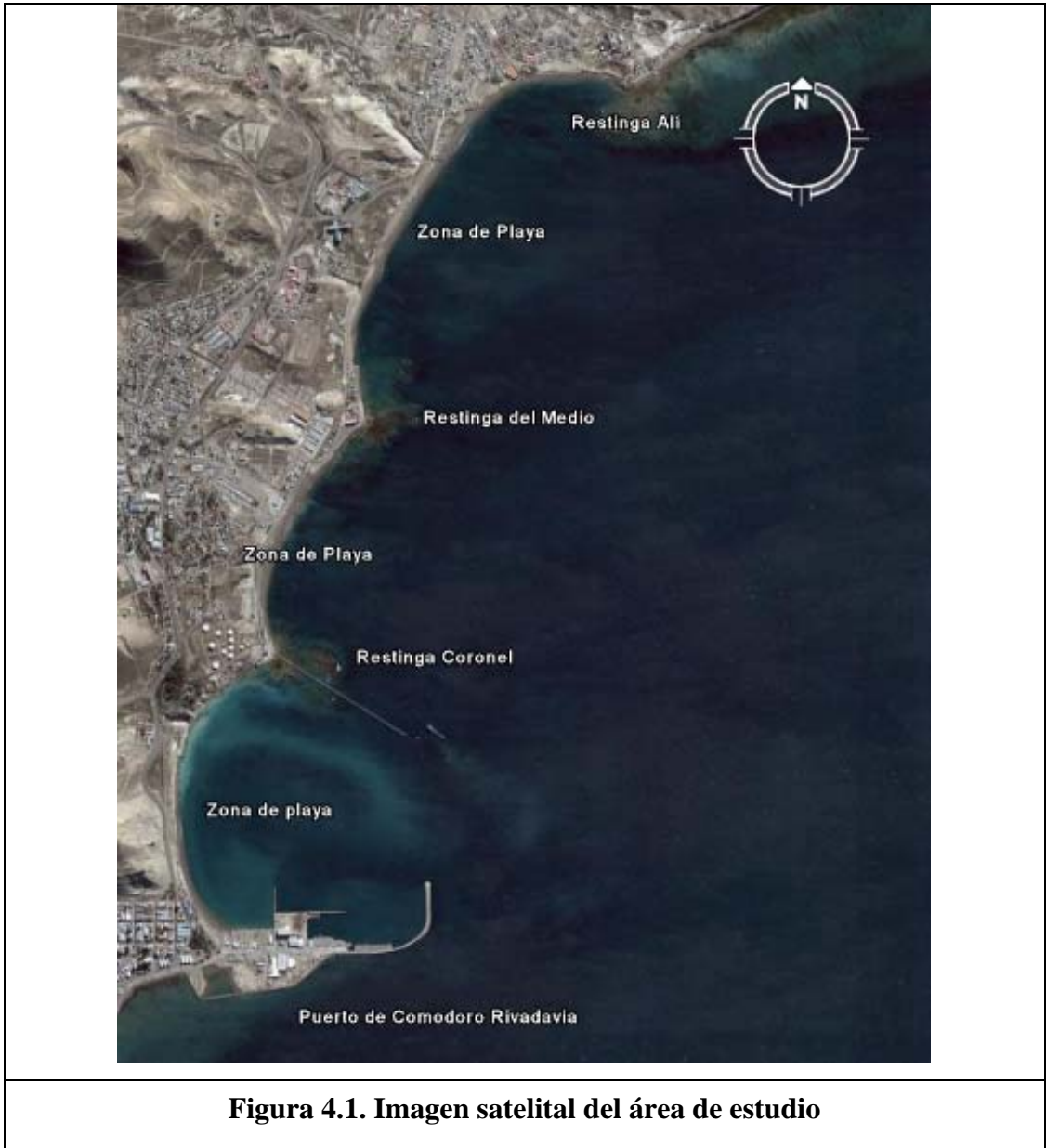
El tramo costero al cual se refiere este estudio se extiende entre el Puerto de Comodoro Rivadavia (al sur) y Restinga Alí (al norte), comprendiendo un desarrollo total de unos 7 Km. A lo largo de todo este tramo pueden observarse zonas con diferentes grados de urbanización y sectores de ocupación de la franja costera con distintos tipos de infraestructura.

En términos generales, la franja costera está enmarcada por barrancas y acantilados de altura variable, compuestos de materiales poco cohesivos, antecidos alternadamente por sectores de playa y zonas con afloramientos rocosos (restingas), tal como puede apreciarse en la imagen satelital presentada en la **Figura 4.1**.

La restinga es una formación característica del área y tiene una marcada influencia en los procesos costeros. Es una plataforma rocosa cuasi horizontal (**Foto 1. Anexo I**), de origen sedimentario, que interrumpe las zonas de playa en distintos sectores con afloramientos que tienen un ancho variable del orden de 200 m a 350 m. Para el tramo de costa abarcado en este estudio se observan tres sectores de restinga diferentes perfectamente identificados en la **Figura 4.1**. Las restingas Coronel, del Medio y Alí delimitan tres sistemas costeros conformados por tras playas de distinta extensión.

Los depósitos litorales presentes a lo largo de la costa están conformados por gravas de fracción gruesa a media, y arena en menor proporción. El ancho de la acumulación varía desde valores mínimos de 10m, inmediatamente al sur de la Restinga del Medio (**Foto 2. Anexo I**); hasta valores de 40 ó 50 m en los tramos centrales de las playas que se encuentran entre Restinga del Medio y Restinga Ali (**Foto 3. Anexo I**), y entre Restinga Coronel y Restinga del Medio (**Foto 4. Anexo I**).

Estas acumulaciones de sedimento grueso contribuyen a establecer las diversas características morfológicas de la costa, y ponen en evidencia de la existencia de una dinámica litoral intensa al mismo tiempo que actúan como una protección natural al oleaje del pie de las barrancas o de las estructuras costeras. Las zonas más afectadas por el oleaje coinciden con el tramo de la costa donde los cordones litorales indicados son estrechos.



Tal como ocurre en gran parte del litoral patagónico, la extensa restinga de escasa pendiente juega un rol preponderante en las características de los procesos costeros. Su posición altimétrica es tal que sólo durante la marea alta resulta cubierta por el agua, permitiendo la llegada de las olas a la costa sólo durante una fracción del ciclo de marea.

De esta manera, la restinga 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 (**Foto 5 Anexo I**). Esto implica la existencia de una protección natural y localizada a la franja costera, con la consiguiente desarrollo de tasas de erosión diferenciales, que le otorgan a la línea costera la morfología que se aprecia en la **Figura 4.1**.

5 DATOS DE BASE

5.1 Estudios previos

A los fines de recabar información para el desarrollo del presente estudio, se han consultado los siguientes antecedentes:

- *Ampliación del Puerto de Caleta Córdova. Estudio Mediante Modelación Matemática para la Optimización del Proyecto.* INA, Informe LHA-252-01-05, Noviembre 2005.
- *Estudio mediante modelación matemática de olas y corrientes en el área costera de Restinga del Medio.* Informe de Avance 1. Informe LHA- 276-01-08, Enero 2008.
- *Puerto de Comodoro Rivadavia. Estudio Mediante Modelación Matemática de Nuevas Obras de Abrigo.* Parte I – Clima de Olas INA. Informe LHA- 273-01-08. Junio, 2008.

5.2 Planos de Referencia

Se utilizó el plano de referencia MOP, coincidente con el cero del Riachuelo, y que se halla a 0,52 m por encima del plano hidrográfico de referencia de las Cartas Náuticas y Tablas de Mareas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

5.3 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:

- *Cartas Náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN)*
- *Carta N° 59. GOLFO SAN JORGE. Escala 1:400.000*
- *Carta N° 30. COMODORO RIVADAVIA. Escala 1:20.000*

Además se contó con un relevamiento de detalle provisto por la DGIP, realizado entre Marzo y Abril de 2007, consistente en una batimetría y taquimetría desde el Puerto

Comodoro Rivadavia hasta el Barrio Presidente Ortiz (Ver **Anexo I del Informe de Avance 1**).

5.4 Nivel del Mar

La siguiente **Tabla 5.1** muestra la marea astronómica en el Puerto de Comodoro Rivadavia¹. El Nivel Medio del Mar (NMM) es 3,14 m. Todos los valores están referidos al Plano de Reducción Hidrográfico ubicado a 0,52 m por debajo del 0 MOP.

Tabla 5.1. Marea astronómica en Comodoro Rivadavia

Alturas en m sobre el plano de reducción				Amplitud (m)	
Pleamar		Bajamar			
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
6,35	5,29	0,26	1,21	5,95	4,08

Expresados en el sistema de referencia MOP, la pleamar máxima resulta 5,83 m MOP y el NMM = 2,62 m.

5.5 Olas y Vientos

Los datos de base utilizada en este estudio corresponden a aguas intermedias y son generados por un Modelo Global de Oleaje. Los resultados obtenidos por el Modelo Global son calibrados y validados mediante la utilización de información satelital, lo cual constituye un aporte significativo para mejorar la confiabilidad de los datos.

Los datos utilizados fueron producidos por la Agencia Meteorológica del Reino Unido (**United Kingdom Meteorological Office, UKMO**) y corresponden a la ubicación 45,36°S y 64,38°W entre el 1/1/95 y el 25/5/99, y 45,83°S 64,58°W entre el 28/05/99 y el 31/07/2005. Los datos consistieron en una serie cronológica que abarca algo más de 10 años, desde 01/01/1995 al 31/7/2005. Los datos tienen un espaciamiento temporal de 6 horas. La ubicación indicada se halla a unos 236 Km al ENE de Comodoro Rivadavia.

Las variables provistas en los registros son las siguientes:

¹ Servicio de Hidrografía Naval. Tabla de Mareas 2007.

- Intensidad y dirección del viento (a 10 m de altura)
- Altura de ola (H_s), período medio ($T_m=T_z=T_{0,2}$), período de pico T_p y dirección de propagación para el espectro total resultante.
- Altura de ola (H_s), período medio ($T_{0,2}$) y dirección de propagación para el espectro de olas generadas localmente por vientos.
- Altura de ola (H_s), período 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 medio $T_m=T_{0,2}$ es el determinado a partir de los momentos de orden 0 y 2 del espectro, es decir:

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$$

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

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df$$

En total se dispuso de 15.008 valores de las variables.

Sobre esta base se efectuó una caracterización del clima de olas en la posición costa afuera indicada, ubicada en el Golfo de San Jorge, que se ha presentado detalladamente en el **Informe de Avance 1**.

5.6 Clima de olas en el área costera

La caracterización del clima de olas en el área costera se realizó mediante el modelo matemático SWAN (**S**imulating **W**aves **N**earshore), desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft. Una descripción del mismo se ha incorporado en el **Informe de Avance 1**.

Se dispuso de la información de oleaje obtenida en las proximidades del puerto de Comodoro Rivadavia, vinculadas con el estudio de ampliación de las obras de abrigo, en una posición de coordenadas X=3.387.550 (Este), Y=4.920.991 (Norte) que se indica como **A** en la **Figura 5.1**. La profundidad local en esta posición es de aproximadamente 12,8 m, referido al 0 MOP.

La aplicación del modelo matemático SWAN permitió además caracterizar el clima de olas en otra posición del frente costero (**Informe de Avance 1**) en una segunda posición de coordenadas X=3.388.336 (Este), Y=4.923.178 (Norte) que se indica como **B** en la **Figura 5.1**. La profundidad local en esta posición es también de aproximadamente 12,8 m, referido al 0 MOP. Ambos puntos de control se hallan separados por una distancia de 2.325 m.

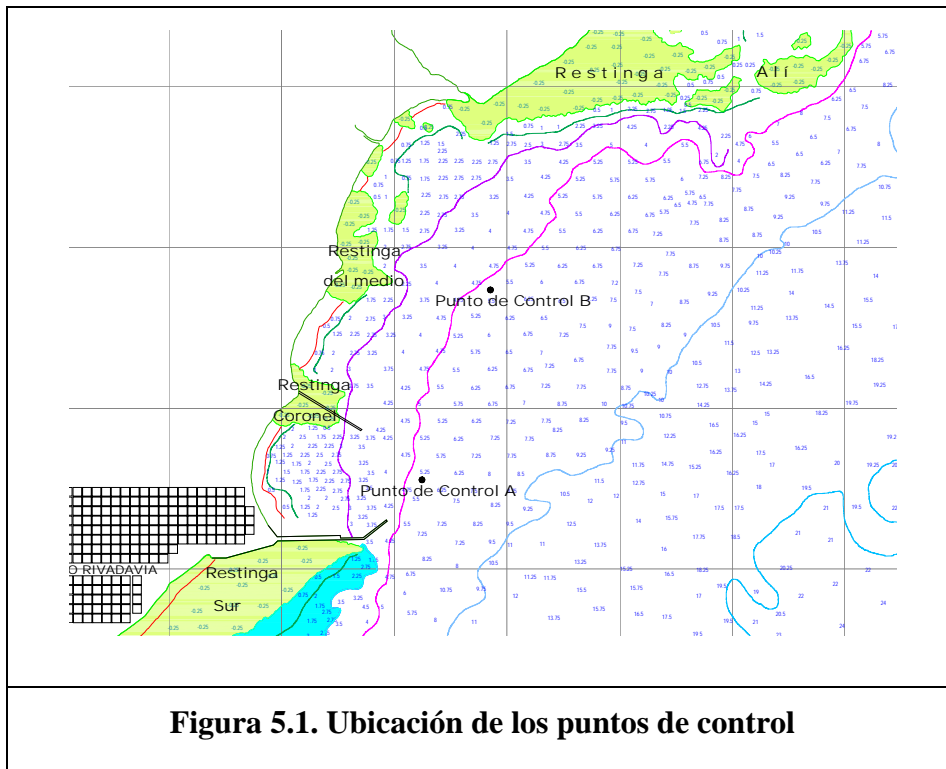


Figura 5.1. Ubicación de los puntos de control

5.6.1 Olas Locales

Las olas locales que llegan a la costa en la posición **B** fueron 5.456 valores del total de 15.008, lo que representa una persistencia de algo más del 36% del tiempo. En la posición **A** la persistencia resultó 30%.

La **Tabla 5.2** resume las propiedades estadísticas de las olas locales en el período 1995-2005.

Tabla 5.2 Características generales de las olas locales		
Altura de ola (m)	Punto de control	
	A	B
H _{max}	4.0	4.1
H _{90%}	1.8	1.6
H _{75%}	1.3	1.2
H _{50%}	0.9	0.8
H _{25%}	0.5	0.5

La **Tabla 5.3** muestra la correlación entre altura y periodo medio del oleaje local en los puntos de control A (Puerto Comodoro Rivadavia) y B (Restinga del Medio).

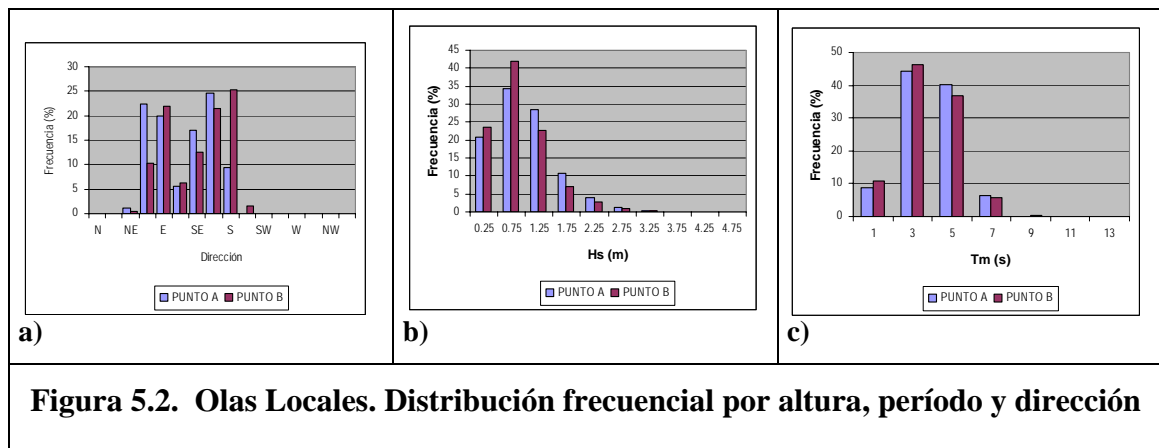
Tabla 5.3. Correlación entre altura de ola y período en el área costera (o/oo)																	
Hs(m)			Tm(s)						Hs (m)			Tm (s)					
			0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12				0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12
0	-	0.5	85	124	0	0	0	0	0.0	-	0.5	106	131	0	0	0	0
0.5	-	1	3	276	63	0	0	0	0.5	-	1.0	3	301	113	3	0	0
1	-	1.5	0	43	242	0	0	0	1.0	-	1.5	0	30	197	0	0	0
1.5	-	2	0	1	88	18	0	0	1.5	-	2.0	0	1	51	20	0	0
2	-	2.5	0	0	8	32	0	0	2.0	-	2.5	0	0	7	22	0	0
2.5	-	3	0	0	1	12	0	0	2.5	-	3.0	0	0	0	10	0	0
3	-	3.5	0	0	0	3	1	0	3.0	-	3.5	0	0	0	1	3	0
3.5	-	4	0	0	0	0	1	0	3.5	-	4.0	0	0	0	0	0	0
4	-	4.5	0	0	0	0	0	0	4.0	-	4.5	0	0	0	0	1	0
4.5	-	5	0	0	0	0	0	0	4.5	-	5.0	0	0	0	0	0	0
Punto A									Punto B								

La **Figura 5.2.** muestra los histogramas de dirección, altura y período de oleaje en el área costera. Los porcentajes se refieren al total de datos de olas locales que arriban al área costera (5.456), que como se ha indicado representan aproximadamente un 36% del total de datos.

Como surge de los gráficos, en términos generales ambas posiciones **A** y **B** (separadas unos 2.325 m) presentan valores similares en las distribuciones frecuenciales de altura, período y dirección, con excepción de las direcciones NNE y S (**Figura 5.2.a**).

En la posición **B**, las olas del NNE son considerablemente menos frecuentes que en la posición **A**, debido a la presencia cercana (al norte) del Cabo San Jorge, de un sistema de restingas (Restinga Alí) y al cambio en la orientación de la costa. Por el contrario, puede notarse que en la posición **B** las olas del S son notablemente más frecuentes que en **A**. Es posible que a ello contribuya el efecto de refracción por profundidad debido a la particular conformación del lecho marino, como lo muestra la **Figura 5.1**.

En efecto, puede notarse que a la altura de Restinga del Medio tanto la alineación general de la costa como las isobatas (incluyendo la de 12 m sobre la que se hallan ubicados los puntos de control **A** y **B**), experimentan un marcado cambio de orientación. En particular la isobata de 12 m cambia 34° en su orientación entre ambas posiciones **A** y **B**, por lo que es razonable suponer que las olas del S se refractan considerablemente más hasta llegar a la posición **A** que hasta la **B**, con la consiguiente variación en la altura de ola resultante. Esta diferencia del patrón de refracción es gradualmente menor a medida que las olas proceden desde sectores SSE y SE.



Las **Tablas 5.4.a. y 5.4.b** muestran en detalle la distribución direccional de altura de ola en ambas posiciones. En la posición **A** las olas locales más frecuentes proceden del sector SSE, mientras que en **B** son del S, aunque también con una importante contribución del sector SSE.

Tabla 5.4.a . Punto A. Distribución de olas locales en el área costera

Hs(m)	DIRECCION															TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
0 - 0,5	0	0	50	282	132	54	76	108	216	0	0	0	0	0	0	0	918
0,5 - 1	0	0	0	492	224	44	157	390	194	0	0	0	0	0	0	0	1501
1 - 1,5	0	0	0	201	262	58	197	530	3	0	0	0	0	0	0	0	1251
1,5 - 2	0	0	0	12	215	39	155	50	0	0	0	0	0	0	0	0	471
2 - 2,5	0	0	0	0	36	32	107	2	0	0	0	0	0	0	0	0	177
2,5 - 3	0	0	0	0	3	13	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54
3 - 3,5	0	0	0	0	1	3	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
3,5 - 4	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
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
TOTAL	0	0	50	987	873	245	744	1080	413	0	0	0	0	0	0	0	4392

Tabla 5.4.b. Punto B. Distribución de olas locales en el área costera

Hs [m]	DIRECCION															TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
0.0 - 0.5	0	0	27	288	183	72	77	110	444	91	0	0	0	0	0	0	1292
0.5 - 1.0	0	0	0	264	476	114	159	361	920	0	0	0	0	0	0	0	2294
1.0 - 1.5	0	0	0	8	398	80	160	572	22	0	0	0	0	0	0	0	1240
1.5 - 2.0	0	0	0	0	131	40	106	109	0	0	0	0	0	0	0	0	386
2.0 - 2.5	0	0	0	0	13	24	105	16	0	0	0	0	0	0	0	0	158
2.5 - 3.0	0	0	0	0	0	8	49	1	0	0	0	0	0	0	0	0	58
3.0 - 3.5	0	0	0	0	0	4	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
3.5 - 4.0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
4.0 - 4.5	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
4.5 - 5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0 - 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	0
TOTAL	0	0	27	560	1201	343	679	1169	1386	91	0	0	0	0	0	0	5456

Tanto en la posición **A** como en la **B** las olas más altas son de los sectores SE y ESE. Las olas más altas alcanzan en la posición **A** valores de 3,5 a 4,0 m ($H_{smax} = 3,8$ m) mientras que en **B** las máximas olas locales han mostrado valores Hs 4,0 \approx 4,5 m. ($H_{smax} = 4,10$ m).

Ambas corresponden a la dirección SE y la diferencia porcentual entre ambos valores (algo más de 10%) se explica, como se ha indicado más arriba, por los efectos de refracción.

Las olas del ENE alcanzan en la posición **A** alturas en el rango de 1,5 a 2 m mientras que en **B**, además de ser menos frecuentes como se ha indicado, alcanzan valores máximos de $H_s \approx 1,5$ m debido al efecto de protección del Cabo San Jorge, la Restinga Alí y la orientación general de la costa al norte de esta posición.

5.6.2 Olas Oceánicas

Con referencia a las olas oceánicas, del total de datos disponibles (15.008 valores), alcanzan el área costera casi el 72% del total del tiempo tanto en la posición A como la B. La distribución frecuencial acumulativa es semejante en ambas posiciones como lo muestran los valores de la **Tabla 5.5**. La altura máxima estimada para el período de 10 años fue algo mayor en la posición **B** que en la **A**.

Tabla 5.5 Características generales de las olas oceánicas		
Altura de Ola	Punto de Control	
	A	B
H_{max}	2.5	2.8
$H_{90\%}$	0.8	0.8
$H_{75\%}$	0.6	0.6
$H_{50\%}$	0.4	0.4
$H_{25\%}$	0.2	0.2

En la **Tabla 5.6**. se presenta la correlación entre altura significativa y período medio. Las celdas indican el número de valores en cada rango de altura de olas y período medio.

Tabla 5.6. Restinga del Medio. Olas Oceánicas. Correlación entre altura significativa y período medio

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	26-28
0 - 0.5	0	0	373	1188	1837	2093	1204	377	115	19	7	0	0	0
0.5 - 1	0	4	224	960	911	561	238	68	8	0	1	1	0	0
1 - 1.5	0	0	31	177	125	70	24	5	0	0	0	0	0	0
1.5 - 2	0	0	1	32	36	17	7	4	0	0	0	1	0	0
2 - 2.5	0	0	0	2	1	5	1	1	0	0	0	0	1	0
2.5 - 3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
3 - 3.5	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
4 - 4.5	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
5 - 5.5	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

Las olas más altas que arriban a la costa presentan períodos medios de 12 a 14 s.

La **Figura 5.3.** muestra los histogramas de distribución de altura, período medio y dirección de procedencia del oleaje en el área costera. Los porcentajes se refieren al total de datos de olas oceánicas (10.732 valores), que representa un 71,5% del listado completo de datos en el registro de 10 años (15.008 valores).

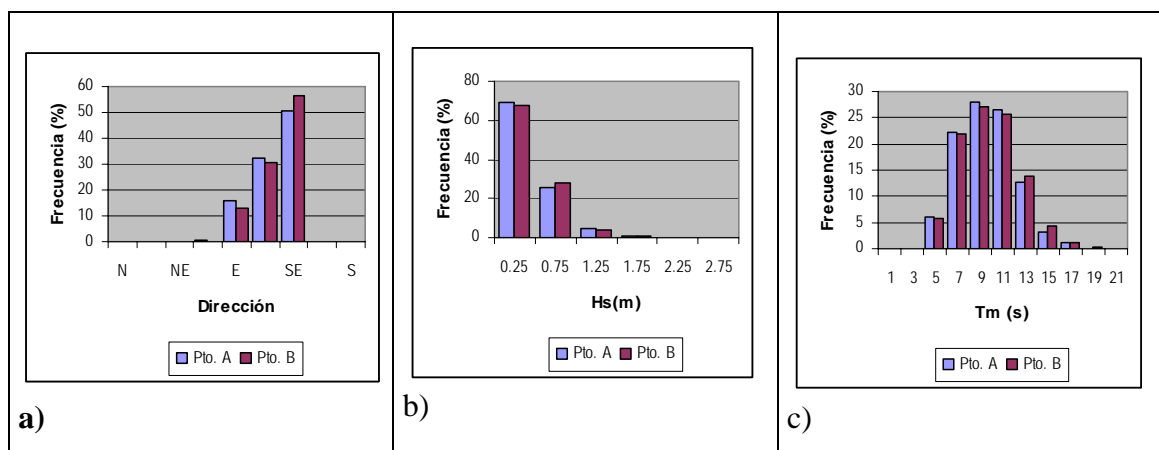


Figura 5.3. Olas Oceánicas. Histogramas de distribución por altura, período medio y dirección de procedencia en los puntos de control A y B

La dirección de procedencia de las olas oceánicas en el área costera es predominantemente del sector SE , con alguna contribución del ESE y en menor medida del E.

