

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



SISTEMA DE ROMPEOLAS PARALELOS A LA COSTA EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA

Estudio de condiciones hidrodinámicas en el área costera

Marzo, 2011

Informe LHA- 319-01-11

LABORATORIO DE HIDRAULICA

SISTEMA DE ROMPEOLAS PARALELOS A LA COSTA EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA

Estudio de condiciones hidrodinámicas en el área costera

RESUMEN

Como parte de los estudios técnicos correspondientes al proyecto de construcción de un sistema de rompeolas paralelos a la costa, destinados a revertir los intensos procesos de erosión que se presentan en el frente costero al sur de Punta Mogotes, se desarrollaron tareas de modelación matemática vinculadas al estudio de la propagación del oleaje y evaluación de condiciones hidrodinámicas generadas en el entorno de las obras proyectadas.

PALABRAS CLAVE

Propagación de olas - modelación matemática – Rompeolas sumergidos–Mar del Plata

Informe	LHA-319-01-11
Fecha	Marzo 2011
PROYECTO	1029
COMITENTE	Alpa Vial G. Rizzo

**INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA**

DIRECTOR

Ing. J.C. De Lio

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. Castellano

Informe producido por

Ing. N. Tomazin

Equipo de trabajo

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

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	5
2	OBJETIVOS	6
3	INFORMACIÓN DE BASE	6
4	MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE EN LA REGIÓN COSTERA	7
4.1	Características generales del modelo	7
4.2	Aplicación del modelo en la zona de emplazamiento de las obras	8
4.3	Grillas de cálculo	8
4.4	Condiciones de contorno	10
4.5	Escenarios de cálculo	10
4.6	Selección de secciones de control	11
4.7	Resultados de las simulaciones	12
5	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS	19
6	CONCLUSIONES FINALES	22
7	REFERENCIAS	23

ANEXO I: Características generales del modelo BOUSS-2D

ANEXO II: Gráficos con resultados de la modelación

SISTEMA DE ROMPEOLAS PARALELOS A LA COSTA EN LA CIUDAD DE MAR DEL PLATA

Estudio de condiciones hidrodinámicas en el área costera

1 INTRODUCCIÓN

La Municipalidad de General Pueyrredón proyecta la construcción de un sistema de rompeolas paralelos a la costa y otras obras complementarias como medio para revertir los intensos procesos de erosión que se presentan en el frente costero al sur de Punta Mogotes.

Como parte de los estudios técnicos correspondientes, la empresa contratista G. RIZZO-ALPA VIAL UTE, ha aplicado el modelo matemático GENESIS para estimar los efectos del sistema de rompeolas sobre la morfología de la línea costera a largo plazo.

GENESIS constituye una herramienta útil para evaluar el cambio morfológico de la costa a largo plazo. Como complemento a lo realizado se consideró conveniente la aplicación de un modelo tipo Boussinesq para evaluar aspectos específicos de los sistemas de olas y las corrientes generadas en el entorno de las estructuras bajo situaciones hidrodinámicas particulares determinadas bajo distintos estados de mar, desarrollando así un análisis de corto plazo.

Se presenta aquí la aplicación del modelo matemático BOUSS-2D, adecuado para los fines expuestos. Mediante la aplicación de este modelo matemático se evaluaron las condiciones hidrodinámicas que se establecerán en el área de entorno a la ubicación de los rompeolas como consecuencia de la interacción de las mismas con el oleaje que se propaga hacia la costa.

2 OBJETIVOS

El propósito principal de este estudio consiste en la realización de un conjunto de simulaciones numéricas destinadas a evaluar aspectos hidrodinámicos del proyecto de rompeolas. Dichas simulaciones numéricas se realizaron para la situación actual (frente costero sin obras de defensa) y para la situación que contempla la presencia de rompeolas sumergidos, mediante lo cual fue posible analizar el funcionamiento de dos configuraciones de obra diferentes.

Como resultado de la aplicación del modelo se obtienen los campos de alturas de ola y corrientes generados en el área de modelación debido a la ocurrencia de diferentes escenarios de oleaje previamente seleccionados.

3 INFORMACIÓN DE BASE

Toda la información necesaria para el desarrollo de este trabajo fue suministrada por la empresa contratista G. RIZZO-ALPA VIAL UTE, quienes se encargaron de la recopilación de antecedentes y el desarrollo de estudios previos.

Como parte de esta información se mencionan: datos batimétricos correspondientes a la zona de emplazamiento de las obras, clima de olas y registro de niveles del mar.