Las **Tablas 5.7.a** y **5.7.b.** muestran en detalle la estructura direccional del oleaje en las posiciones **A** y **B**. En ambas posiciones la dirección dominante de las olas oceánicas en el área costera es el sector SE aunque las olas de mayor altura (Hs hasta 2,0 ≈ 2,5 m) tienen a proceder del sector ESE.

Tabla 5.7.a. Punto A. Distribución de olas oceánicas en el área costera

Hs(m)	DIRECCION																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0 - 0,5	0	0	0	42	865	2150	4331	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7388
0,5 - 1	0	0	0	21	725	965	1018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2729
1 - 1,5	0	0	0	0	111	296	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	486
1,5 - 2	0	0	0	0	17	75	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112
2 - 2,5	0	0	0	0	2	11	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
2,5 - 3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
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
TOTAL	0	0	0	63	1720	3497	5452	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10732

Tabla 5.7.b. Punto B. Distribución de olas oceánicas en el área costera

Hs [m]	DIRECCION																TOTAL
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0.0 - 0.5	0	0	0	4	759	1678	4772	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7213
0.5 - 1.0	0	0	0	0	556	1228	1192	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2976
1.0 - 1.5	0	0	0	0	51	303	78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	432
1.5 - 2.0	0	0	0	0	5	88	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98
2.0 - 2.5	0	0	0	0	0	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
2.5 - 3.0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
3.0 - 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	0
4.0 - 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	0
5.0 - 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	0
TOTAL	0	0	0	4	1371	3309	6048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10732

La comparación de las **Tablas 5.7.a** y **5.7.b** permite establecer que hay un mayor porcentaje de olas que superan los 2 m en la posición **A** que en la **B**.

6 MODELACION MATEMÁTICA

6.1 Hidrodinámica en el área costera

El área marítima costera es un ambiente de gran complejidad desde el punto de vista de los procesos hidrodinámicos y morfológicos que allí se desarrollan. La marea astronómica, los vientos, la presión atmosférica, la morfología costera, las olas que se propagan hacia la costa y rompen, y los sistemas de corrientes por ellas inducidas, son ejemplos de los procesos que coexisten e interactúan en el área costera y reflejan la dificultad de su descripción.

Cuando las olas se propagan en aguas de profundidad suficientemente reducida como lo es el área costera, los efectos de refracción modifican la altura y dirección de propagación del oleaje. Esta variación espacial de las propiedades del oleaje induce un gradiente en el nivel medio del mar y la generación de corrientes de circulación. Tanto la topografía del fondo y los procesos de refracción asociados, como la presencia de estructuras (como la escollera del Puerto de Comodoro Rivadavia) que inducen la difracción del oleaje, son generadores de esta circulación.

En particular la rotura del oleaje en la playa genera sistemas de corrientes complejos. Particularmente importante resultan las corrientes paralelas a la línea de costa y confinadas a la zona de rompiente (corrientes litorales), que depende principalmente del ángulo de incidencia y de la altura de las olas que llegan a la posición de la rompiente. Estas corrientes son de especial importancia en la definición del equilibrio dinámico de la playa dado que son las responsables principales del transporte de sedimentos, por lo cual, el estudio de las mismas constituye un elemento esencial para la evaluación de cualquier tipo de intervención sobre la costa.

Otras corrientes asociadas al oleaje rompiente que llega a la playa son las corrientes de retorno (rip currents) y las corrientes de resaca (undertow)

Existen expresiones analíticas que permiten obtener una estimación de la magnitud de las corrientes generadas por la rotura del oleaje para playas con geometrías simples. En este caso, dada la complejidad de la morfología costera y la batimetría existente, el análisis debió realizarse mediante la utilización de métodos numéricos, que permiten resolver las ecuaciones de gobierno que describen el problema.

6.2 Modelación matemática

La modelación se llevó a cabo mediante la implementación de los módulos CMS-Wave (oleaje) y CMS-Flow (hidrodinámico) sobre grillas de cálculo independientes, construidas convenientemente para cada caso. CMS es el Coastal Modeling System, desarrollado por el U.S. Army Engineer Research and Development Center (USACE-ERDC), y pertenece al sistema SMS (Surface Modeling System).

CMS-Wave (antes denominado WABED, Wave Action Balance Equation Diffraction) es un modelo de transformación de olas espectral basado en la ecuación de balance de acción de oleaje. Resuelve la propagación de oleaje en aguas costeras, incluyendo los procesos de refracción, bajío, rotura por profundidad, entre otros. Debido al planteo conceptual, estos modelos no pueden en principio predecir la difracción o reflexión por batimetría o estructuras. Sin embargo contienen desarrollos teóricos de estos dos procesos que permiten evaluarlos e incorporarlos, lo que hace de CMS-Wave un modelo apto para la resolución de variados problemas en áreas costeras.

CMS-flow es un modelo hidrodinámico que permite calcular nivel y velocidad del agua además del transporte de sedimentos y cambio morfológico del lecho. Acoplado con CMS-Wave permite calcular corrientes y transporte de sedimentos generados por el oleaje.

El intercambio de información entre ambos módulos es realizado automáticamente mediante el módulo STEERING, disponible en la versión 10.0 del sistema SMS. Una descripción más detallada de los modelos se da en el **Anexo II**.

La implementación de cada módulo requiere básicamente de la definición del área a modelar, la elección de una resolución para la discretización espacial (Δx , Δy), la elección de la orientación más adecuada para la grilla, y la construcción de grilla de cálculo. En segunda instancia es necesario definir las propiedades de los contornos, los escenarios hidrodinámicos que constituyen las condiciones de borde, y para el caso del modelo hidrodinámico, un paso temporal Δt apropiado para cada simulación.

6.2.1 Grillas de cálculo

El propósito de esta modelación consistió en evaluar las características hidrodinámicas de la franja costera que se extiende entre el Puerto de Comodoro Rivaravia y la Restinga Alf. El

área de estudio se encuentra conformada por tres bahías contiguas, claramente delimitadas por la presencia de afloramientos rocosos (restingas), pudiéndose realizar la siguiente identificación física: la bahía Sur, comprendida entre el puerto de Comodoro Rivadavia y la Restinga Coronel; una bahía Central comprendida entre la Restinga Coronel y la Restinga del Medio; y la bahía Norte comprendida entre las Restinga del Medio y la Restinga Alí.

Dada la gran extensión de la zona a modelar (una franja costera de más de 7 km) se consideró conveniente separar el estudio en dos tramos que permitieran obtener una adecuada resolución del área modelada para el análisis los procesos físicos observados en cada sector de la costa. Consecuentemente se definieron los siguientes tramos:

- **TRAMO SUR:** se extiende de sur a norte desde el puerto de Comodoro Rivadavia hasta el comienzo la Restinga del Medio, comprendiendo el área de la bahía Sur y la bahía Central;
- **TRAMO NORTE:** incluye la Restinga del Medio y se extiende hacia el norte hasta el comienzo de la Restinga Alí, comprendiendo el área de la bahía Norte.

Por consiguiente, se construyeron inicialmente un total de cuatro grillas de cálculo, dos por cada tramo, una para la propagación del oleaje y otra para la aplicación del modelo hidrodinámico. Para la construcción de las grillas de cálculo se utilizó la información batimétrica provista por la DGIP, consistente en relevamientos de detalle realizados en la zona de estudio. En las **Figuras 6.1a, 6.1b, 6.2a y 6.2b**, se presenta un esquema de dichas grillas, indicándose a continuación un resumen de la información correspondiente a cada una de las mismas.

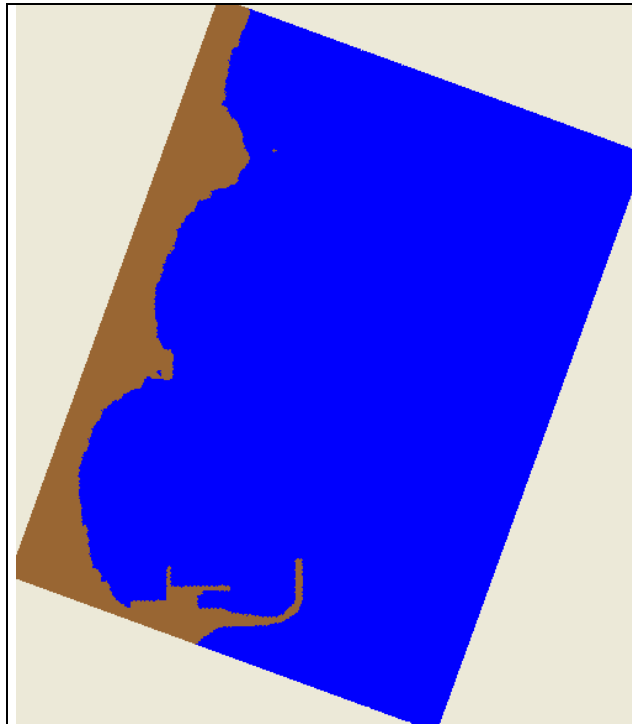


Figura 6.1a. Grilla para CMS-Wave. Tramo Sur

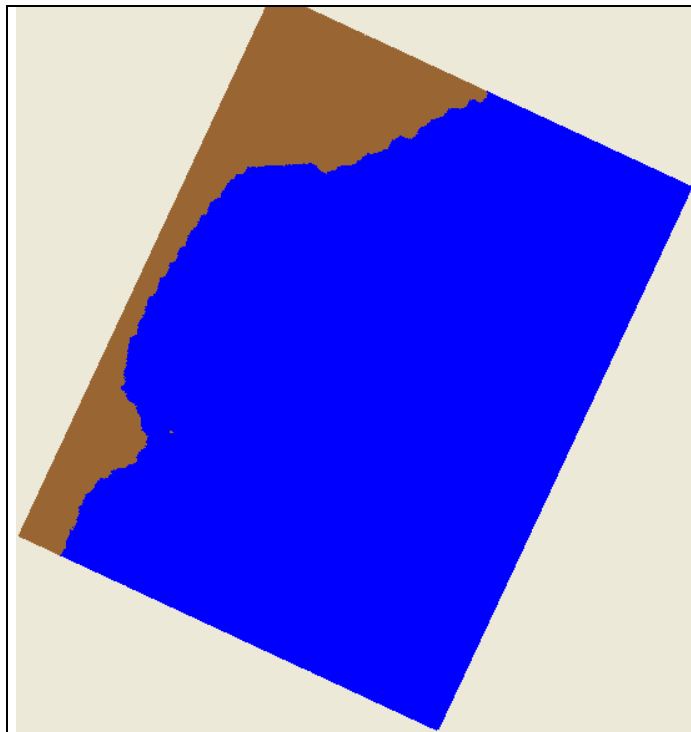


Figura 6.1b. Grilla para CMS-Wave. Tramo Norte

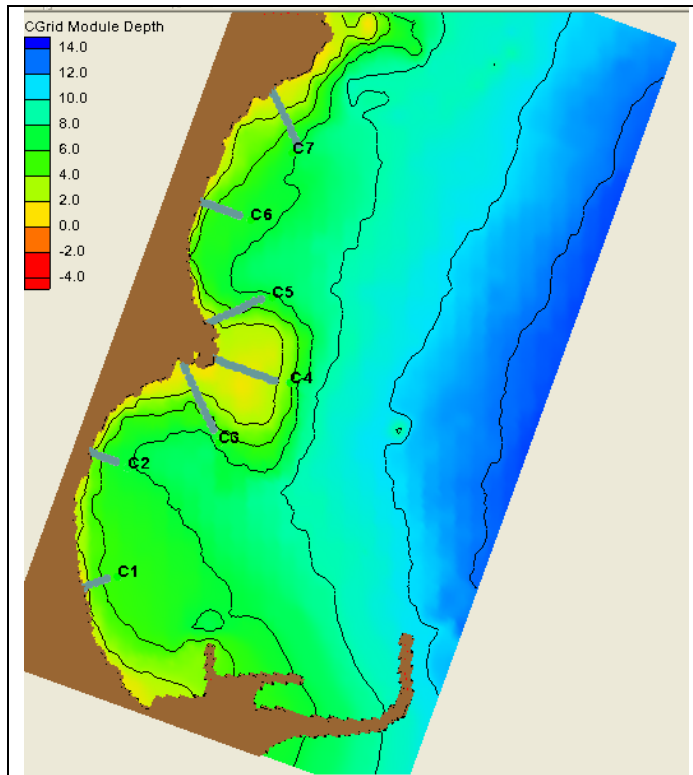


Figura 6.2a. Grilla para CMS-Flow. Tramo Sur

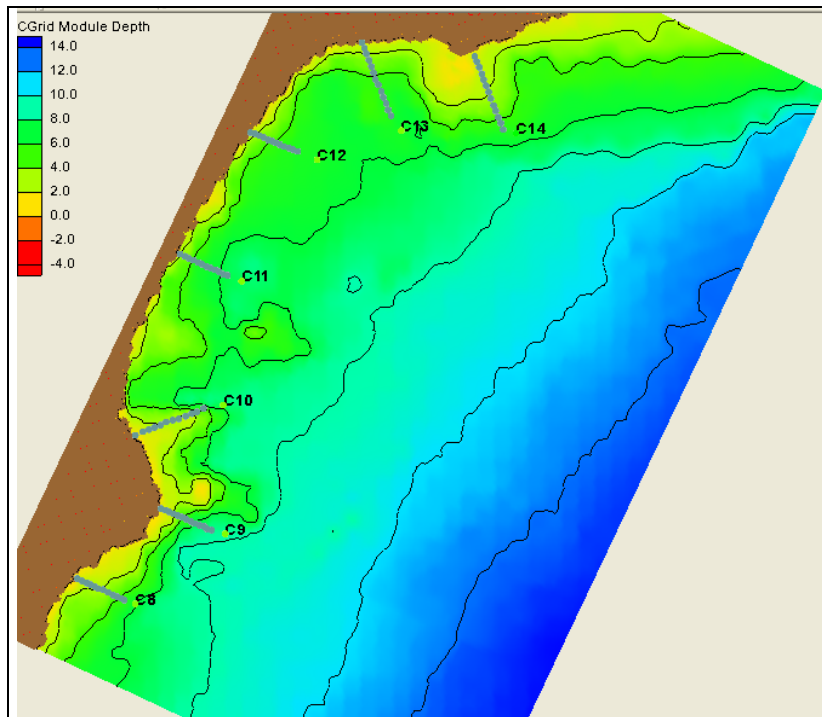


Figura 6.2b. Grilla para CMS-Flow. Tramo Norte

- **Grilla para CMS-Wave Tramo SUR:** abarca un área modelada con una superficie del orden de 12.5 km², discretizada en una estructura regular constituida por un total de 410 filas X 461 columnas, separadas entre sí por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 10 m. Contiene un total de 109.125 celdas oceánicas (activas) y 15.515 celdas terrestres. Su eje x (dirección de avance de las olas) tiene una orientación de $\alpha = 160^\circ$ medidos en sentido antihorario desde el Este.
- **Grilla para CMS-Wave Tramo NORTE:** abarca un área modelada con una superficie del orden de 14.0 km², discretizada en una estructura regular constituida por un total de 427 filas X 328 columnas, separadas entre sí por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 10 m. Contiene un total de 118.043 celdas oceánicas (activas) y 22.013 celdas terrestres. Su eje x (dirección de avance de las olas) tiene una orientación de $\alpha = 155^\circ$ medidos en sentido antihorario desde el Este.
- **Grilla para CMS-Flow Tramo SUR:** abarca un área modelada con una superficie del orden de 6.9 km², discretizada en una estructura regular constituida por un total de 181 filas X 95 columnas, separadas entre sí por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 20 m. Contiene un total de 14.726 celdas oceánicas (activas) y 2469 celdas terrestres. Su eje x (perpendicular a la orientación de la costa) tiene una orientación de $\alpha = 340^\circ$ medidos en sentido antihorario desde el Este.
- **Grilla para CMS-Flow Tramo NORTE:** abarca un área modelada con una superficie del orden de 8.1 km², discretizada en una estructura regular constituida por un total de 179 filas X 113 columnas, separadas entre sí por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 10 m. Contiene un total de 17.405 celdas oceánicas (activas) y 2.280 celdas terrestres. Su eje x (perpendicular a la orientación de la costa) tiene una orientación de $\alpha = 335^\circ$ medidos en sentido antihorario desde el Este.

Como puede apreciarse, la grillas de cálculo confeccionadas para la aplicación de CMS-Wave abarcan un área de modelación más amplia y cuentan con una mayor resolución espacial que las grillas construidas para CMS-Flow. Esto se debe a que el resultado del modelo de propagación de oleaje, que constituye el dato de entrada para el modelo hidrodinámico, debe brindar información detallada para cada una de las celdas de éste, por lo cual debe evitarse la afectación por los efectos de borde. Por otro lado, el tiempo de cálculo que demanda la resolución de las ecuaciones del modelo hidrodinámico es

considerablemente superior al del cálculo del modelo de propagación del oleaje, lo cual, impone restricciones lógicas en la discretización de las grillas de CMS-FLOW.

En las **Figuras 6.2a** y **6.2b** se indica además la ubicación de las secciones de control (denominadas C1 a C14) dispuestas a lo largo de la línea de costa para la observación puntual de los resultados de la modelación. Sobre dichas secciones se obtuvieron, para cada una de las simulaciones realizadas, valores puntuales de altura de ola y velocidad de la corriente que contribuyeron a la interpretación de los resultados.

6.2.2 Escenarios

Para la determinación de los sistemas de corrientes generados por los diferentes escenarios de oleaje analizados, fue necesario estudiar en primera instancia la propagación del oleaje desde la zona de información disponible (en una ubicación con una profundidad aproximada a los 12 m) hasta la línea de costa. Esto requirió, principalmente, la representación de los procesos de refracción, bajío y rotura del oleaje.

Cabe señalar que además de las grillas presentadas anteriormente, se han utilizado para este estudio dos grillas adicionales, una por cada tramo, para la propagación del oleaje procedente de las direcciones SSE y S. Estas son equivalentes a las anteriores pero difieren en su orientación, contando el eje x con una inclinación respecto del Este de $\alpha=90^\circ$, lo cual las hace apropiadas para la modelación del oleaje procedente de las direcciones mencionadas.

Los resultados obtenidos en el análisis previo del clima de olas en la región (**Capítulo 5 e Informe de Avance 1**) permitieron seleccionar un conjunto de escenarios de cálculo utilizados como dato de entrada para la modelación de CMS-Wave, con los cuales se pretende evaluar las condiciones hidrodinámicas generadas en la costa debido a la propagación del oleaje con diferentes valores de altura, período y dirección.

Con el propósito de obtener un panorama amplio del problema, manteniendo acotado el número de ensayos numéricos a realizar (dado el elevado tiempo de cálculo que insume cada una de las simulaciones), se seleccionaron un conjunto de situaciones que representan los escenarios de oleaje observados con mayor frecuencia para la propagación desde las distintas direcciones de interés de acuerdo con la estadística de olas presentada en el **Capítulo 5** para la posición A, Se consideraron tanto las olas generadas por vientos locales

como el oleaje oceánico (swell), siendo estos escenarios caracterizados por los siguientes valores:

Tabla 6.1. Escenarios de cálculo para el oleaje frecuente

Olas de vientos locales frecuentes			
Dirección	Hs (m)	Tp (s)	N (m)
ENE	0.75	5.0	2.6
E	1.25	6.0	2.6
ESE	1.25	6.0	2.6
SE	1.25	6.0	2.6
SSE	1.25	6.0	2.6
S	0.75	5.0	2.6

Swell frecuente			
Dirección	Hs (m)	Tp (s)	N (m)
ENE	0.7	10.0	2.6
E	0.75	12.0	2.6
ESE	0.75	12.0	2.6
SE	0.75	12.0	2.6

Para todos los casos presentados en la **Tabla 6.1** se consideró el nivel medio de la marea, correspondiente al valor de NM =2.6 m según la cota MOP. En ambos tramos de la modelación (Sur y Norte) se utilizaron los mismos escenarios de análisis.

En todos los casos, los valores presentados para Hs, Tp y dirección, corresponden a una ubicación cercana a la costa, donde la profundidad natural es del orden de los 11 m, coincidente con la zona definida como borde de la modelación de CMS-Wave desde donde se propagan las olas hacia la costa. Para representar el oleaje introducido como dato de entrada en el modelo se utilizó el espectro TMA, recomendado especialmente para la propagación en aguas poco profundas.

En una segunda instancia de análisis se evaluaron los escenarios correspondientes al oleaje extremo ($T_r=20$ años) para la dirección ESE por ser ésta la que presentaba los mayores valores de altura de ola. Los mismos son presentados en la **Tabla 6.2**:

Tabla 6.2. Escenarios de cálculo para el oleaje extremo

Escenarios extremos dirección ESE (Tr=20)			
Oleaje	Hs (m)	Tp (s)	N (m)
Viento Local	3.87	10	2.6
Swell	2.48	15	2.6

También se analizó la influencia de la variación de los niveles de la marea, con los cuales se modifica sustancialmente la posición de la rompientes del oleaje, y consecuentemente, el sistema de corrientes asociado a la misma. Para ello se utilizaron los niveles de Pleamar (NM = 5,74 m MOP) y Bajamar (Nm = -0.27 m MOP), correspondientes a los valores extremos de la marea astronómica presentados en la Tabla de Predicciones del SHN para el año 2005.

6.2.3 Estabilidad de la solución numérica

La determinación del campo de corrientes inducido por la acción de un determinado escenario de oleaje (permanente en el tiempo) requiere que la simulación tenga una duración y paso de avance temporal Δt adecuados que permitan alcanzar la convergencia de la solución.

En esta aplicación del modelo CMS-Flow se utilizó en todas las simulaciones un esquema numérico implícito (incondicionalmente estable) para la resolución de las ecuaciones, con un paso de temporal de $\Delta t = 2.5$ s y una duración total de cálculo de 6 hs.

Para evaluar la confiabilidad del resultado se dispusieron 7 puntos de control distribuidos a lo largo de la línea de costa, para los cuales se obtuvieron los valores de la velocidad de la corriente en función de la evolución del cálculo. La **Figura 6.3** muestra un ejemplo de ello, donde se observa una clara convergencia de la solución que garantiza la validez del resultado obtenido.

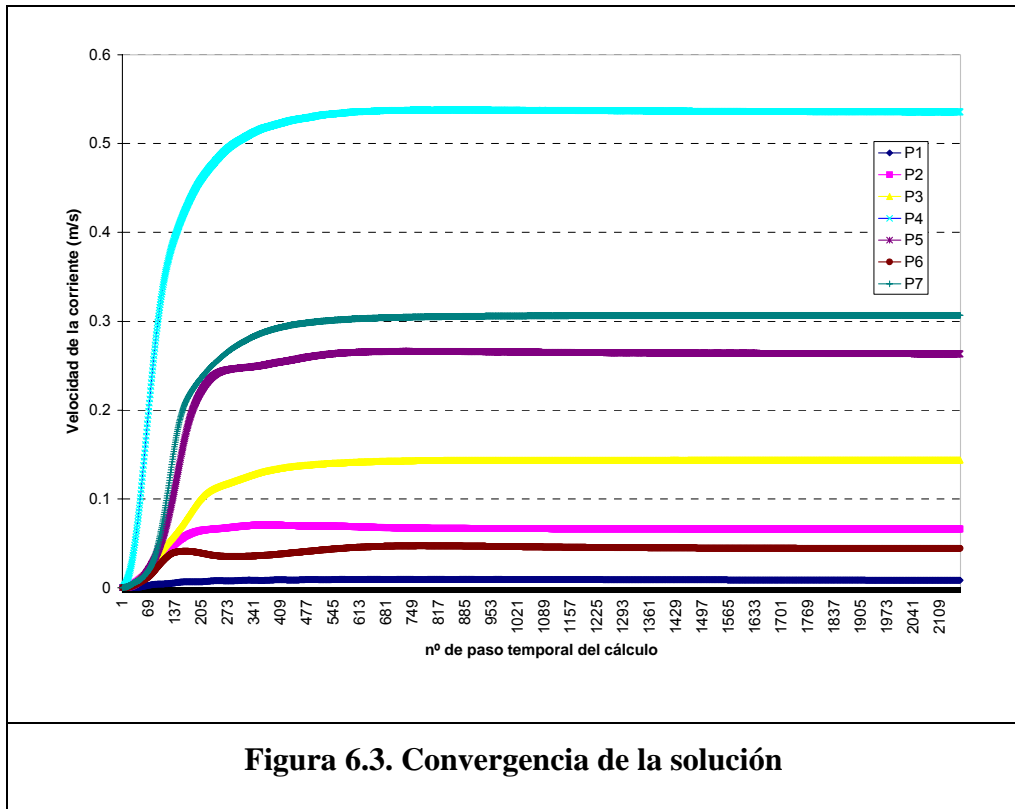


Figura 6.3. Convergencia de la solución

6.3 Resultados para la simulación en condiciones de oleaje frecuente

Dado que se trata de un conjunto de escenarios frecuentes, seleccionados en base a un análisis detallado de la estadística de olas en la región, es de esperar que la ocurrencia de los mismos abarque un gran porcentaje de tiempo durante el año, y por lo tanto, éstos constituyan un destacado aporte en la definición de la dinámica costera.

Cada uno de los escenarios presentados en el en la **Tabla 6.1** fue objeto de una simulación numérica realizada mediante la aplicación de los modelos CMS-Wave y CMS-Flow bajo las condiciones indicadas en los apartados anteriores.

Los resultados obtenidos para ambos tramos de la modelación son presentados en las figuras del **ANEXO II**, donde pueden observarse los campos de alturas de ola y de corrientes asociados a cada escenario analizado, esquematizados por líneas de isoamplitud y vectores, respectivamente.

A modo de resumen se presentan tablas con valores puntuales de alturas de ola sobre la línea de costa y corrientes inducidas por el oleaje correspondientes a las secciones de control seleccionas con ese propósito.

6.3.1 Olas locales frecuentes en el tramo Sur

El conjunto de figuras presentadas en el **ANEXO IIa)** permite obtener una amplia perspectiva sobre los aspectos más destacables referidos a la propagación del oleaje proveniente desde las distintas direcciones que puede llegar hasta la línea de costa en tramo Sur de la modelación.

Las figuras que ilustran la distribución del oleaje para los distintos escenarios muestran la variación en la orientación y altura de las olas producidas fundamentalmente por efecto de la profundidad y de la morfología costera. Los cambios de orientación de la costa y la presencia de sectores con afloramiento de restinga provocan importantes variaciones en la distribución de las alturas de ola a lo largo de la línea costera, tal como queda evidenciado en la **Tabla 6.3a**.

Las figuras que representan el campo de corrientes generadas por acción del oleaje muestran determinados patrones que resultan comunes a todos los escenarios. En todos los casos se observa que las corrientes más intensas se originan en el entorno de la Restinga Coronel y en la zona de playa ubicada al norte de la misma, donde el sentido de circulación es siempre de Norte a Sur.

Se observa además que, dependiendo de la dirección de incidencia del oleaje, puede incrementarse la tendencia a que originen corrientes de retorno (perpendiculares a la playa y con sentido hacia aguas profundas) y zonas de recirculación del flujo. Estos fenómenos aparecen fundamentalmente en las adyacencias de la restinga.

En la **Tabla 6.3.b** se presentan los valores máximos de la corriente para cada sección de control en cada uno de los escenarios analizados. El signo negativo indica que el sentido de circulación va de Norte a Sur, y el positivo lo contrario. En esta tabla se destacan como valores más altos los correspondientes a las secciones C6 y C7 (playa norte) con 0.75 m/s y C4 (restinga) con 0.56 m/s.

La misma información que se presentó en la **Tabla 6.3.b** fue utilizada para la construcción de la **Figura 6.4**, la cual permite apreciar con mayor claridad el sentido de circulación y el orden de magnitud de la corriente en cada sección para todos los escenarios. La figura muestra que en algunas secciones de control se puede invertir el sentido de la circulación con la ocurrencia escenarios distintos.

Tabla 6.3.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Dir oleaje	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
ENE	0.57	0.70	0.24	0.53	0.51	0.45	0.33
E	0.97	0.89	0.14	0.60	0.67	0.43	0.21
ESE	0.79	0.89	0.14	0.59	0.64	0.43	0.21
SE	0.48	0.89	0.14	0.57	0.58	0.43	0.21
SSE	0.09	0.24	0.14	0.37	0.21	0.50	0.20
S	0.01	0.08	0.10	0.25	0.14	0.44	0.32

Tabla 6.3.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
ENE	0.08	0.24	-0.08	-0.38	0.06	-0.24	-0.40
E	-0.31	-0.16	-0.11	-0.56	0.21	-0.75	-0.54
ESE	-0.19	-0.18	-0.12	-0.52	0.22	-0.74	-0.54
SE	0.08	0.17	-0.12	-0.46	0.22	-0.62	-0.51
SSE	-0.05	0.28	-0.13	0.10	0.26	-0.31	-0.49
S	-0.01	0.08	-0.04	-0.05	0.05	0.15	-0.25

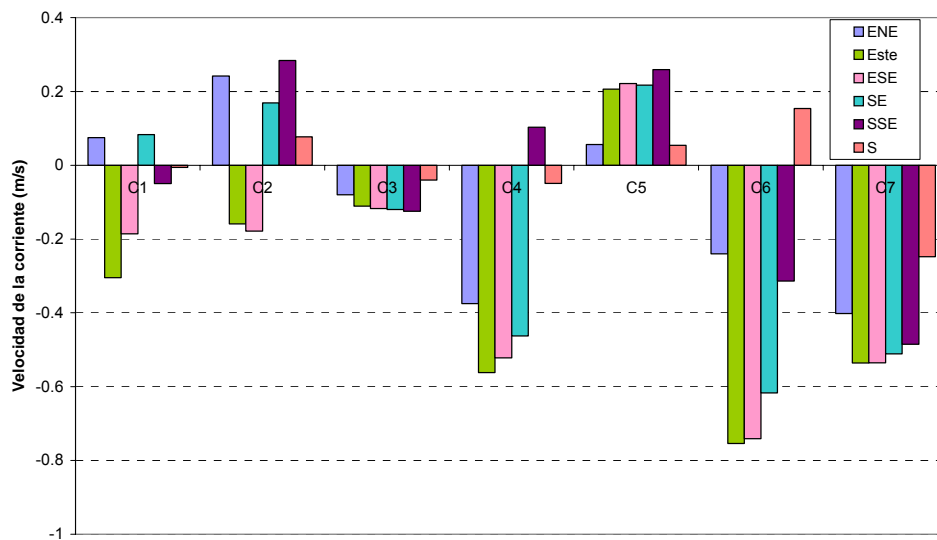


Figura 6.4. Valores de la corriente para cada sección

6.3.2 Olas oceánicas frecuentes en el tramo Sur

En el **Anexo la** se presenta un conjunto de figuras que ilustra los resultados obtenidos en la simulación de los escenarios que representan al oleaje oceánico en condiciones frecuentes.

Si bien las olas que propagan desde aguas profundas con alturas menores que las generadas por los vientos locales pueden llegar a la costa con valores similares, tal como queda evidenciado por los valores presentados en la **Tabla 6.4.a**.

La configuración de los campos de corrientes obtenidos para este conjunto de simulaciones mantiene los mismos patrones de circulación observados para las corrientes generadas por las olas locales.

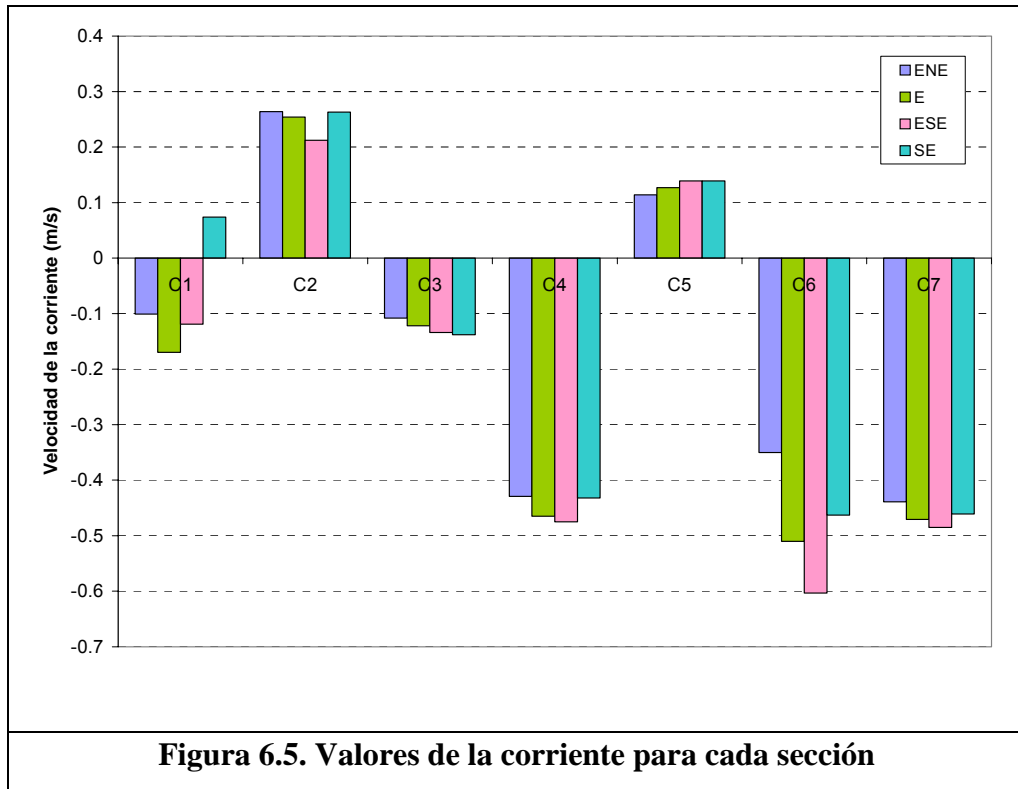
En términos generales, la corrientes son menos intensas que para la situación de oleaje local, alcanzando un máximo de 0.6 m/s en la sección C6. Los valores presentados en la **Tabla 6.4.b** ponen de manifiesto una mayor uniformidad en la distribución de valores de intensidad de la corriente y en el sentido de la misma para las distintas secciones de control. Esto queda evidenciado con mayor claridad en el gráfico de barras presentado en la **Figura 6.5**. En este sentido, debe advertirse que existe una solo caso para el cual se invierte el sentido de la circulación en una sección (C1) para los diferentes escenarios analizados.

Tabla 6.4.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
ENE	0.67	0.79	0.26	0.66	0.54	0.45	0.33
E	0.73	0.89	0.24	0.60	0.56	0.45	0.33
ESE	0.65	0.89	0.24	0.61	0.55	0.81	0.33
SE	0.35	0.89	0.24	0.59	0.51	0.45	0.33

Tabla 6.4.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
ENE	-0.10	0.26	-0.11	-0.43	0.11	-0.35	-0.44
E	-0.17	0.25	-0.12	-0.47	0.13	-0.51	-0.47
ESE	-0.12	0.21	-0.13	-0.48	0.14	-0.60	-0.49
SE	0.07	0.26	-0.14	-0.43	0.14	-0.46	-0.46



6.3.3 Olas locales frecuentes en tramo Norte

El conjunto de figuras presentadas en el **ANEXO Ib)** permite obtener una amplia perspectiva sobre los aspectos más destacables referidos a la propagación del oleaje proveniente desde las distintas direcciones que puede llegar hasta la línea de costa en tramo Norte de la modelación.

Analizando los valores observados en la **Tabla 6.5.a**, pueden inferirse que, en líneas generales, las olas frecuentes llegan a la costa con mayor altura que las del tramo Sur.

En este tramo también existe un conjunto de patrones comunes a todos los escenarios para el campo de corrientes, aunque algo menos generalizado debido a la mayor exposición de la costa al oleaje proveniente desde el SSE y el S.

Los valores de intensidad de la corriente (**Tabla 6.5.b**) son inferiores a los del tramo Sur, destacándose la zona sur de la Restinga del Medio (C8) con un máximo de 0.52 m/s, y el sector más expuesto de la playa (C11 y C12) con un máximo de 0.56 m/s.

Debido a la influencia de las olas del SSE y del S, se hace más notoria la inversión del sentido de circulación para algunas secciones (C9, C10, y C11), tal como se aprecia con claridad en la **Figura 6.6**.

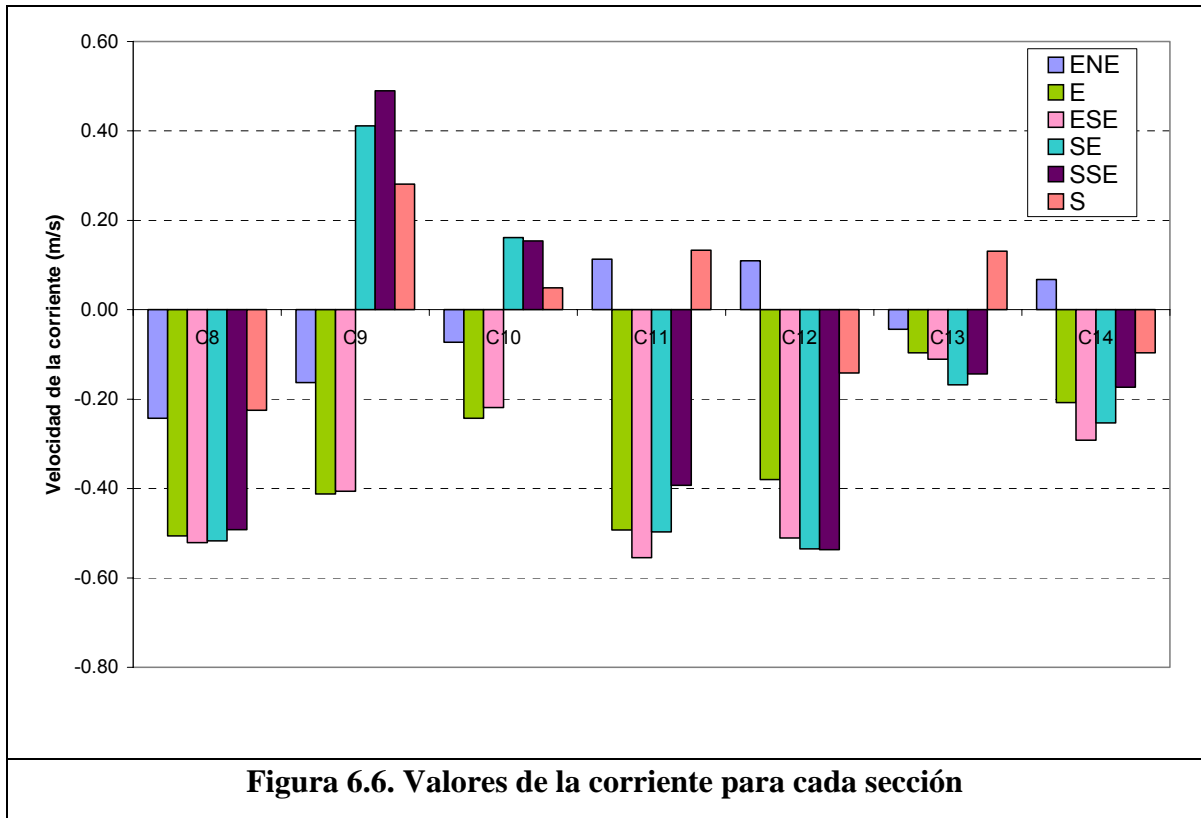
Las figuras del anexo muestran además una zona donde pueden generarse importantes corrientes de retorno y flujos de recirculación, ubicada al norte de la Restinga del medio (C10).

Tabla 6.5.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
ENE	0.49	0.48	0.50	0.40	0.33	0.15	0.31
E	0.84	0.65	0.48	0.88	0.87	0.39	0.61
ESE	0.89	0.65	0.48	1.02	1.04	0.63	0.62
SE	0.90	0.64	0.48	1.03	1.12	0.85	0.62
SSE	0.89	0.68	0.39	0.91	1.07	0.98	0.63
S	0.51	0.52	0.25	0.40	0.58	0.68	0.58

Tabla 6.5.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
ENE	-0.24	-0.16	-0.07	0.11	0.11	-0.04	0.07
E	-0.51	-0.41	-0.24	-0.49	-0.38	-0.10	-0.21
ESE	-0.52	-0.41	-0.22	-0.56	-0.51	-0.11	-0.29
SE	-0.52	0.41	0.16	-0.50	-0.54	-0.17	-0.25
SSE	-0.49	0.49	0.15	-0.39	-0.54	-0.14	-0.17
S	-0.23	0.28	0.05	0.13	-0.14	0.13	-0.10



6.3.4 Olas oceánicas frecuentes en tramo Norte

Tanto los valores de altura de ola que llega a línea de costa (**Tabla 6.6.a**) como la velocidad de las corrientes generadas (**Tabla 6.6.b**), resultan inferiores a los observados para el oleaje generado por vientos locales para este tramo de la costa.

Analizando el gráfico de barras presentado en la **Figura 6.7**, puede observarse que, de igual modo que para el tramo Sur, el oleaje oceánico genera una distribución de valores de intensidad y sentido de circulación con mayor uniformidad que el correspondiente al oleaje local para todas las secciones de control.

Solamente se observa un cambio en el sentido de circulación en dos secciones de la costa (C9 y C 10), y esto ocurre para el escenario SE.

Tabla 6.6.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
E	0.76	0.65	0.51	0.66	0.75	0.24	0.56
ESE	0.84	0.65	0.51	0.79	0.96	0.42	0.62
SE	0.89	0.65	0.51	0.82	0.97	0.69	0.62

Tabla 6.6.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
E	-0.43	-0.29	-0.14	-0.31	-0.3	-0.11	-0.12
ESE	-0.46	-0.29	-0.13	-0.34	-0.47	-0.09	-0.2
SE	-0.46	0.32	0.08	-0.29	-0.48	-0.12	-0.19

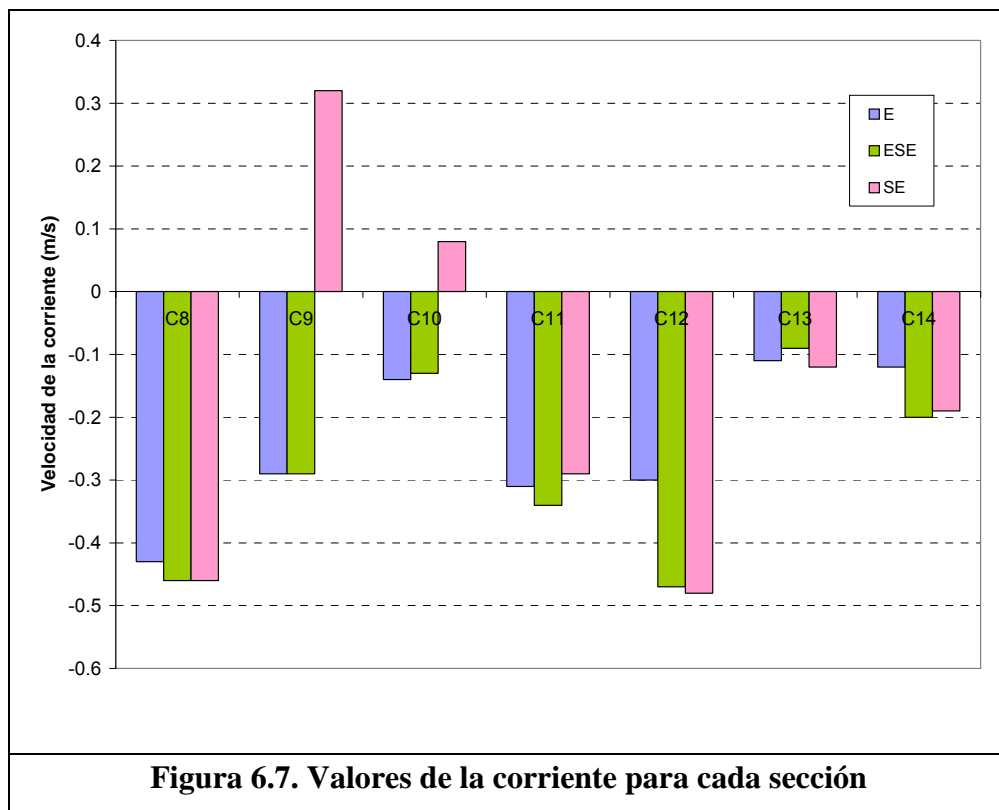


Figura 6.7. Valores de la corriente para cada sección

6.4 Influencia de la variación del nivel del mar

Habiéndose analizado un amplio conjunto de escenarios que representan el oleaje frecuente para la zona de estudio, considerándose en todos los casos el nivel medio del mar definido por **NM=2.62 MOP**, resulta de particular interés evaluar las condiciones hidrodinámicas generadas para distintos estados de la marea, dado que la misma presenta importantes valores de amplitud en la región.

Para ello, se utilizaron los niveles extremos para la marea astronómica en el Puerto de Comodoro Rivadavia presentados en la Tabla de Predicción de la Marea del año 2005 del SHN, definidos como **Bajamar N=-0.27 MOP** y **Pleamar N=5,74 MOP**.

Para este análisis se seleccionó el escenario correspondiente al oleaje frecuente del ESE, tanto para la condición de olas locales como para olas oceánicas. Se realizó un conjunto de simulaciones numéricas con idénticas características que en el apartado anterior para ambos tramos de la modelación.

6.4.1 Bajamar en el tramo SUR

La marcada bajante respecto del nivel medio modifica sustancialmente la ubicación de las zonas de rompiente y, consecuentemente, las características del campo de corrientes generado por la misma.

Los valores de las alturas de ola (**Tabla 6.7.a**) tanto locales como oceánicas, que llegan hasta la costa se reducen notablemente respecto a los observados con el nivel medio de la marea.

El sistema de corrientes generado sigue teniendo un claro sentido de circulación de norte a sur, con valores levemente inferiores a los que se obtuvieron para el nivel medio (**Tabla 6.7.b**), con máximos de 0.65 m/s y 0.57 m/s para olas locales y oceánicas, respectivamente.

La zonas donde se observan las corrientes más intensas corresponde al pie de la Restinga Coronel (C4) y al sector de la playa (C6), donde pueden observarse corrientes longitudinales de importancia.

Tabla 6.7.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
H viento	0.59	0.54	0.10	0.23	0.28	0.29	0.65
Swell	0.59	0.43	0.15	0.39	0.38	0.40	0.65

Tabla 6.7.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
H viento	-0.16	-0.20	0.06	-0.65	0.15	-0.51	-0.37
Swell	-0.10	-0.13	-0.13	-0.57	0.14	-0.46	-0.28

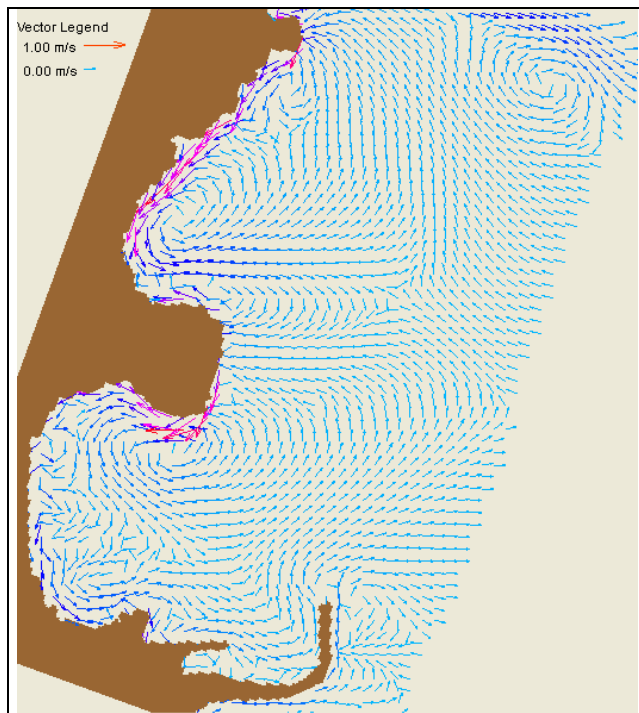
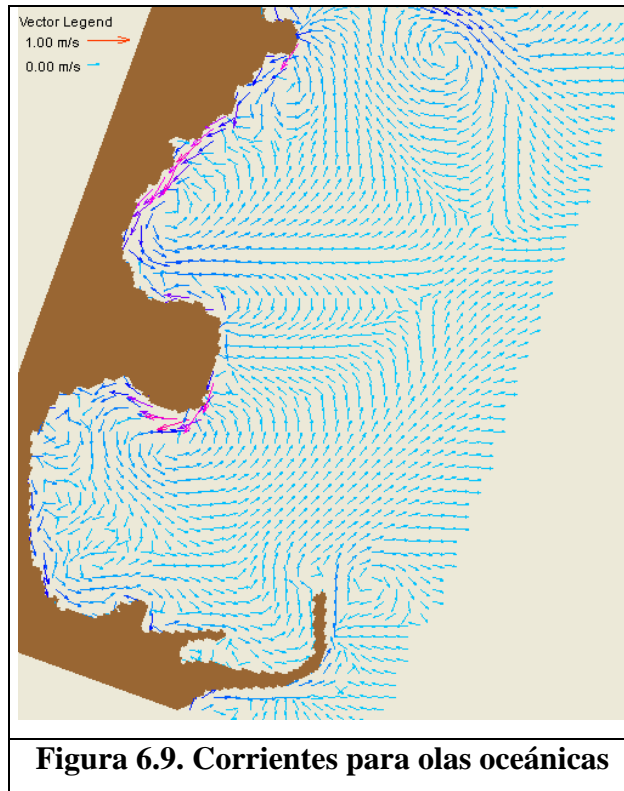


Figura 6.8. Corrientes para olas locales



6.4.2 Pleamar en el tramo Sur

En estas condiciones las olas tiene mayor capacidad de propagación y llegan a la costa con mucha mayor altura que para el nivel medio y la bajamar (**Tabla 6.8.a**).

Por el contrario, el sistema de corrientes de circulación que se genera en la costa es menos marcado que en los casos de bajamar y nivel medio. Las intensidades superiores (**Tabla 6.8.b**) se reducen a valores de 0.53 m/s y 0.50 m/s para olas locales y oceánicas, respectivamente.

Por otra parte, se reducen notablemente los efectos generados por la presencia de la Restinga Coronel. Los valores de intensidad de la corriente en ese sector disminuyen en comparación con la bajamar y el nivel medio, y las corrientes de retorno tienen poca notoriedad.

Tabla 6.8.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

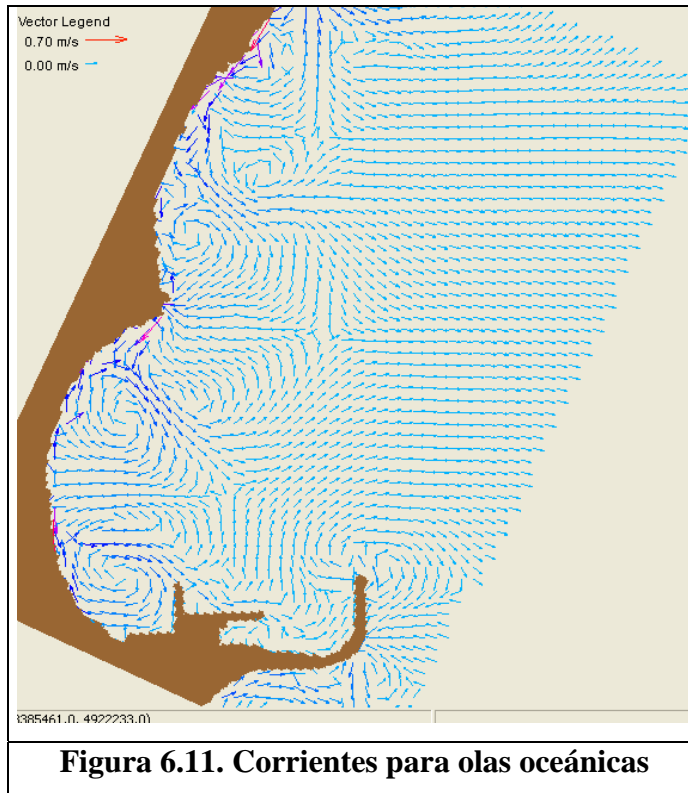
Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
H viento	0.72	0.75	1.34	1.50	1.33	1.13	1.23
Swell	0.57	0.60	1.29	1.35	1.08	0.92	1.04

Tabla 6.8.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
H viento	-0.24	-0.13	-0.20	-0.53	-0.15	-0.29	-0.49
Swell	-0.17	0.19	-0.20	-0.50	0.12	-0.18	-0.11



Figura 6.10. Corrientes para olas locales



6.4.3 Bajamar en el tramo Norte

Los valores de las alturas de ola, tanto locales como oceánicas, que llegan hasta la costa se reducen respecto de los observados con el nivel medio de la marea (**Tabla 6.9.a**).

El sistema de corrientes generado por la rompiente del oleaje presenta cambios continuos en la dirección de circulación debido a la irregularidad de la línea de costa. Si bien se mantiene una clara tendencia a la circulación en el sentido norte-sur, existen zonas donde se observan corrientes de retorno con intensidades considerables, destacándose el sector de la restinga Del Medio.

En este caso, los valores de intensidad de la corriente (**Tabla 6.9.b**) pueden superar a los que se obtuvieron para el nivel medio, con máximos de 0.71 m/s y 0.60 m/s para olas locales y oceánicas, respectivamente. Estos valores corresponden al sector de la Restinga del medio (C9).

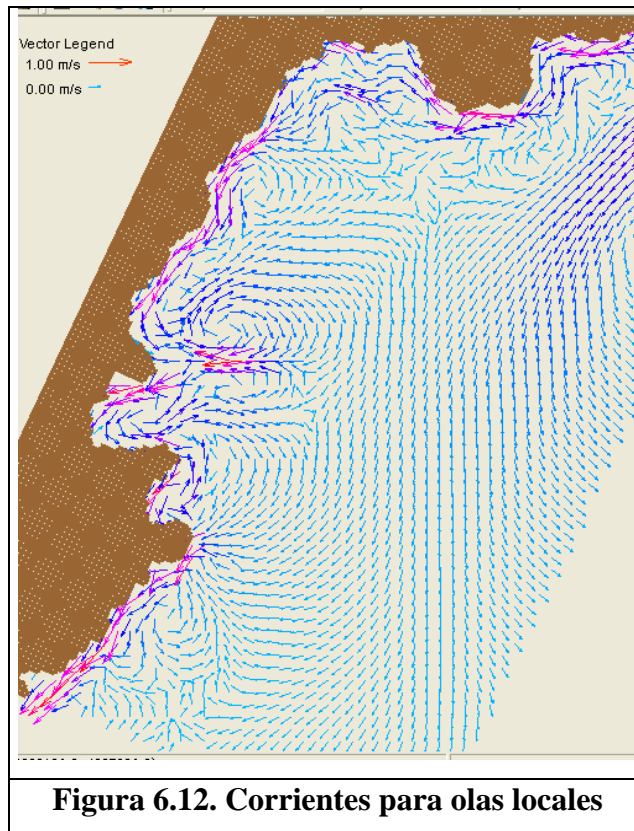
La comparación entre las **Figuras 6.12** y **6.13** señala claras diferencias entre los campos de corrientes generados por el oleaje local y el oleaje oceánico, respectivamente.

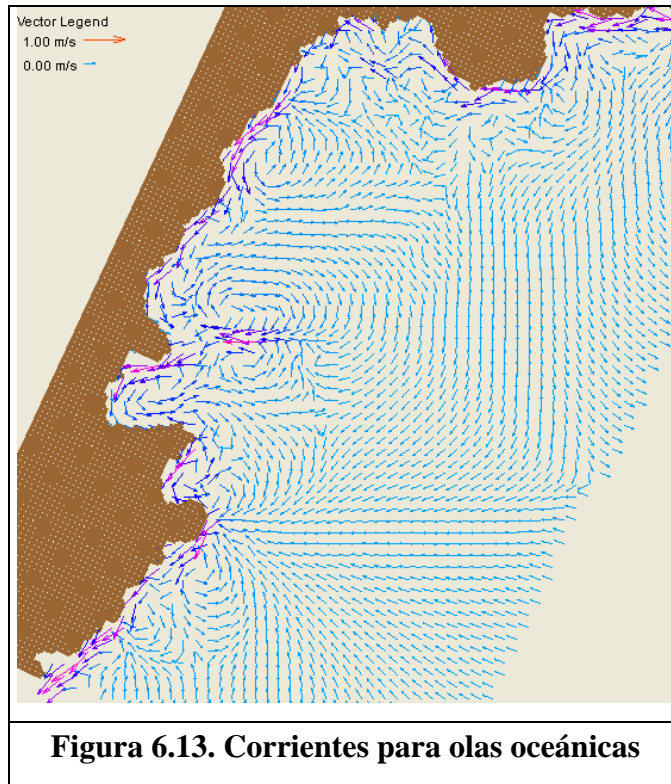
Tabla 6.9.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
H viento	0.60	0.23	0.51	0.79	0.29	0.18	0.44
Swell	0.60	0.63	0.36	0.61	0.38	0.29	0.47

Tabla 6.9.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
H viento	-0.51	-0.71	-0.41	-0.51	-0.39	0.25	-0.15
Swell	-0.44	-0.60	-0.32	-0.35	-0.36	0.22	-0.13





6.4.4 Pleamar el tramo Norte

Como contrapunto a lo que ocurre con la Bajamar, el ascenso del nivel de la marea origina una línea de costa con una orientación más uniforme, lo cual permite que se establezca un sistema de circulación bien definido y con mayor continuidad a lo largo de todo el tramo costero.

Las olas poseen mayor capacidad de penetración y pueden llegar hasta la línea de costa con alturas sustancialmente mayores que las observadas para la condición de nivel medio (**Tabla 6.10.a**).

La intensidad de la corriente y la presencia de zonas de recirculación en el torno de Restinga Del Medio se reducen notablemente en comparación con la condición de bajamar.

En este caso, las corrientes de mayor intensidad se presentan en el tramo central de la zona de playa (sección C12), donde pueden observarse valores de 0.64 m/s y 0.52 m/s para olas locales y oceánicas, respectivamente (**Tabla 6.10.b**).

Tabla 6.10.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

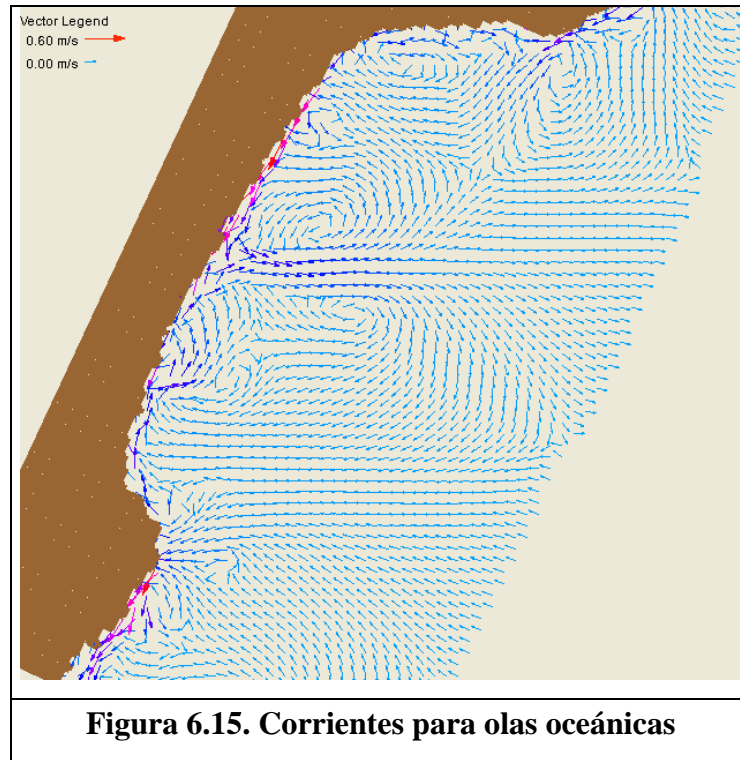
Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
H viento	1.12	1.07	1.21	0.99	0.88	0.84	0.88
Swell	0.97	1.04	1.00	0.92	0.79	0.63	0.74

Tabla 6.10.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
H viento	-0.29	-0.45	0.12	-0.59	-0.64	0.06	-0.07
Swell	-0.22	-0.37	0.11	0.18	-0.52	0.07	-0.08



Figura 6.14. Corrientes para olas locales



6.5 Resultados para condiciones de oleaje extremo

En esta sección se analizan las condiciones hidrodinámicas generadas en la zona de estudio por la ocurrencia de eventos extremos de oleaje.

Específicamente, se estudia la propagación de olas locales y oceánicas, con alturas asociadas a períodos de retorno de 20 años (**Tabla 6.2**), y procedencia del sector ESE. Se consideran además dos estados de marea diferentes: de nivel medio y pleamar.

Los resultados de las simulaciones realizadas se presentan en tablas con valores puntuales de altura de ola y velocidad de la corriente para cada una de las secciones de control analizadas. Se presentan también figuras que permiten apreciar las características del campo de corrientes inducidas por el oleaje para cada caso.

6.5.1 Olas locales extremas en el tramo Sur

Las olas llegan hasta la línea de costa con importantes alturas (**Tabla 6.11.a**), fundamentalmente para la situación de pleamar donde la posición de la rompiente avanza considerablemente sobre la playa. El tramo más expuesto corresponde a la sección C6, en el sector de playa al norte de la Restinga Coronel.

Las corrientes más intensas se observan también en la zona de la sección C6 (**Tabla 6.11.a**). Comparando estos valores con los obtenidos para el análisis de condiciones frecuentes del oleaje, se deduce que en este caso aumentan en un orden de 2 y 3 veces para el nivel medio y para la condición de pleamar, respectivamente.

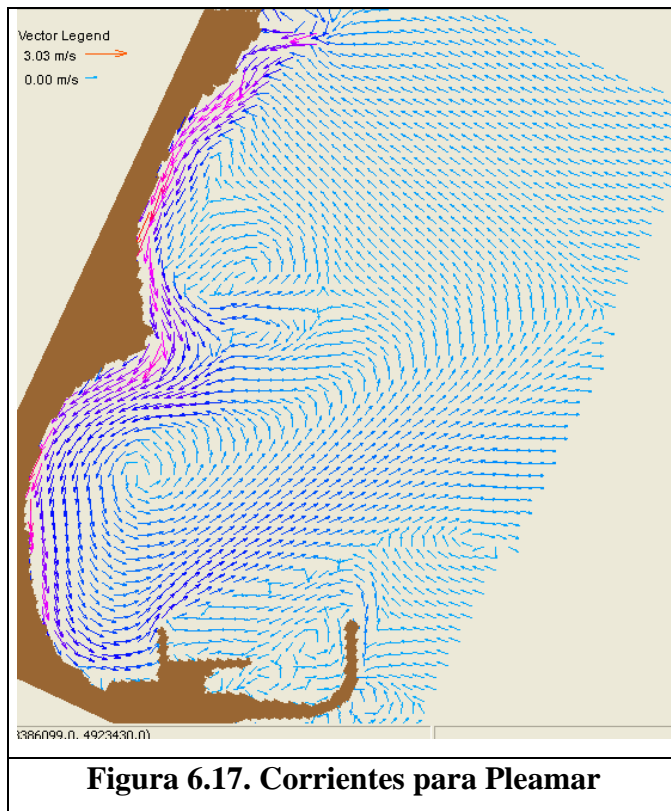
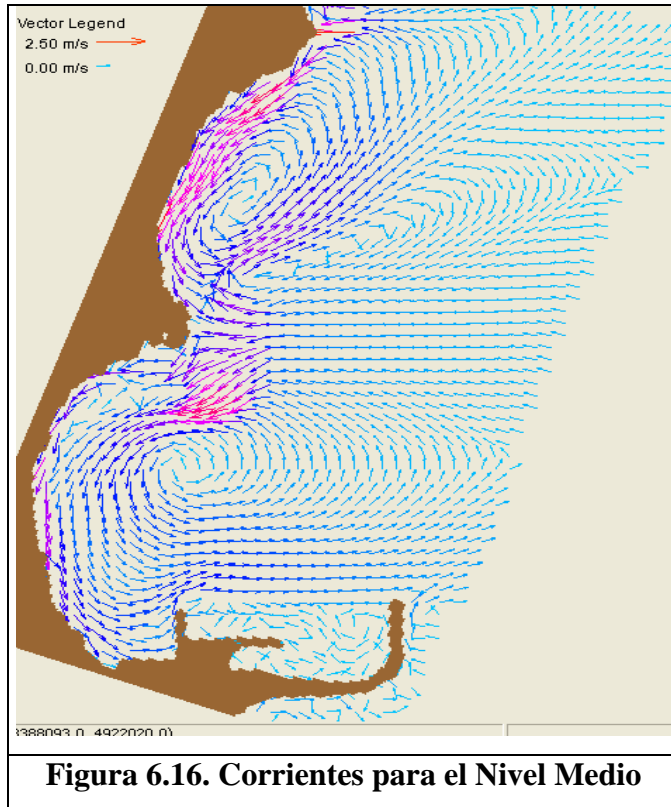
Las **Figuras 6.16 y 6.17** dan cuenta de la generación de importantes sistemas de corrientes litorales con sentido de circulación norte-sur, parcialmente interrumpido por la presencia de la restinga, la cual puede inducir la generación de zonas de recirculación para la condición de nivel medio.

Tabla 6.11.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de Referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hv NM	1.73	1.72	0.15	0.24	1.52	2.22	0.20
Hv Pleamar	1.65	2.15	1.80	1.70	1.88	3.10	1.91

Tabla 6.11.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hv NM	-1.26	-1.11	-0.26	-1.01	0.66	-1.57	-0.99
Hv Pleamar	-1.50	-2.28	-0.71	-1.47	-1.37	-2.35	-1.18



6.5.2 Olas oceánicas extremas en el tramo Sur

Las olas oceánicas también son capaces de alcanzar la línea de costa con importantes alturas (**Tabla 6.12.a**), aunque lo hacen con valores inferiores a los de las olas locales. El sector más expuesto en este caso también es el tramo de playa de la sección C6.

La intensidad de las corrientes es levemente inferior al de eventos extremos de olas locales (**Tabla 6.12.b**), pero puede triplicar los valores obtenidos para la situación de oleaje frecuente.

Para la condición de pleamar se establece un sistema de corrientes litorales que presenta una marcada uniformidad extendiéndose a lo largo de todo el tramo costero. Para el nivel medio, en cambio, la presencia de la restinga interrumpe el sistema de corrientes generando una zona con fuerte recirculación (**Figuras 6.18 y 6.19**).

Tabla 6.12.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hsw NM	1.71	1.56	0.25	0.38	1.46	2.27	0.31
Hsw Pleamar	1.71	1.80	1.81	1.76	1.89	2.76	2.12

Tabla 6.12.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Hsw NM	-1.12	-1.01	-0.07	-0.91	0.58	-1.54	-0.92
Hsw Pleamar	-1.28	-1.89	-0.51	-0.94	-0.97	-1.86	-0.98

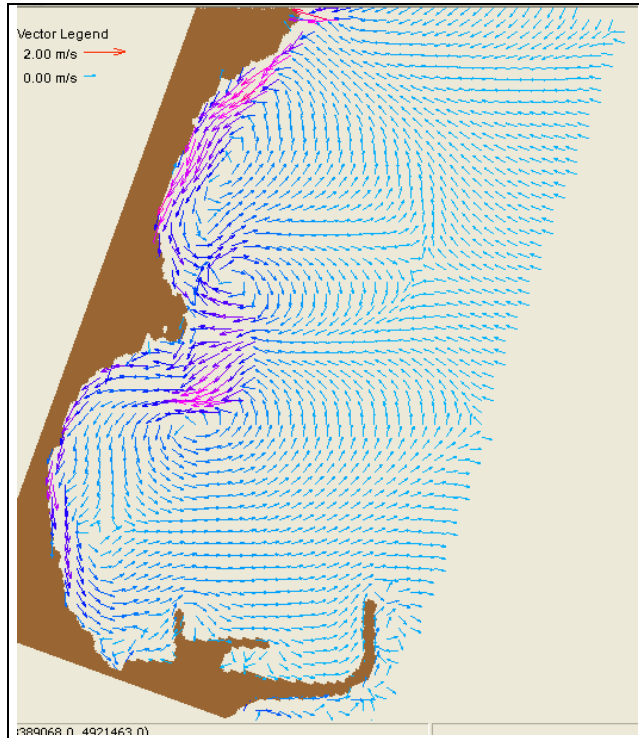


Figura 6.18. Corrientes para el Nivel Medio

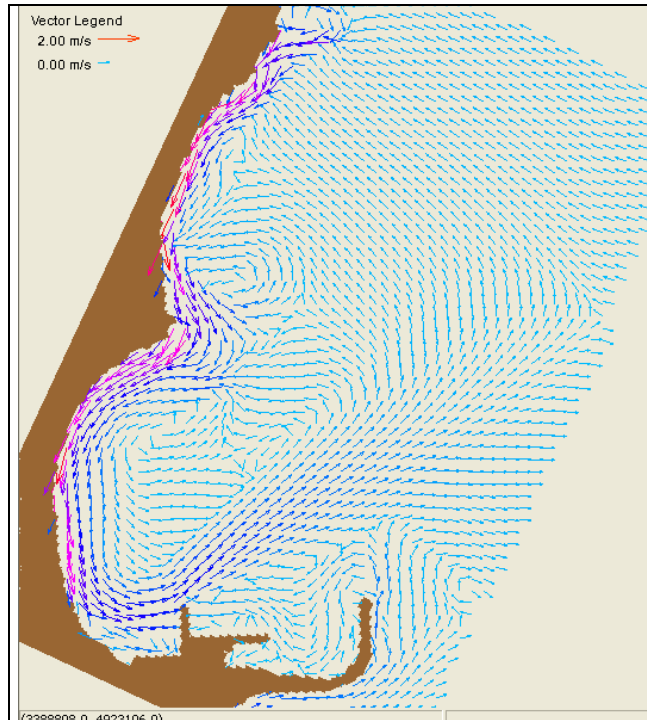


Figura 6.19. Corrientes para Pleamar

6.5.3 Olas locales extremas en el tramo Norte

Las alturas de olas presentan valores elevados (**Tabla 6.13.a**) pero resultan inferiores a los correspondientes al tramo Sur debido a que este sector de la costa se encuentra precedido por playas con mayor potencial de disipación del oleaje.

Las corrientes más intensas corresponden a la zona central de la playa (C11 y 12) y son del orden de 3 veces mayores a las obtenidas para el oleaje frecuente (**Tabla 6.13.b**).

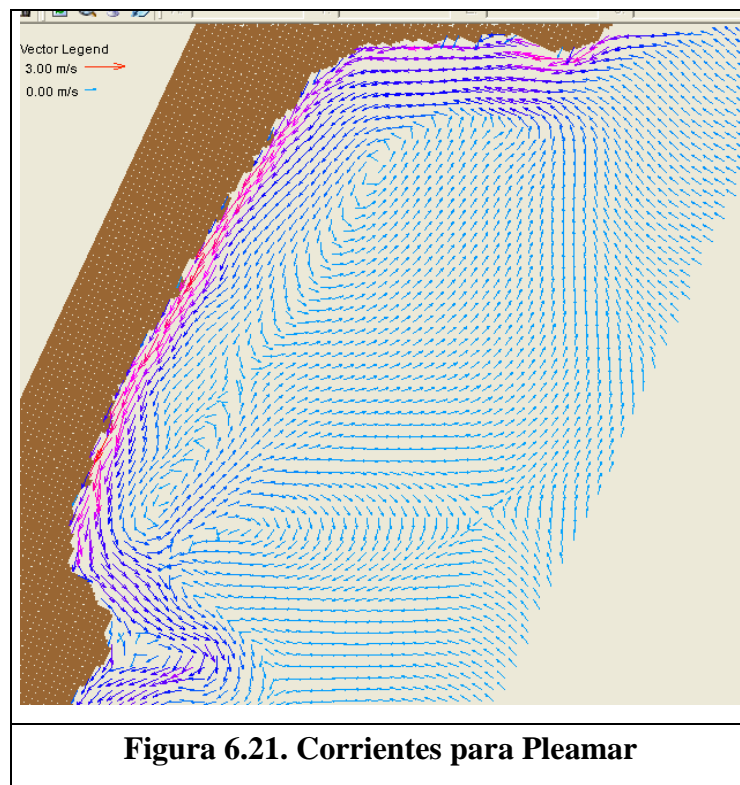
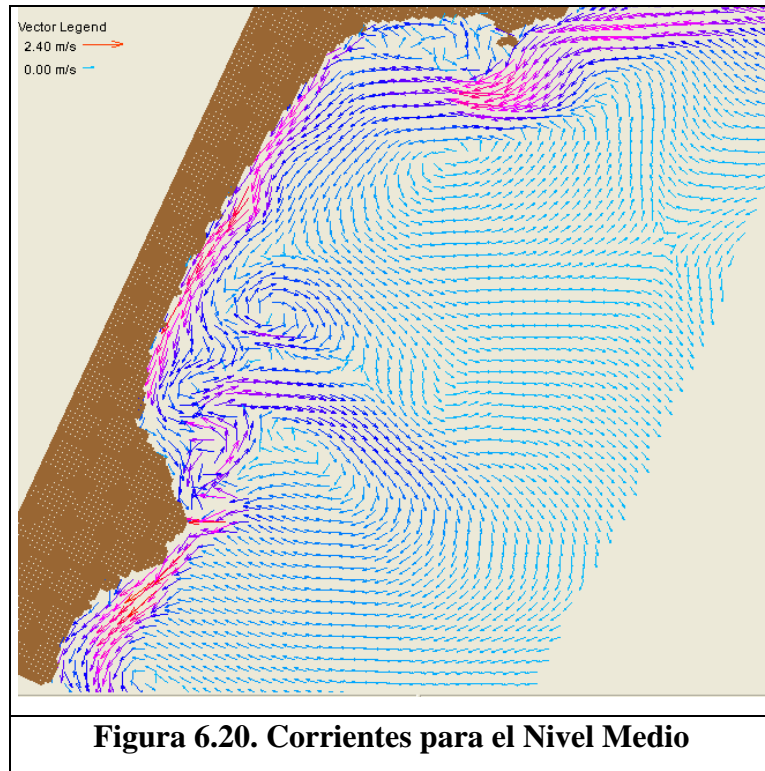
Para la condición de nivel medio puede observarse la presencia de importantes corrientes de retorno que provocan con marcada recirculación en la zona norte de la Restinga del Medio. Por el contrario, en la condición de pleamar se establece un flujo de corrientes litorales en sentido norte-sur que muestra un importante grado de uniformidad (**Figuras 6.20 y 6.21**).

Tabla 6.13.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Hv NM	0.52	0.28	0.16	1.71	0.81	0.81	0.23
Hv Pleamar	1.98	1.31	2.17	1.15	1.50	1.06	1.53

Tabla 6.13.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Hv NM	-1.14	-0.94	-0.42	-1.64	-1.03	0.17	-1.14
Hv Pleamar	-0.73	-0.49	-0.91	-1.86	-1.93	-0.48	0.35



6.5.4 Olas oceánicas extremas en el tramo Norte

Las alturas de ola más elevadas se presentan al norte de la Restinga del Medio y en la zona central de la playa (C10 y 11), con valores del mismo orden que las correspondientes al oleaje local (**Tabla 6.14.a**).

Las corrientes más intensas se observa en el mismo sector y son levemente inferiores a las generadas por las olas de viento local (**Tabla 6.14.b**).

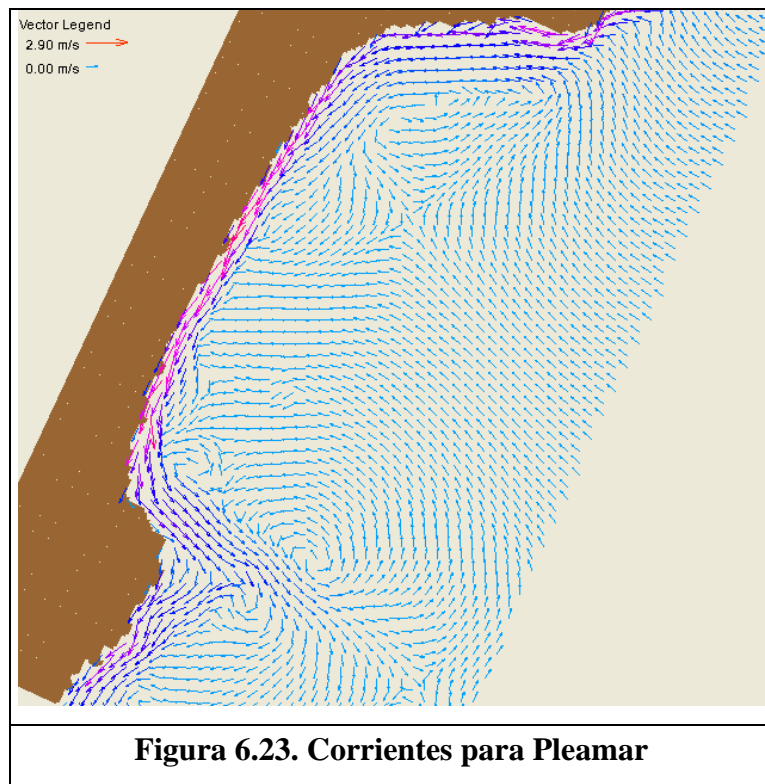
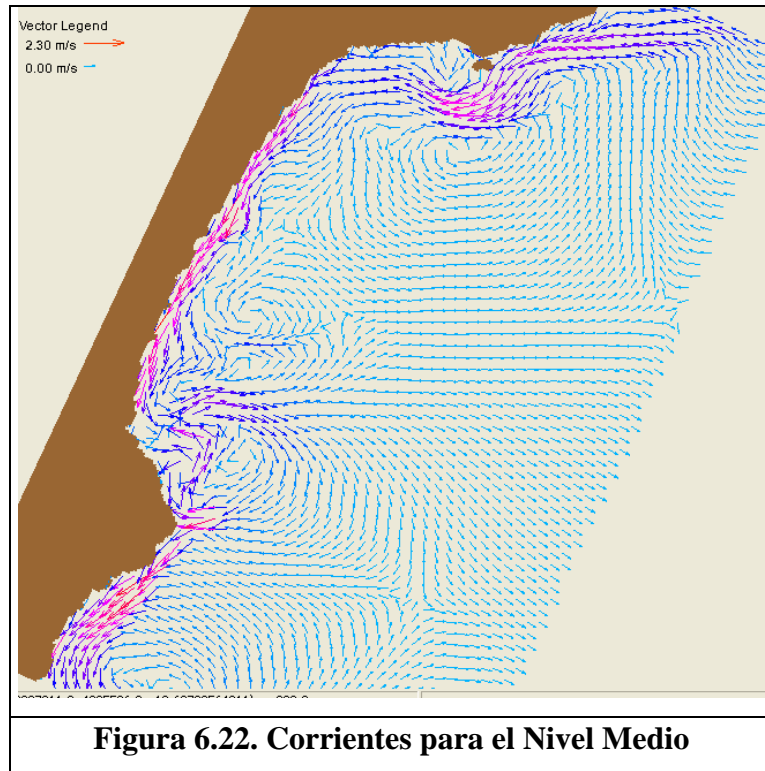
Para la condición de nivel medio aparecen corrientes de retorno de relativa importancia en la zona norte de la Restinga del medio, aunque en este caso resultan inferiores a las generadas por el oleaje local. Para la situación de pleamar se repite la presencia de un flujo de corrientes litorales fuertemente desarrollado con sentido de circulación de norte a sur (**Figuras 6.22 y 6.23**).

Tabla 6.14.a. Resumen de resultados para la modelación del oleaje

Escenario	Valores de referencia para Hs (m) sobre la línea de costa						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Hsw NM	0.81	0.44	0.25	1.72	1.15	0.92	0.37
Hsw Pleamar	1.98	1.44	2.17	2.33	2.32	1.35	1.61

Tabla 6.14.b. Resumen de resultados para la modelación de las corrientes

Escenario	Valores máximos de la corriente (m/s) para cada perfil						
	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Hsw NM	-0.95	-0.87	0.39	-1.57	-1.03	-0.09	-0.94
Hsw Pleamar	-0.65	-0.69	-0.89	-1.50	-1.89	-0.38	0.33



6.6 Corrientes generadas por la marea astronómica

Independientemente de los procesos físicos generados por la propagación del oleaje, otro aspecto de interés para este estudio fue el análisis de los sistemas de corrientes generados por acción de la marea astronómica.

En efecto, dada la importancia de la amplitud de la onda de marea observada en la zona del puerto de Comodoro Rivadavia se planteó la necesidad de evaluar la magnitud de las corrientes generadas durante los ciclos de bajantes y crecientes de la marea.

Para ello, se seleccionó un escenario para la variación del nivel del mar, extraído de la Tabla de Mareas 2005 del SHN, correspondiente a uno de los eventos con mayor amplitud en el año, Los niveles asociados a los estados de pleamar y bajamar se encuentran referidos al plano MOP y son presentados en la **Tabla 6.15**.

Tabla 6.15 Onda de marea para el Puerto de Comodoro Rivadavia		
Día	Hora	NM (m)
20 de Sep	00:07	0,17
	06:08	5,51
	12:39	-0,22
	18:37	5,67
21 de Sep	00:57	-0,01

La modelación se realizó mediante la implementación de CMS-Flow, utilizando la misma grilla de cálculo sobre la cual se desarrollaron las simulaciones anteriores para el tramo Sur de la franja costera. En este caso, se utilizó como forzante para el modelo una onda de marea obtenida por la interpolación de una función cosenoidal para los valores presentados en la **Tabla 6.15**, empleando un esquema de resolución explícito con paso temporal de $\Delta t=2.5$ s. y una duración total para la simulación de 25 hs.

Como resultado se obtuvieron las series temporales de elevación de la superficie libre y valores de intensidad de la corriente (**Figuras 6.24 y 6.25**, respectivamente) para siete puntos de control distribuidos a lo largo de la costa en el tramo Sur del área de modelación.

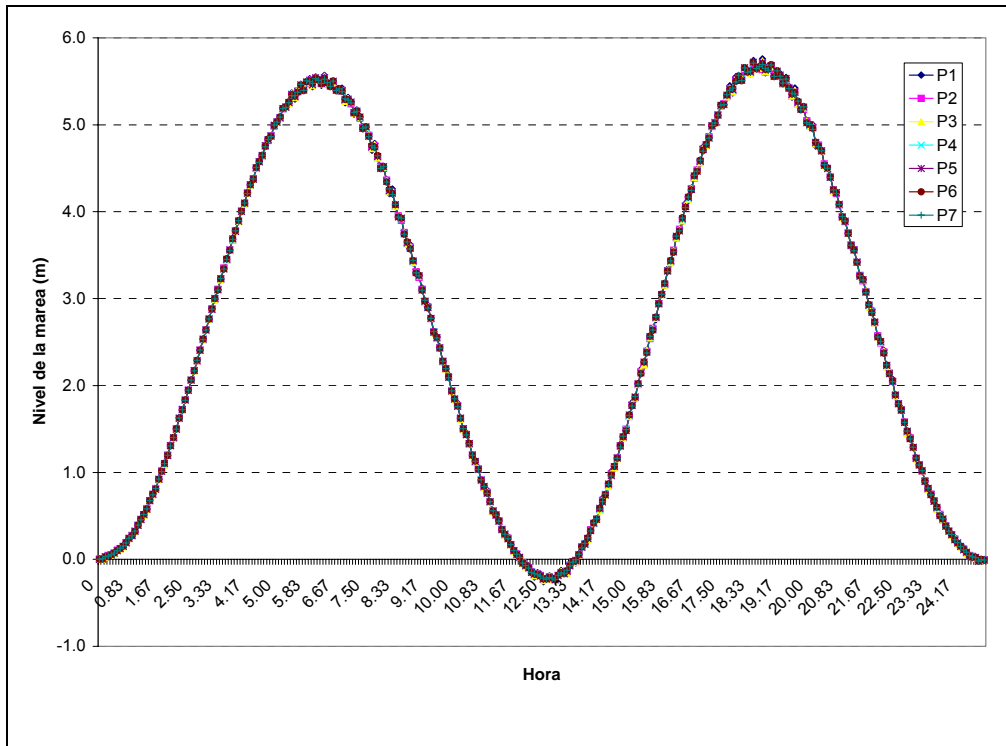


Figura 6.24. Onda de marea modelada en 7 puntos costeros

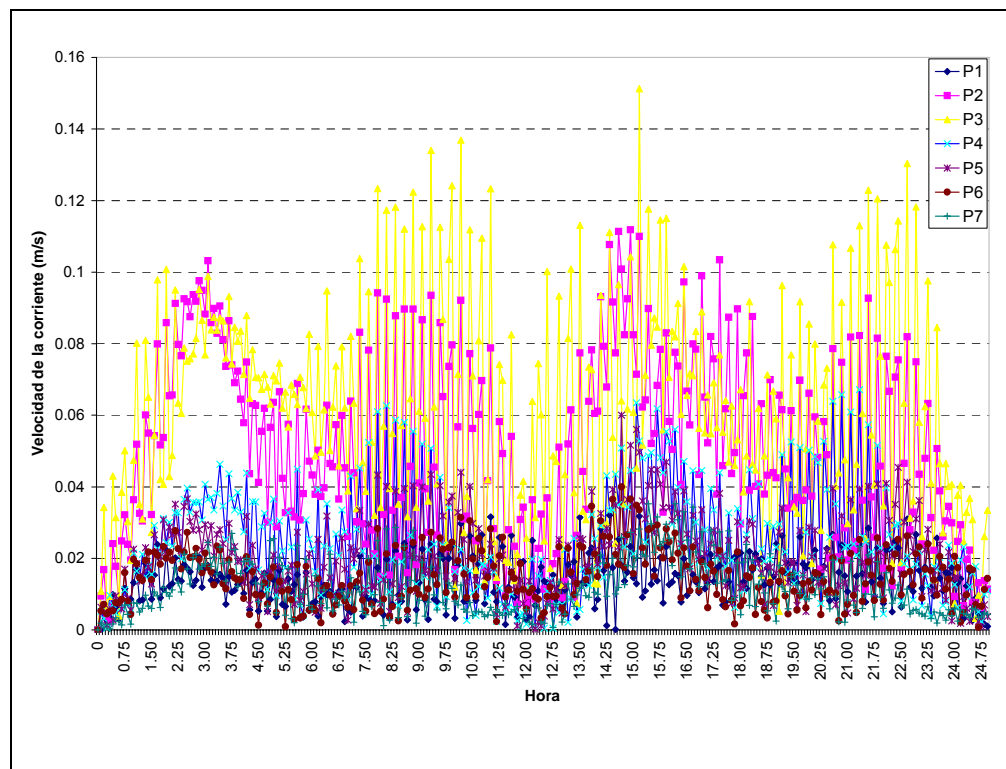
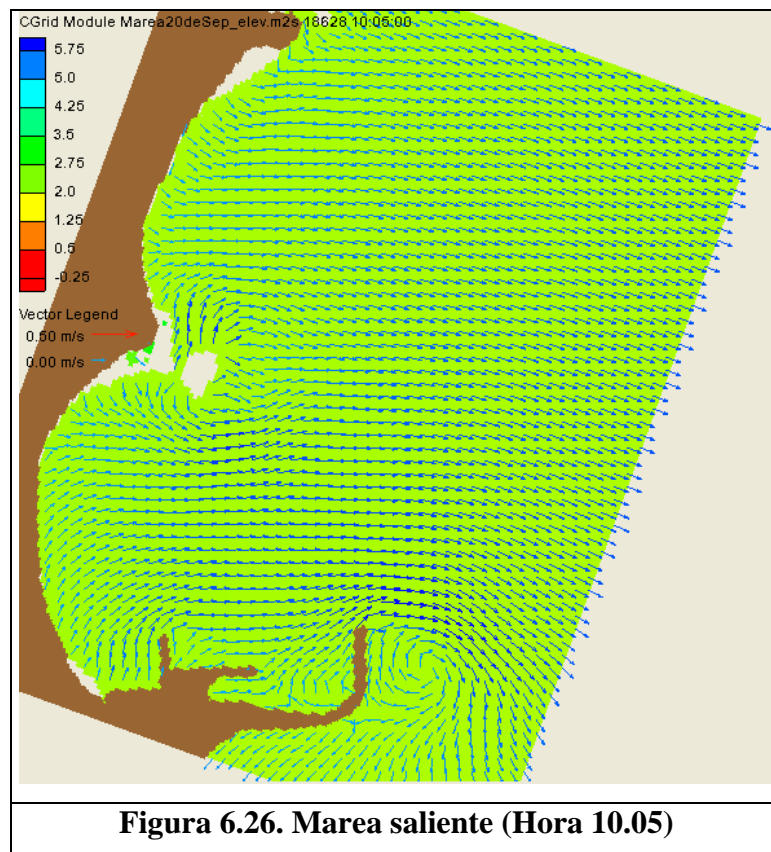
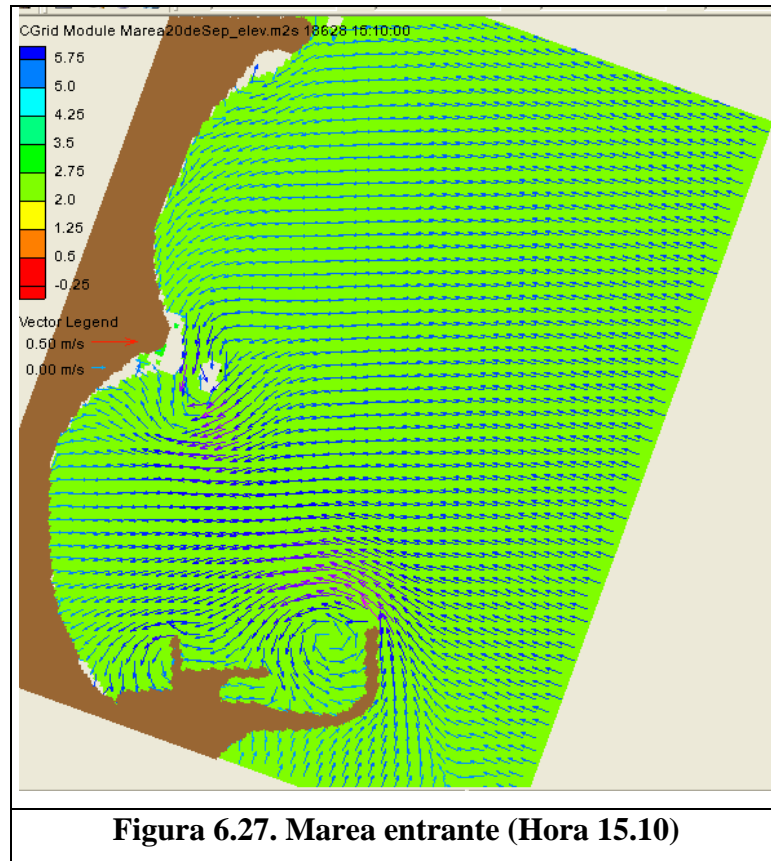


Figura 6.25. Valores absolutos para la velocidad de la corriente en los 7 puntos

Como puede observarse en las **Figuras 6.24 y 6.25**, la variación temporal de niveles del mar en los distintos puntos de control presenta muy buena coincidencia y representa adecuadamente la forma cosenoidal de la onda de marea. Los valores absolutos de intensidad de la corriente para los distintos puntos muestran diferencias que se vinculan a la ubicación de cada uno de ellos sobre la franja costera. Se destaca que como valores máximos las corrientes pueden alcanzar los 0.15 m/s.

Por otra parte, en las **Figuras 6.26 y 6.27** se presenta la configuración del campo de corrientes obtenido para dos instantes de la simulación que representan una situación de bajante y de creciente, respectivamente. Para ambos casos, el estado de marea se encuentra cercano al nivel medio, instancia en la cual pueden observarse las corrientes de mayor intensidad.





Los resultados mostraron que las corrientes generadas por la onda de manera son sustancialmente menores que las inducidas por la acción del oleaje.

Los valores más altos pueden encontrarse en la zona del pie de la Restinga Coronel y en el entorno del morro de la escollera del Puerto, con intensidades máximas del orden de 0.20 m/s.

7 CONCLUSIONES

1. Se evaluaron las características hidrodinámicas en una franja costera de unos 7 Km de extensión entre el Puerto de Comodoro Rivaravia y la Restinga Alí. El frente costero se encuentra conformado por tres bahías contiguas, claramente delimitadas por la presencia de afloramientos rocosos (restingas) sobre las que se puede establecer la siguiente identificación física: la bahía Sur, comprendida entre el puerto y la Restinga Coronel; una bahía Central comprendida entre la Restinga Coronel y la Restinga del Medio; y la bahía Norte comprendida entre las Restinga del Medio y la Restinga Alí.
2. A partir de una serie cronológica de algo más de 10 años de extensión (1995-2005) disponible en una posición costa afuera de Comodoro Rivadavia, en el Golfo de San Jorge, y mediante la aplicación de un modelo matemático de propagación de olas, se establecieron las características del clima de olas en el área costera, lo que permitió definir las condiciones de borde para la modelación hidrodinámica.
3. Simulaciones numéricas realizadas para el nivel medio del mar, sobre un conjunto de escenarios que representan el clima de olas frecuentes en la zona de estudio, posibilitaron analizar las características principales de la hidrodinámica costera que se desarrolla a lo largo de la zona de estudio, permitiendo establecer las siguientes conclusiones:
 - a. Los cambios de orientación de la costa y la presencia de sectores con afloramientos rocosos (restinga) dominan el proceso de rotura del oleaje, provocando importantes variaciones en la distribución de las alturas de ola a lo largo de todo el frente costero. La zona más expuesta a la acción del oleaje frecuente corresponde al sector de la bahía Norte, donde puede alcanzar alturas del orden de $H_s = 1.10$ m.
 - b. Los campos de corrientes generados por acción del oleaje muestran patrones comunes a todos los escenarios. En todos los casos se observa que las corrientes más intensas se originan en los tramos centrales de playa, donde el sentido de circulación predominante es marcadamente de Norte a Sur, y en las adyacencias de las restingas, donde además pueden generarse fuertes corrientes de retorno y zonas de recirculación del flujo.

- c. Para condiciones frecuentes del oleaje y nivel medio del mar se han estimado corrientes inducidas por el oleaje máximas del orden de 0.75 m/s en la bahía Central, y de 0.56 m/s en para la bahía Norte.
 - d. En términos generales, las corrientes de circulación más intensas se generan para los escenarios con oleaje incidente desde las direcciones E y ESE.
4. Dado que la onda de marea presenta importantes valores de amplitud en la región, se analizaron distintas situaciones que combinaron escenarios frecuentes de oleaje con estados de bajamar (NM=-0.27 MOP) y pleamar (N=5,74 MOP), respectivamente. Del resultado de estas simulaciones pudieron extraerse las siguientes conclusiones:
- e. **Para la situación de bajamar**, la marcada bajante respecto del nivel medio modifica sustancialmente la ubicación de las zonas de rompiente y, consecuentemente, las características del campo de corrientes generado por la misma.
 - f. En términos generales, puede decirse que las alturas de ola que llegan a la línea de costa disminuyen en comparación a la situación observada para el nivel medio, mientras que la intensidad de las corrientes generadas mantiene el orden de magnitud.
 - g. Si bien se mantiene una clara tendencia a la circulación en el sentido nort-sur, existen zonas donde se observan corrientes de retorno con intensidades considerables, destacándose el sector de la Restinga del Medio.
 - h. **Para la condición de pleamar**, las olas tiene mayor capacidad de alcanzar la costa con mayor altura que para el nivel medio y la bajamar, pudiendo alcanzar valores máximos de $H_s = 1,5$ m en la zona de la bahía Central.
 - i. Los sistemas de corrientes de circulación generados en la costa son de menor intensidad para el sector de la bahía Central (máximos de 0.53 m/s) y aumentan en la bahía Norte (máximos de 0.64 m/s).

- j. Con el ascenso del nivel de la marea se reduce notablemente la influencia de las restingas, con lo cual disminuyen la presencia de zonas de recirculación y las corrientes de retorno.
5. Se analizó un conjunto de situaciones correspondiente a escenarios de oleaje extremo a partir de las cuales pueden establecerse las siguientes observaciones:
- k. La altura de la olas que llegan hasta la línea de costa aumenta considerablemente respecto del oleaje frecuente, pudiéndose observar máximos de $H_s = 2,30$ m y $3,10$ m para la bahía Central con nivel medio y pleamar, respectivamente; y $H_s = 1,70$ m y $H_s = 2,30$ m para la bahía Norte con nivel medio y pleamar, respectivamente.
 - l. Las corrientes más intensas corresponden a las zonas de playa. Comparando estos valores con los obtenidos para el análisis de condiciones frecuentes del oleaje, se deduce que en este caso la velocidad media de la corriente litoral aumenta en un orden de 2 y 3 veces para el nivel medio y para la condición de pleamar, respectivamente. Los máximos alcanzan valores de $2,35$ m/s en la bahía Central y $1,93$ m/s para la bahía Norte. En ambos casos, el sentido de circulación es de Norte a Sur.
 - m. Para la condición de nivel medio puede observarse la presencia de importantes corrientes de retorno que provocan una marcada recirculación en las zonas de la Restinga del Medio y la Restinga Coronel. Por el contrario, en la condición de pleamar se establece un flujo de corrientes litorales en sentido norte-sur que se desarrolla con gran uniformidad a lo largo de todo el frente costero.
6. Finalmente, se realizó la modelación para el estudio de los sistemas de corrientes generados por acción de la marea astronómica. Para ello se utilizó como dato de entrada una onda de marea de amplitud máxima correspondiente al puerto de Comodoro Rivadavia. Como resultado de la modelación pudo comprobarse que los sistemas de corrientes generados a lo largo de todo el ciclo de la marea presentan valores máximos del orden de $0,20$ m/s, los cuales resultan sensiblemente menores a los generados por la acción del oleaje.

ANEXO I FOTOGRAFIAS



Foto 1. Afloramiento de la Restinga del Medio



Foto 2. Zona de Playa al sur de Restinga del Medio



Foto 3. Playa extendida entre restingas Coronel y del Medio



Foto 4. Playa extendida entre restingas del Medio y Alí



Foto 5. Rotura del oleaje lejos de la costa por presencia de la restinga

ANEXO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO CMS-WAVE

CMS-Wave (anteriormente denominado Wabed) es un modelo numérico espectral, promediado en las fases, y de estado estacionario (Mase and Kitano 2000; Mase 2001; Mase et al. 2005). Este tipo de modelo representa los cambios que ocurren sobre la densidad de energía (acción) del oleaje en su propagación hacia la costa.

La densidad de energía (acción) de ola se define como $A = E/\sigma$, donde $E = E(\sigma, \theta)$ 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 energía es del tipo:

$$\frac{\partial[(C_{gx} + u)A]}{\partial x} + \frac{\partial[(C_{gy} + v)A]}{\partial y} + \frac{\partial[C_{g\theta}]}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\theta} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta A_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta A_{yy} \right\} + S_{in} + S_{dp}$$

donde C_{gx} , C_{gy} , y $C_{g\theta}$ representan celeridades de grupo asociadas a los ejes x e y y a la dirección de propagación θ , respectivamente; u y v son las componentes de la velocidad de la corriente; S_{in} es el término fuente que representa el crecimiento de la ola por acción del viento; S_{ds} es el término sumidero que representa la disipación de energía; y el parámetro κ se encuentra asociado a la difracción del oleaje.

Dentro del conjunto de procesos físicos capaces de ser simulados por el modelo se encuentran: la refracción inducida por corrientes, por profundidad y por coeficiente de bajo; la rotura del oleaje provocada por la profundidad y por la pendiente de la ola; y el crecimiento del oleaje en función del viento.

En CMS-Wave se han incorporado recientemente expresiones matemáticas desarrolladas para simular en forma aproximada los efectos de la difracción y la reflexión, con lo cual se ha mejorado notablemente la capacidad de simular las transformaciones del oleaje para regiones costeras con presencia de estructuras.

Las ecuaciones son resueltas aplicando el método de diferencias finitas sobre un dominio de cálculo constituido por una grilla rectangular espacialmente discretizada con pasos $\Delta x = \Delta y$, utilizando un esquema numérico descentrado hacia delante.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO CMS-FLOW

CMS-Flow (anteriormente denominado M2D) es un modelo hidrodinámico de circulación bidimensional que resuelve las ecuaciones de continuidad y momento integradas en la vertical, utilizando el método numérico de volúmenes finitos.

La aplicación de este modelo permite obtener, dentro del área modelada, la evolución temporal de los campos de corrientes y elevación de la superficie libre inducidos por la acción de diferentes tipos de forzantes hidrodinámicos, como ser: ondas de marea, caudales de cursos de agua, oleaje, y acción del viento.

CMS-Flow incorpora además la posibilidad de estudiar el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos generados durante el transcurso de las simulaciones por la acción de los forzantes actuantes. Para ello utiliza formulaciones que permiten calcular la tasa de transporte de sedimentos, una ecuación de advección-difusión, y una ecuación de continuidad de sedimentos que permite computar los cambios generados en la batimetría.

Los cálculos se realizan sobre una grilla estructurada constituida por un conjunto de celdas que pueden ser de un tamaño constante o variar convenientemente sus dimensiones en sectores de la grilla que requieran una mayor resolución espacial para favorecer el análisis del problema que se esté estudiando.

Dentro de los procesos físicos de interés para el campo de aplicaciones de la ingeniería de costas capaces de ser representados por el modelo, se destacan:

- proceso de inundación y secado de celdas debido a la variación del nivel de la superficie libre;
- variación temporal para la intensidad y dirección del viento;
- variación espacial del coeficiente de fricción del fondo;
- variación espacial y temporal de la tensión de corte generada por acción del oleaje;
- opción de incorporar o no dentro las expresiones de cálculo términos de advección y de mezcla;
- consideración de la fricción con estructuras;
- representación de fondos duros no erosionables;
- representación de avalanchas en taludes de canales.

El aplicabilidad del modelo apunta a regiones costeras de mediana longitud, recomendándose su la aplicación para áreas del orden de 1 a 100 km de extensión; mientras que la escala temporal adecuada para las simulaciones es del orden de horas o días.

Debido a estas características y dada la su versatilidad para interactuar con otros módulos pertenecientes al sistema SMS, como lo son CMS-Wave (modelo de propagación de oleaje) y ADCIRC (modelo de circulación de gran escala), el modelo CMS-Flow se presenta como una herramienta de gran aplicación para el estudio de un amplio conjunto de problemas vinculados al ámbito de la ingeniería costera, pudiendo mencionarse como ejemplos:

- estudio de condiciones hidrodinámicas en áreas costeras;
- afectación de estructuras costeras sobre patrones hidrodinámicos y transporte de sedimentos;
- trasvases naturales de arena;
- sedimentación en canales de navegación;
- consecuencias generadas por bajantes de la marea o inundación en áreas costeras.

ECUACIONES

El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad y momento en un esquema en volúmenes finitos. Las ecuaciones de gobierno son:

$$\frac{\partial(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_x}{\partial y} + f q_y - \tau_{bx} + \tau_{wx} + \tau_{Sx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_y}{\partial y} - f q_x - \tau_{by} + \tau_{wy} + \tau_{Sy} \quad (3)$$

Donde:

h : nivel del agua en reposo
 η : desviación de la superficie libre del nivel de reposo
 t : tiempo
 q : caudal
 u, v : velocidad integrada en la vertical
 g : aceleración de la gravedad
 D : coeficiente de difusión
 f : coeficiente de Coriolis
 τ_b : tensión de corte en el fondo
 τ_w : tensión de corte superficial (viento)
 τ_s : tensión de corte por olas
 x, y : dirección de los ejes cartesianos

Las componentes de velocidad se relacionan con el caudal mediante:

$$u = \frac{q_x}{h + \eta} \quad (4)$$

$$v = \frac{q_y}{h + \eta} \quad (5)$$

Para la resolución de estas ecuaciones el modelo permite optar entre la utilización de un esquema numérico implícito o uno explícito.

En el primer caso se tiene la ventaja de que el cálculo resulta incondicionalmente estable para cualquier Δt adoptado, aunque como contraparte de esto requiere la realización de un mayor número de operaciones por cada paso de tiempo.

Para que el cálculo con un esquema implícito sea estable existen restricciones en la selección del paso de tiempo Δt asociadas al valor del número de Courant ξ :

$$\xi = u \frac{\Delta t}{\Delta s} < 1$$

Considerando la teoría lineal de ondas se puede calcular el valor de la velocidad de propagación de una onda (que podría ser la marea) en aguas poco profundas mediante la expresión: $u = \sqrt{gh}$. Con lo cual, dado un valor fijo para Δs podría estimarse el paso de tiempo adecuado para asegurar la estabilidad del cálculo.

Debido a la característica no lineal de las ecuaciones resueltas por CMS-Flow, y dado que la velocidad de propagación puede estar compuesta por el aporte de distintas fuentes:

$$u = u_{marea} + u_{viento} + u_{olas} + u_{caudal}$$

es recomendable que para asegurar la estabilidad del cálculo en valor del número de Courant se encuentre en el rango de 0.5 a 0.7.

En algunas aplicaciones donde se puede tener la combinación fuertes corrientes con tamaños de celda reducidos (como puede ser el caso de la modelación en una zona de surf), es probable que para garantizar la estabilidad del cálculo con la utilización de un esquema explícito se requieran pasos de tiempo exageradamente reducidos, por lo cual en esas situaciones resulta decididamente conveniente la utilización del esquema implícito.

ANEXO III

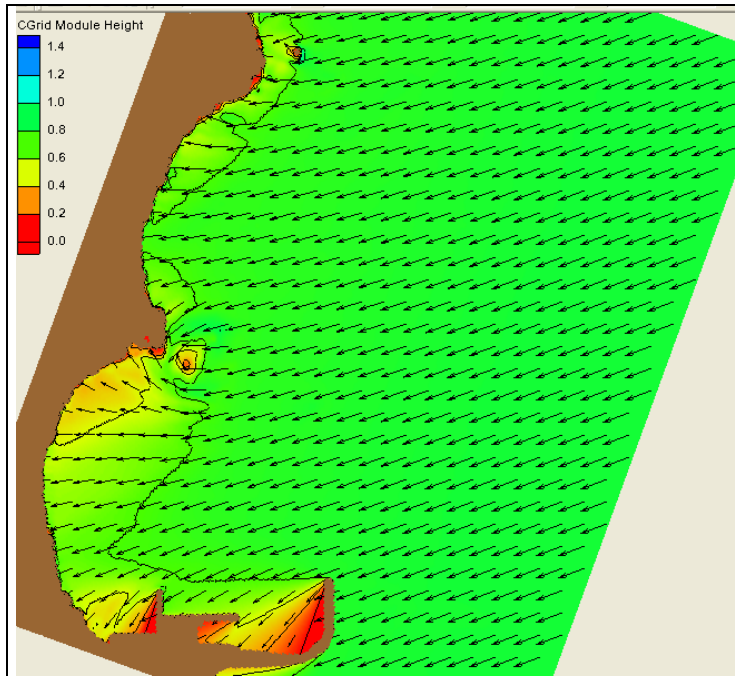


Figura 1a. Distribución de Hs para olas del ENE

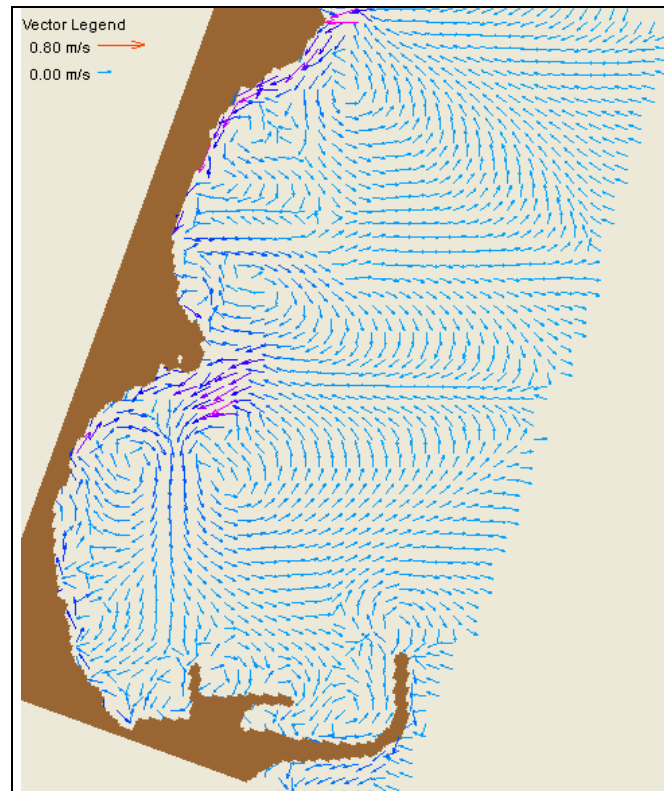


Figura 2a. Corrientes para olas del ENE

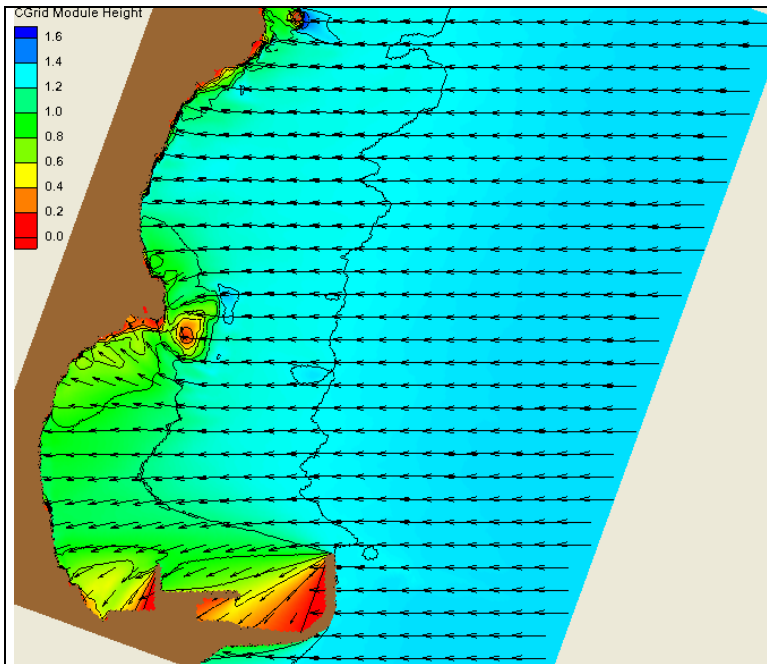


Figura 3a. Distribución de Hs para olas del E

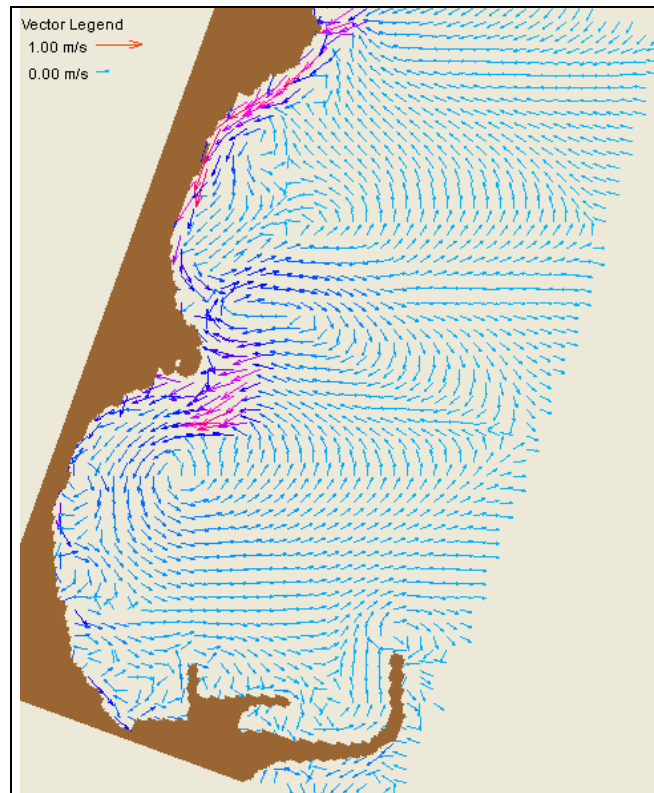


Figura 4a. Corrientes para olas del E

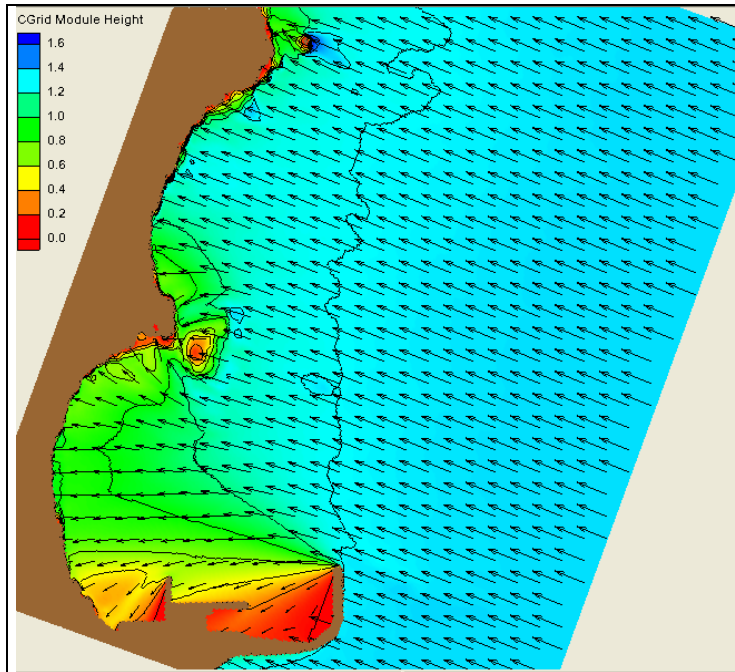


Figura 5a. Distribución de Hs para olas del ESE

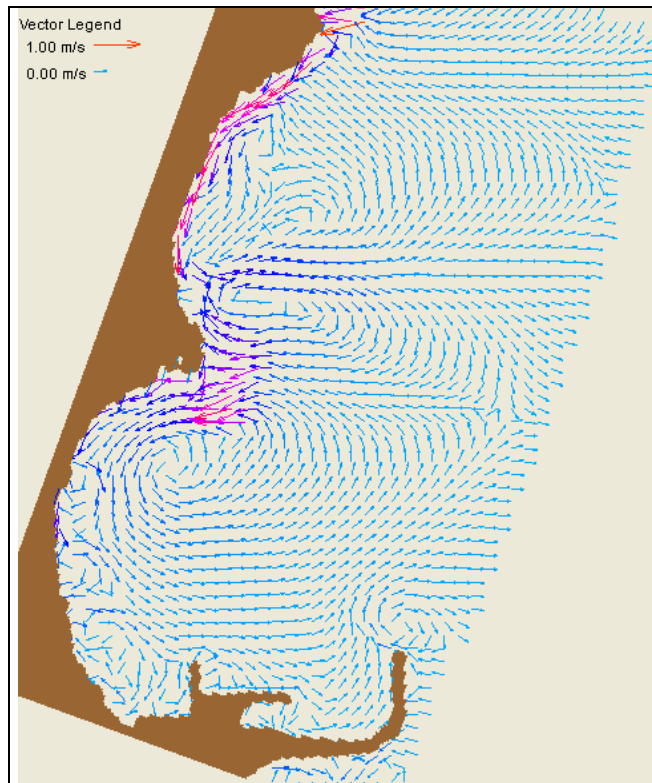


Figura 6a. Corrientes para olas del ESE

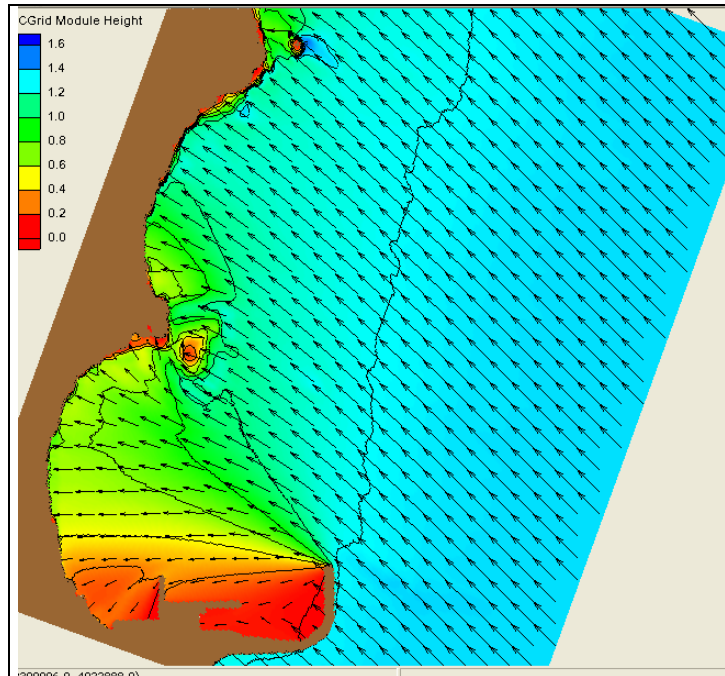


Figura 7a. Distribución de Hs para olas del SE

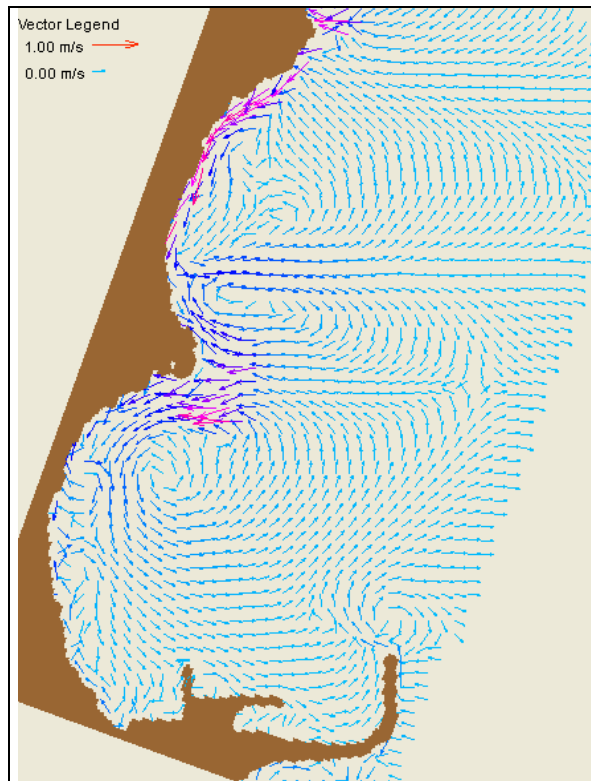


Figura 8a. Corrientes para olas del SE

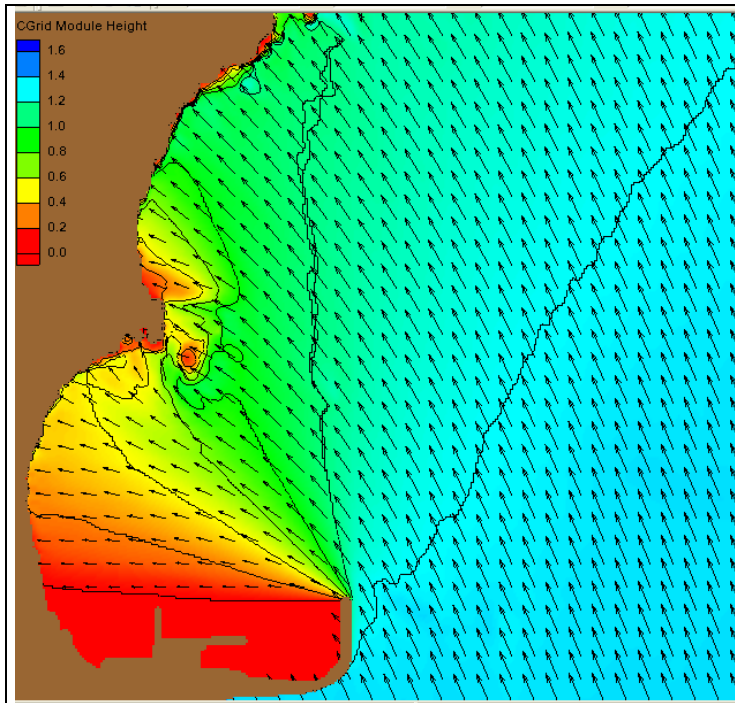


Figura 9a. Distribución de Hs para olas del SSE

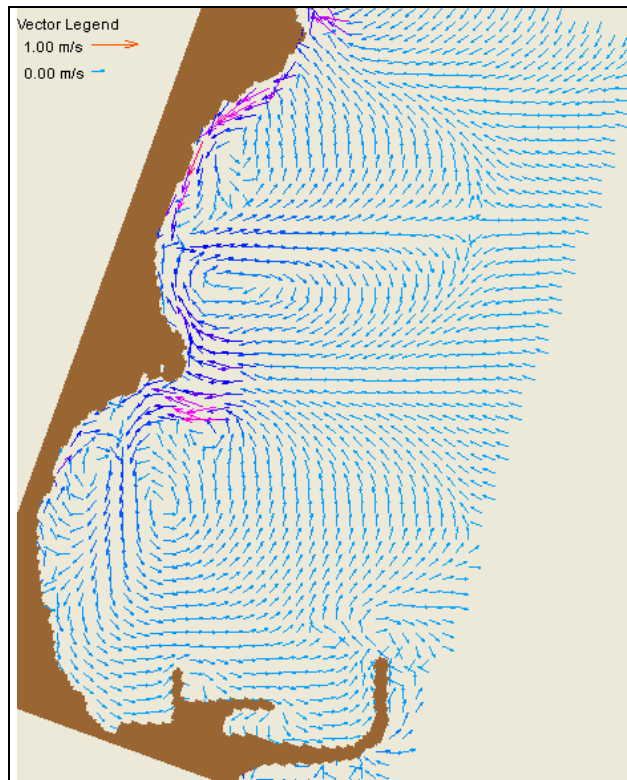


Figura 10a. Corrientes para olas del SSE

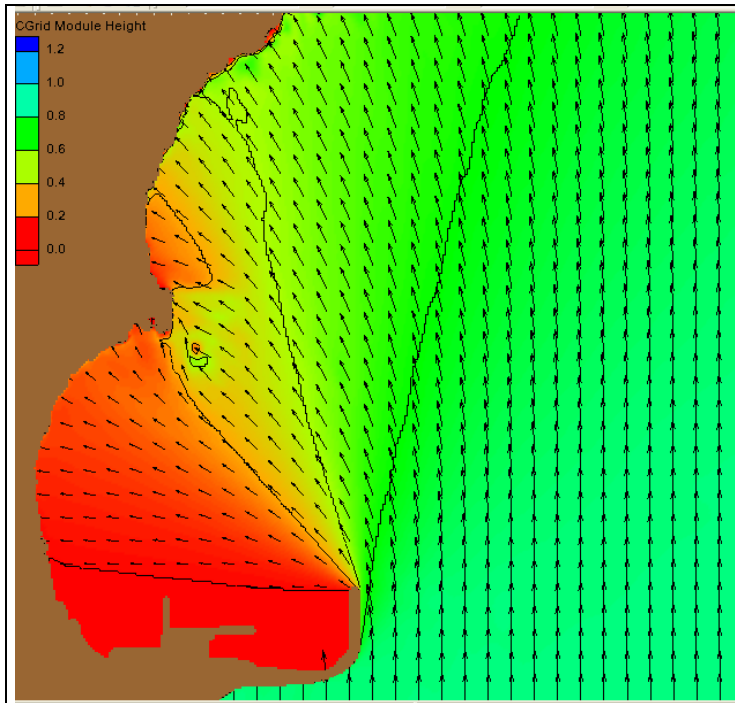


Figura 11a. Distribución de H_s para olas del S

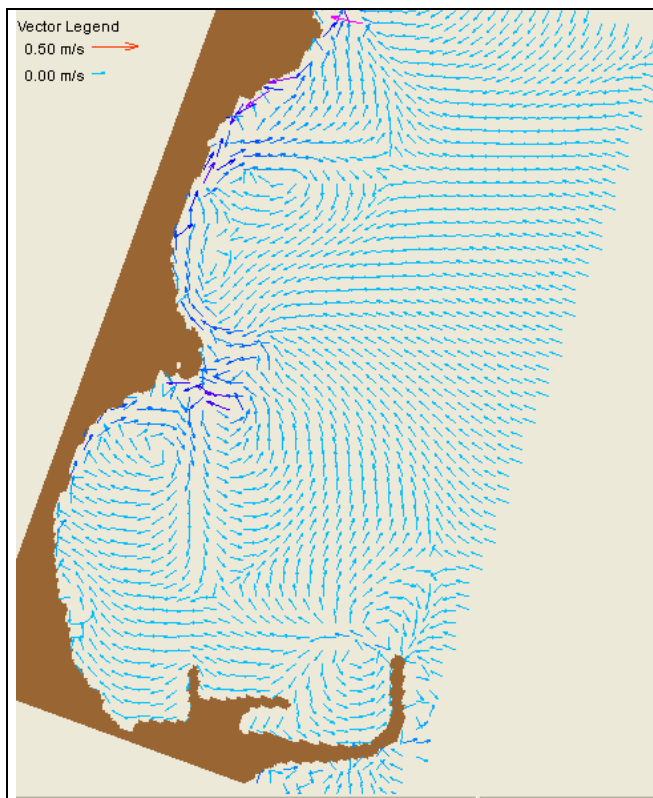


Figura 12a. Corrientes para olas del S

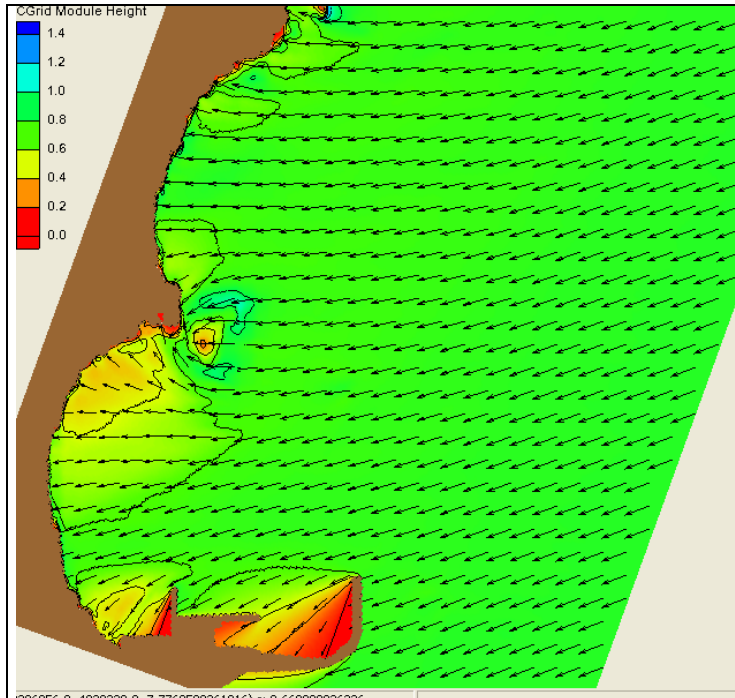


Figura 13a. Distribución de Hs para swell del ENE

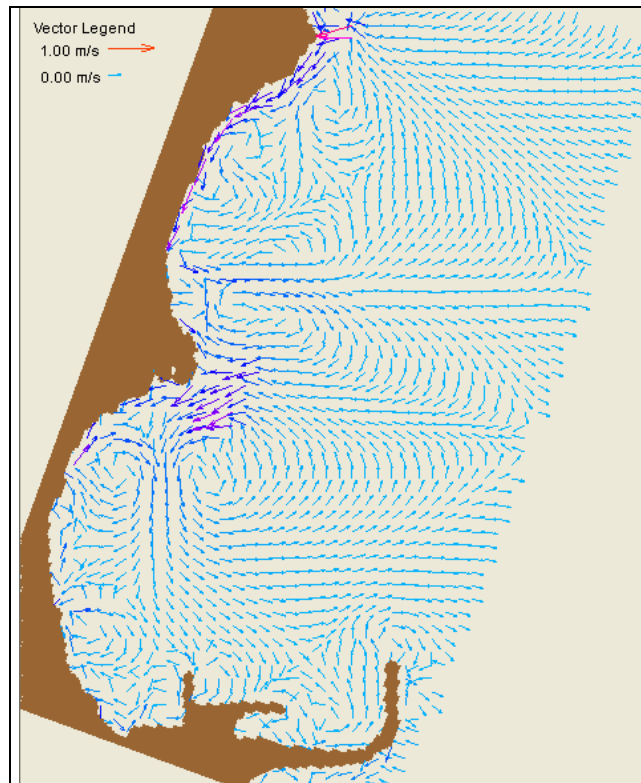
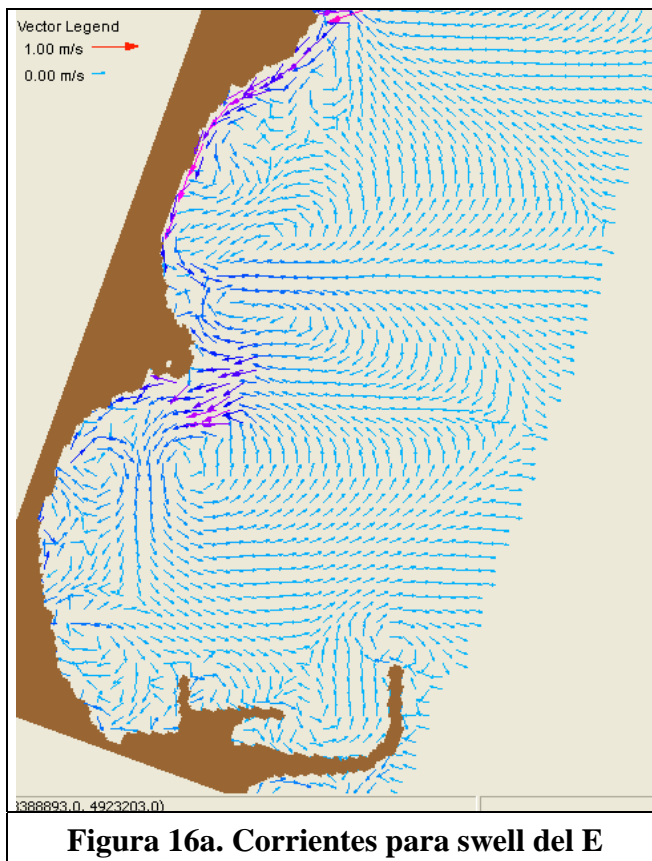
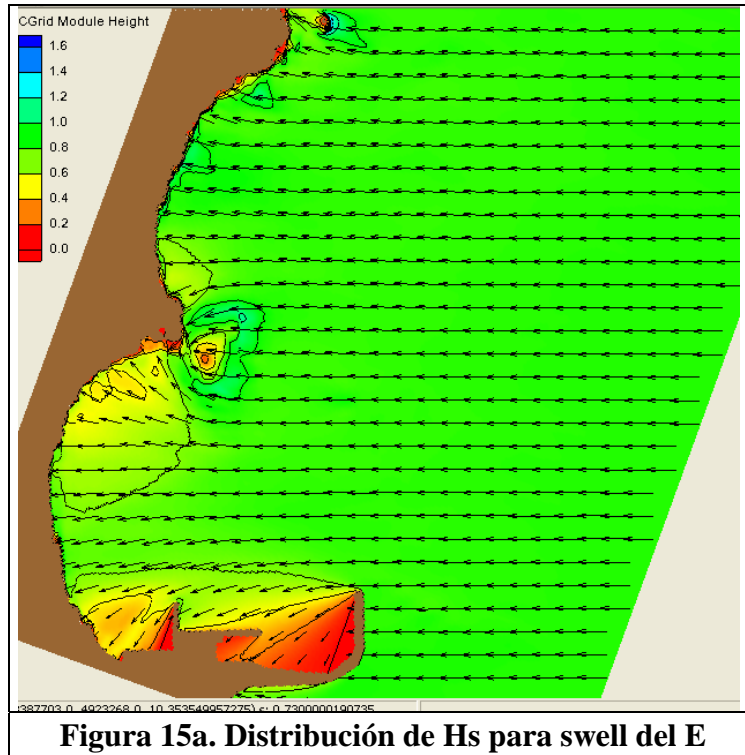


Figura 14a. Corrientes para swell del ENE



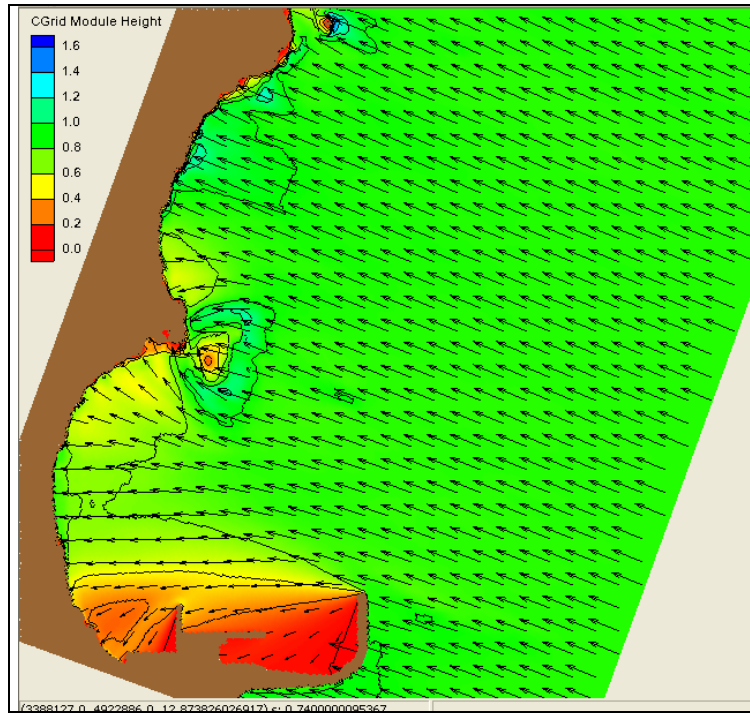


Figura 17a. Distribución de Hs para swell del ESE

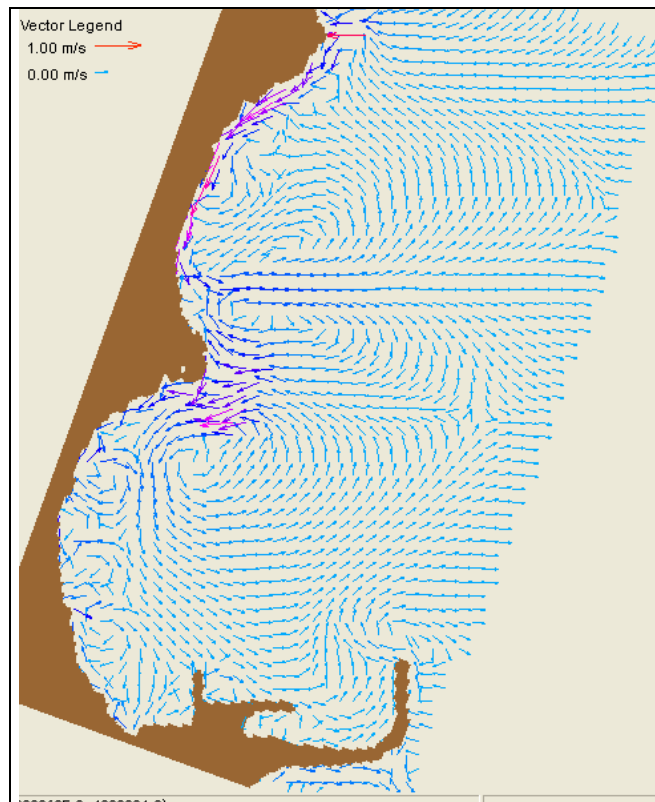


Figura 18a. Corrientes para olas del ESE

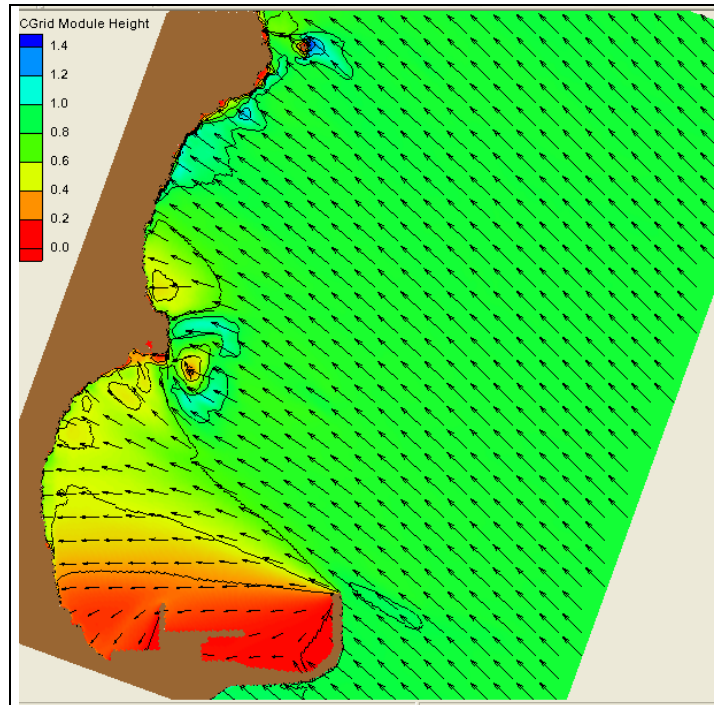


Figura 19a. Distribución de Hs para swell del SE

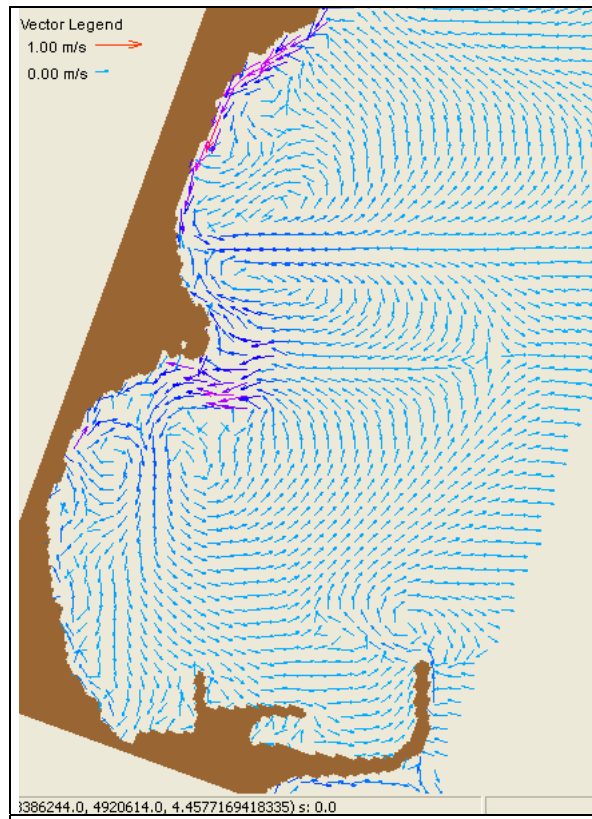
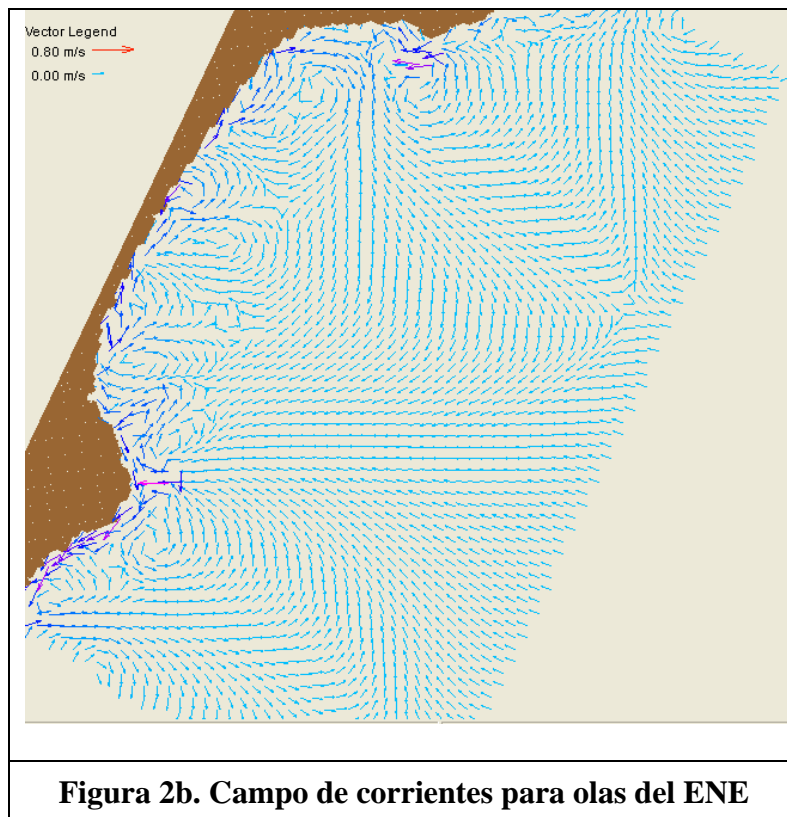
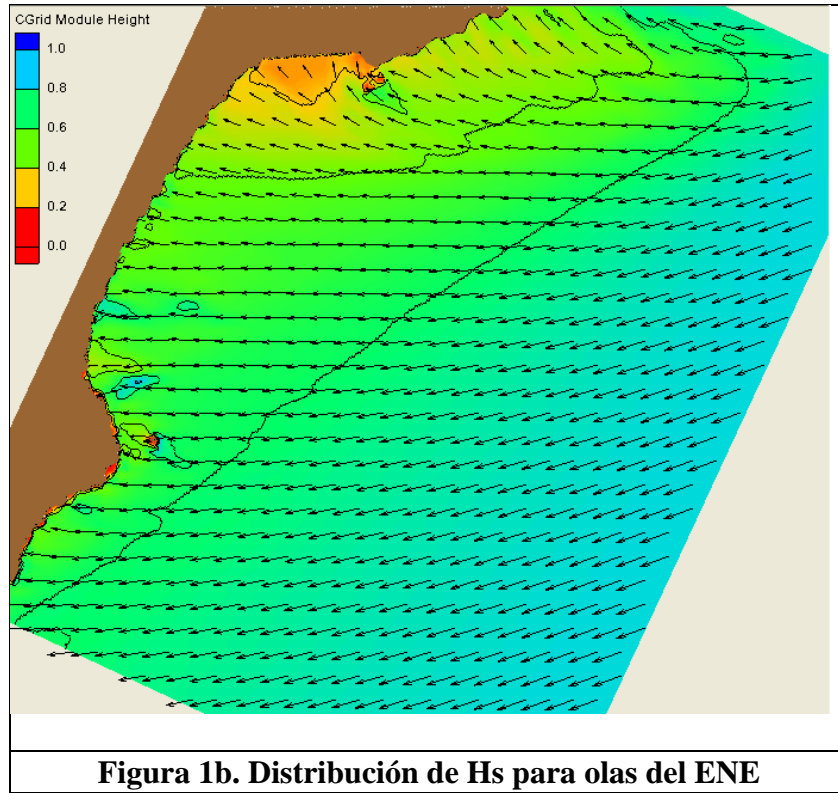
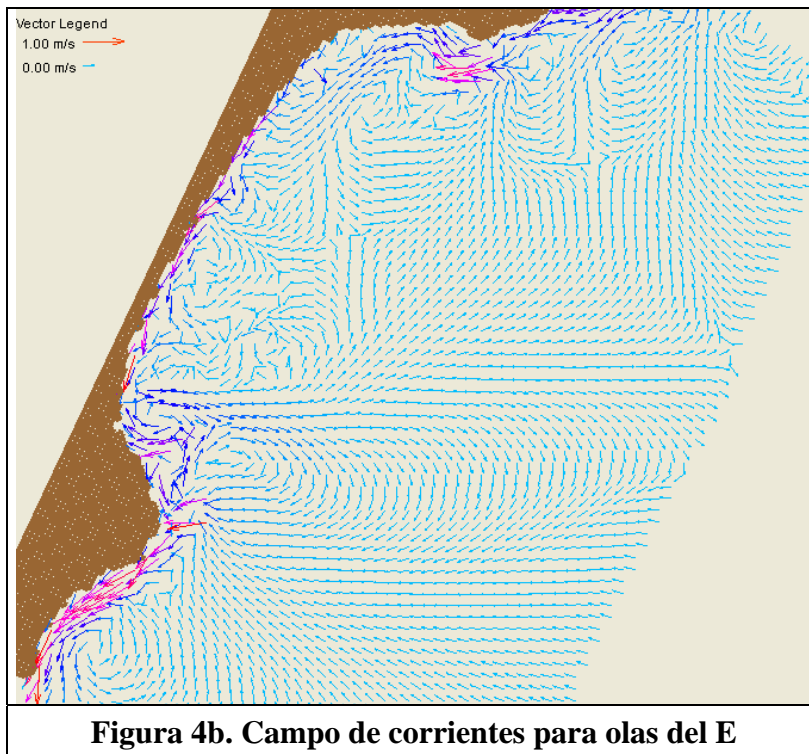
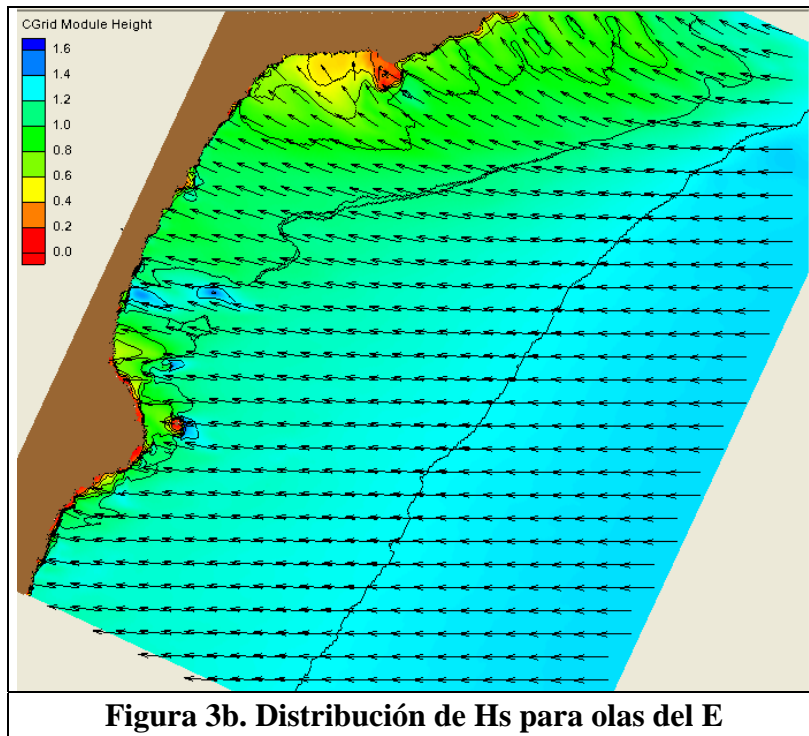


Figura 20a. Corrientes para swell del SE





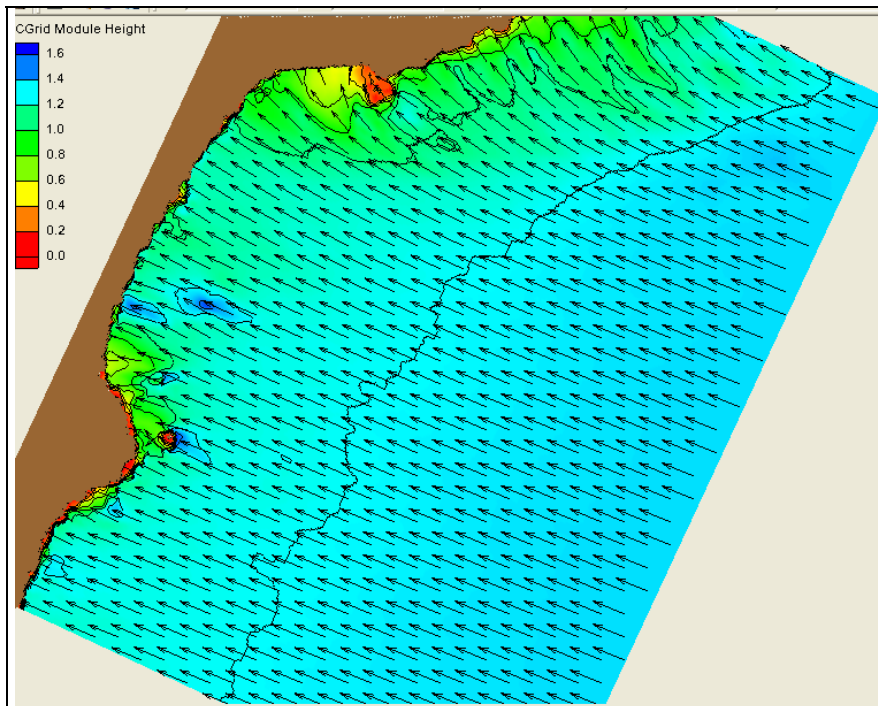


Figura 5b. Distribución de Hs para olas del ESE

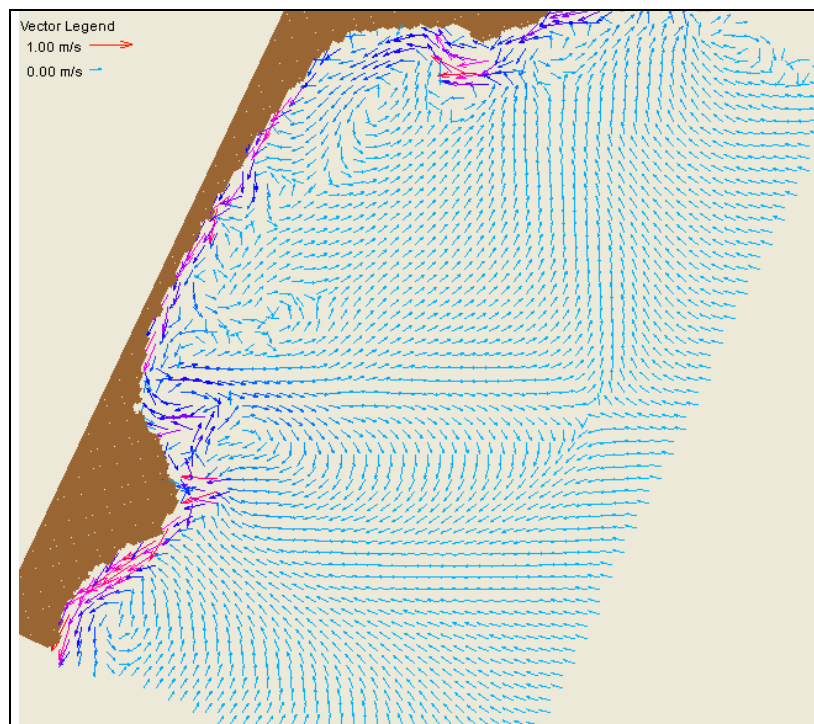
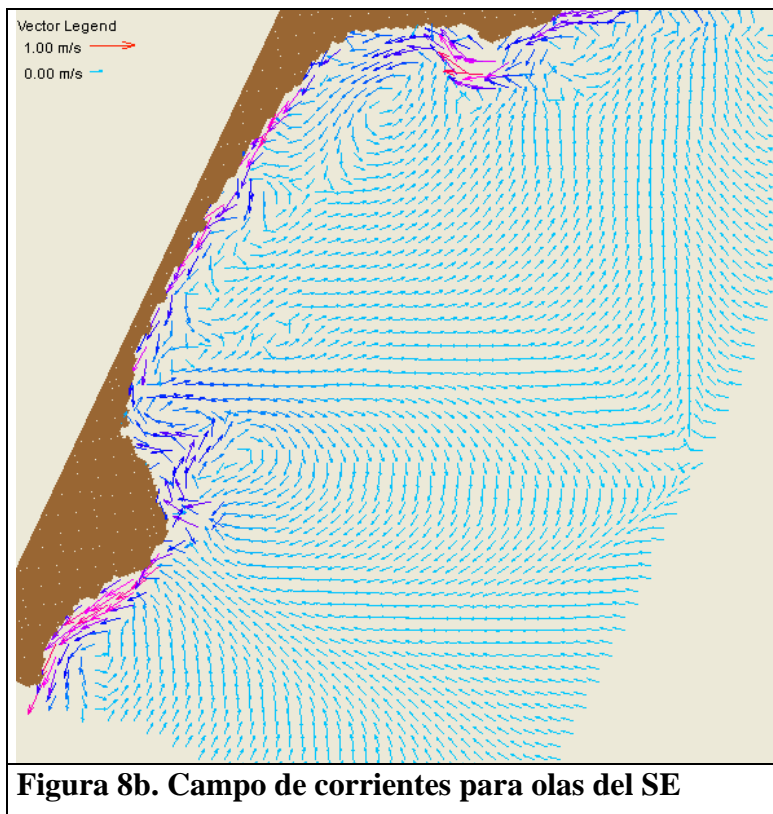
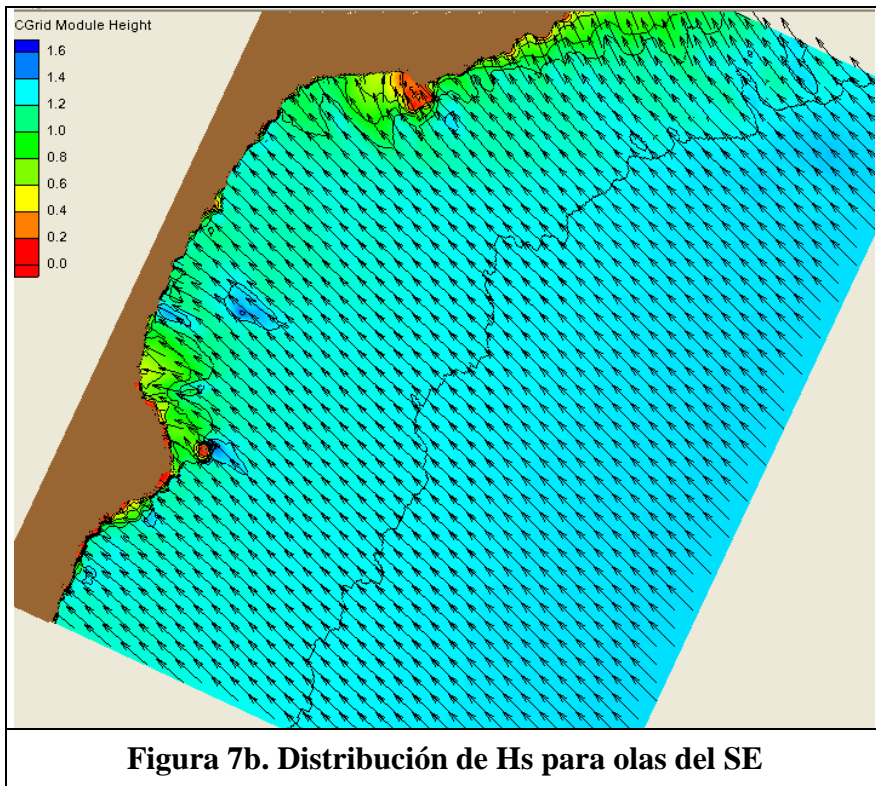


Figura 6b. Campo de corrientes para olas del ESE



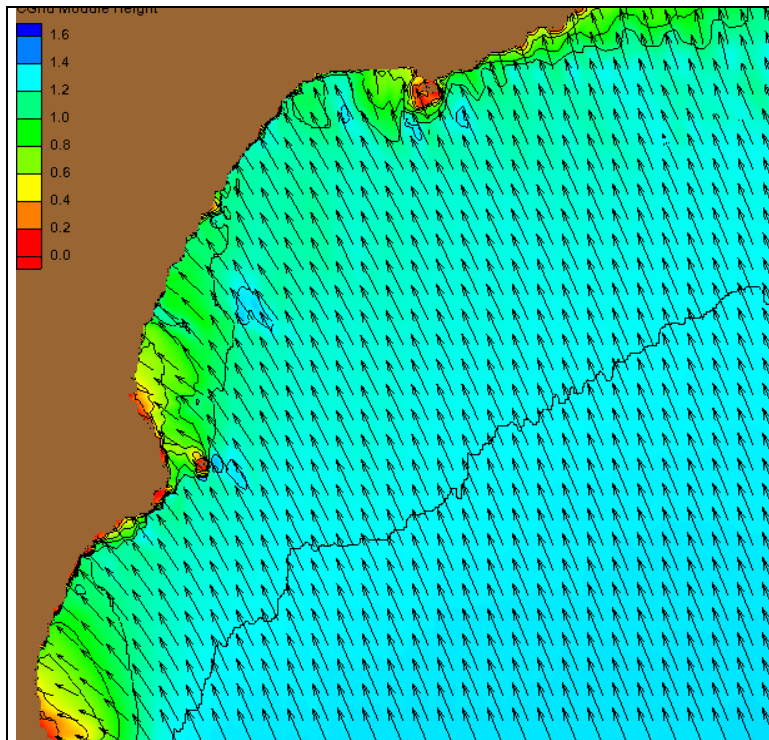


Figura 9 b. Distribución de Hs para olas del SSE

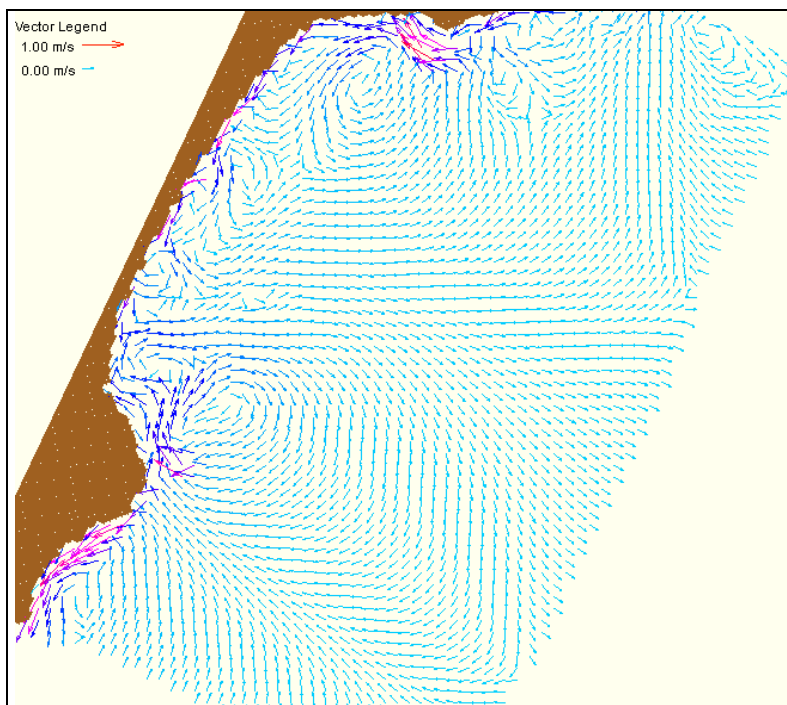


Figura 10b. Campo de corrientes para olas del SSE

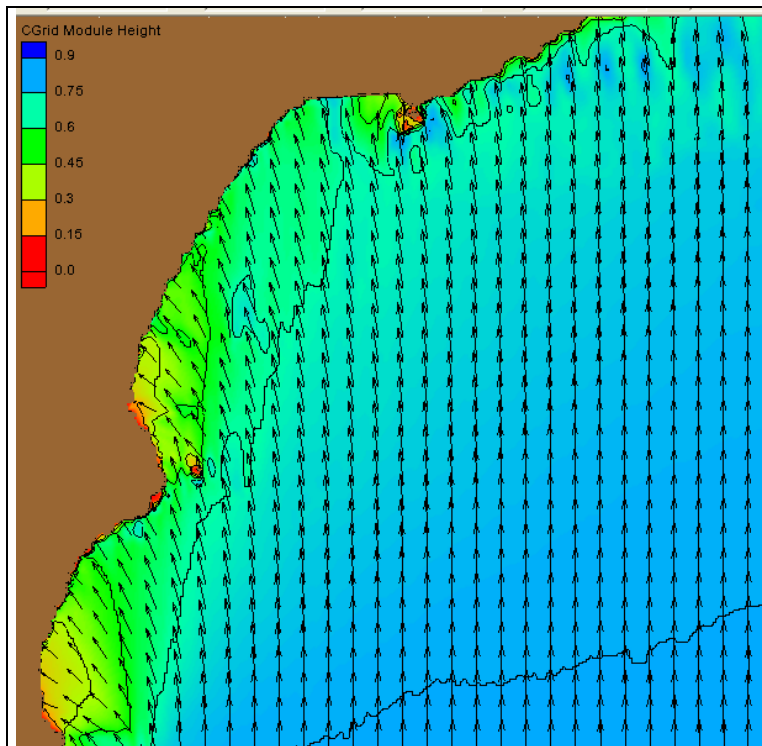


Figura 11b. Distribución de Hs para olas del S

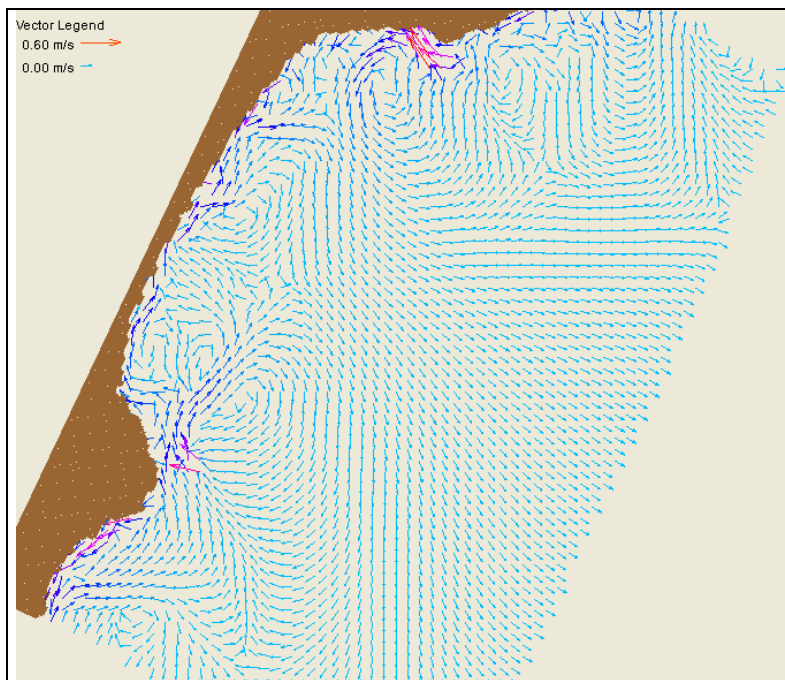


Figura 12b. Campo de corrientes para olas del S

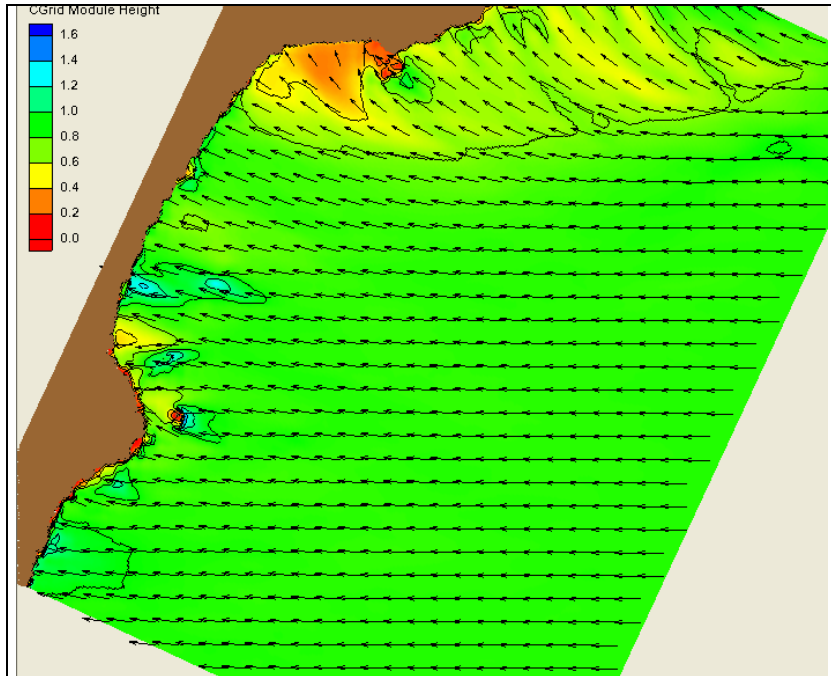


Figura 13b. Distribución de Hs para swell del E

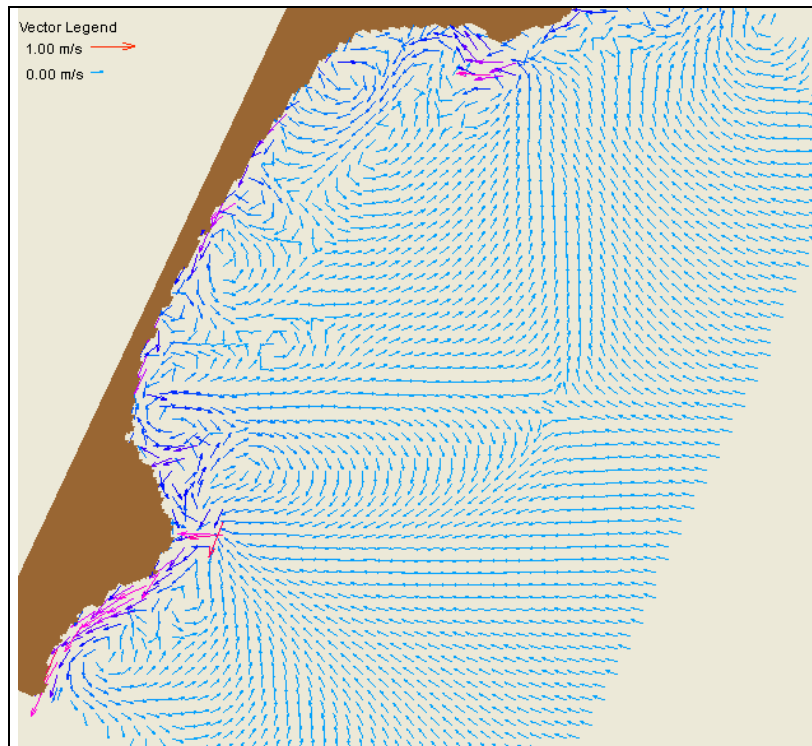


Figura 14b. Campo de corrientes para swell del E

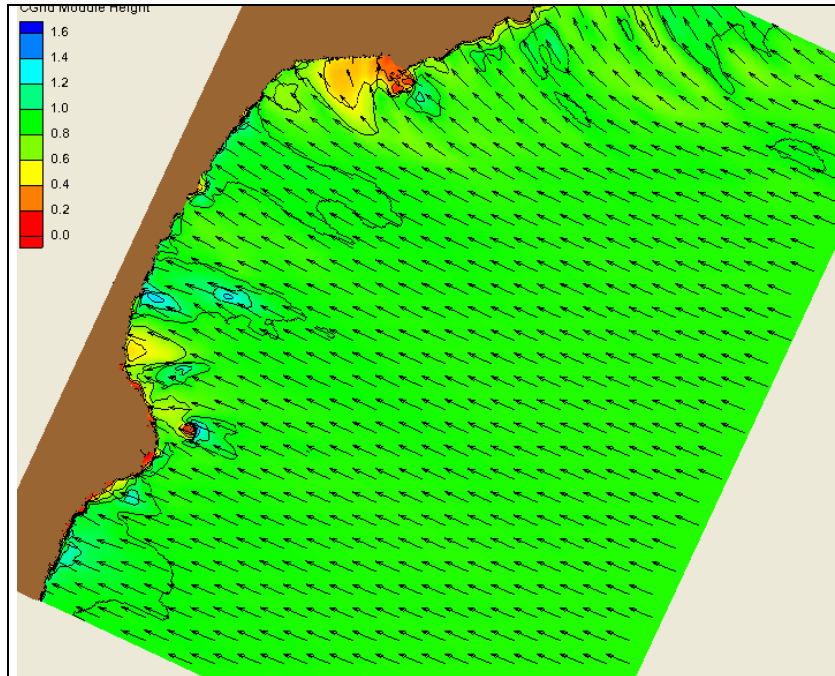


Figura 15b. Distribución de Hs para swell del ESE

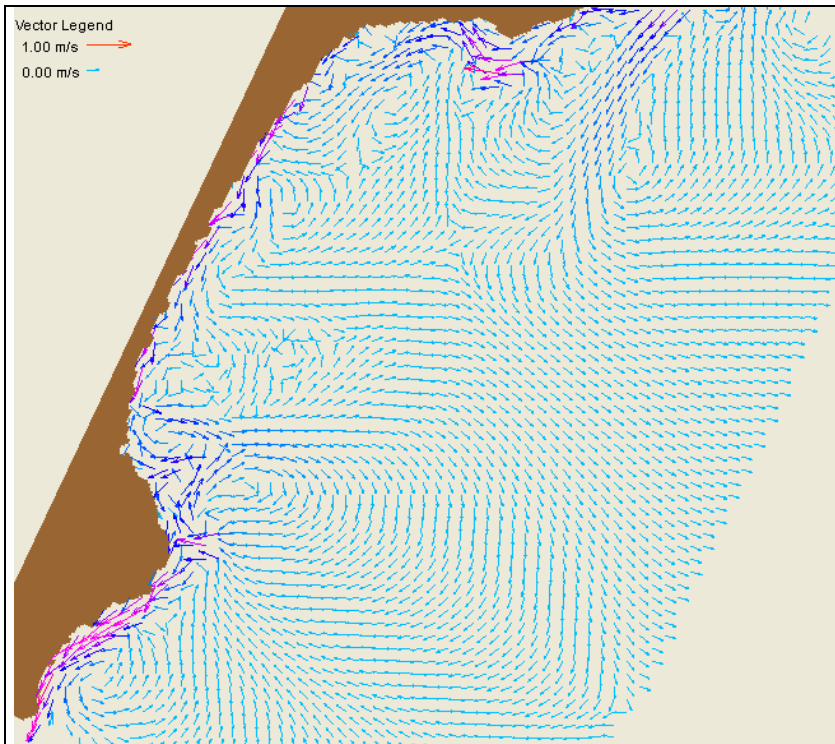


Figura 16b. Campo de corrientes para swell del ESE

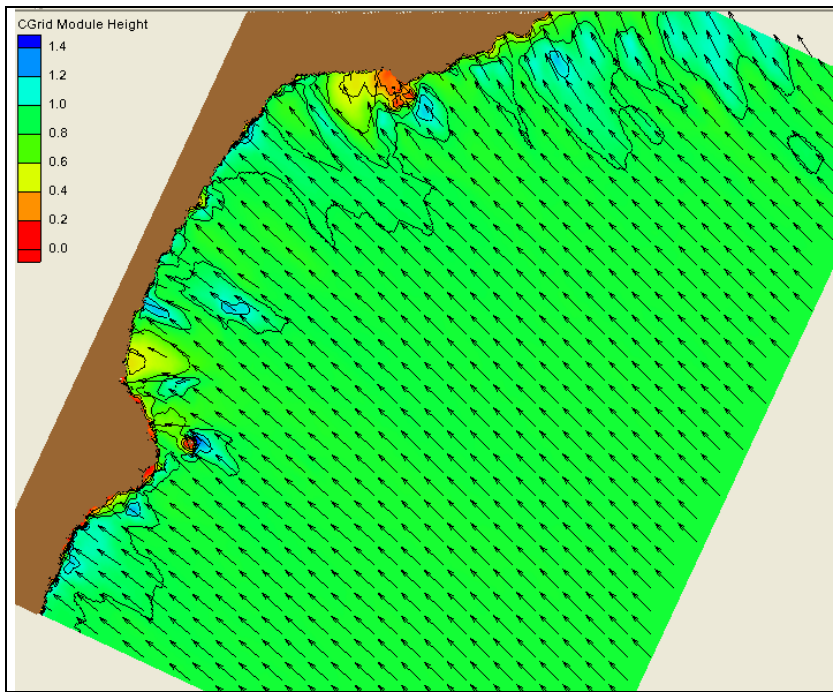


Figura 17b. Distribución de Hs para swell del SE

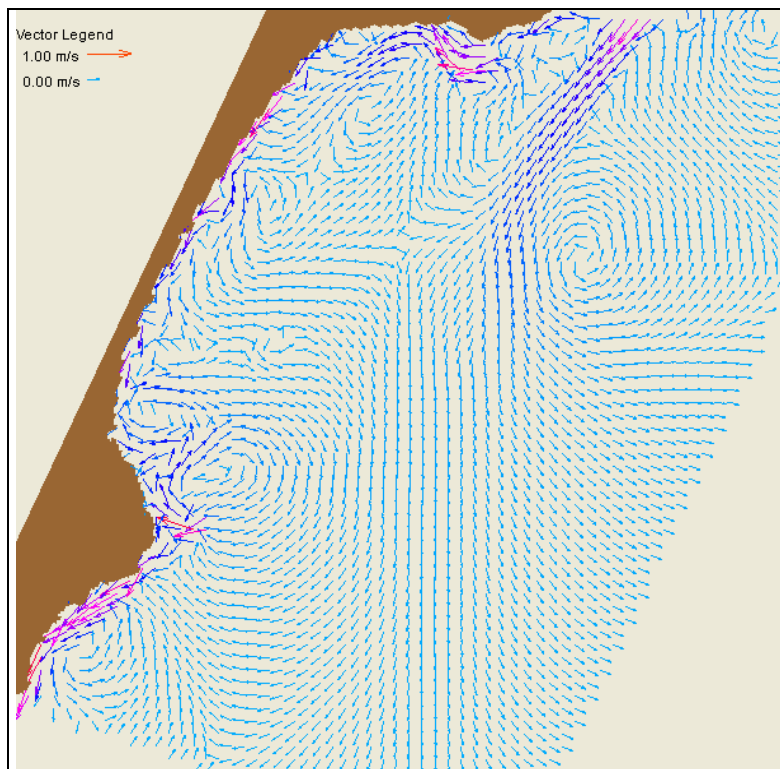


Figura 18b. Campo de corrientes para swell del SE