4 MODELACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE EN LA REGIÓN COSTERA

La modelación de la propagación del oleaje en una zona costera requiere la consideración de procesos físicos lineales y no lineales generados por la acción combinada de una excitación exterior (oleaje) y la presencia de estructuras marinas con determinadas características geométricas y propiedades reflejantes de la energía. Al mismo tiempo, resulta determinante la influencia de las características morfológicas del lecho marino, que en aguas restringidas es generador de procesos de refracción y rotura del oleaje.

El desarrollo de un estudio de este tipo demanda la aplicación de técnicas numéricas avanzadas que permitan encarar la solución de problemas matemáticamente complejos. Dado este contexto, para el desarrollo del estudio solicitado en el área costera de Mar del Plata se aplicó el modelo BOUSS-2D (Nwogu *et al.*, 2001), el cual es considerado especialmente apto para este propósito y dada su versatilidad permitió estudiar los efectos de la incidencia de diferentes escenarios de propagación del oleaje sobre la región que se analiza.

4.1 Características generales del modelo

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

El planteamiento original de las ecuaciones de Boussinesq para la propagación del oleaje en aguas de profundidad variable fue derivada por Peregrine (1967), y reformulado posteriormente por Nwogu (1993, 1996) y por Wei *et al.* (1995). Estas modificaciones permitieron extender el rango de aplicabilidad de las ecuaciones al incorporar los efectos de la mayoría de los procesos físicos asociados a la transformación del oleaje que resultan de interés para el campo de la ingeniería de puertos y costas, entre los que cabe mencionar:

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

En el **ANEXO I** de este informe puede encontrarse una descripción ampliada de las características de este modelo.

4.2 Aplicación del modelo en la zona de emplazamiento de las obras

La aplicación del modelo en la zona de estudio tuvo el propósito de evaluar las condiciones hidrodinámicas generadas en el área de influencia de los rompeolas para distintos escenarios de oleaje incidente, considerando tres situaciones diferentes: en primer lugar, la situación actual de playa sin ningún tipo de protección artificial; en segundo lugar, dos configuraciones diferentes para la obra de protección consistente en dos conjunto de rompeolas distintos, constituidos cuatro y siete unidades, respectivamente.

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

4.3 Grillas de cálculo

La construcción de las grillas de cálculo necesarias para la aplicación del modelo se realizó con la información batimétrica provista por la Empresa, consistente en relevamientos de detalle realizados en la zona de estudio.

El área modelada para este estudio abarca una superficie levemente superior a 1 km², discretizada en un grilla regular constituida por un total de 358 filas X 701 columnas (250958 celdas), separados entre si por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 2 m, lo cual brinda una resolución espacial adecuada para encarar la solución del problema planteado. La Figuras 1 a 3 muestran las grillas de cálculo correspondientes a las tres configuraciones analizadas, permitiendo observar la totalidad del área modelada y sus respectivos contornos.

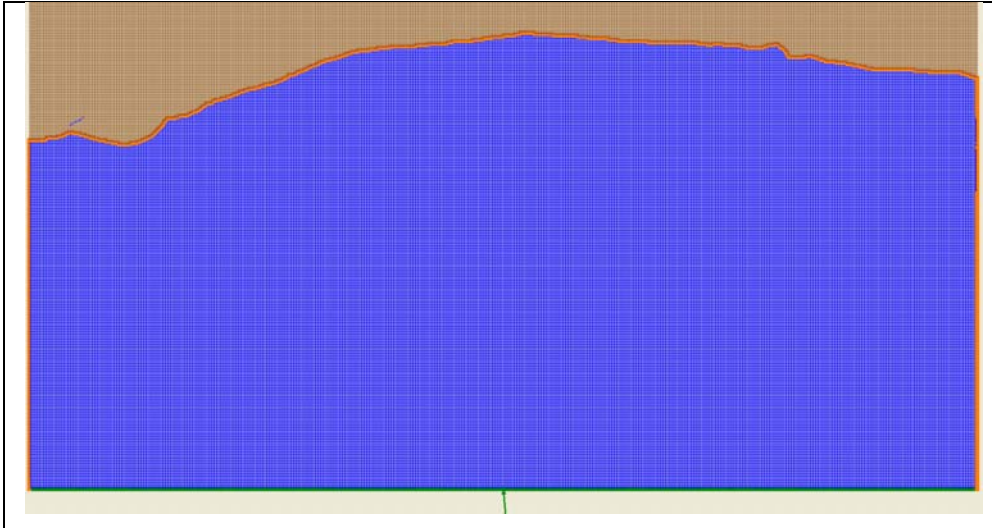


Figura 1 Configuración de playa sin obra

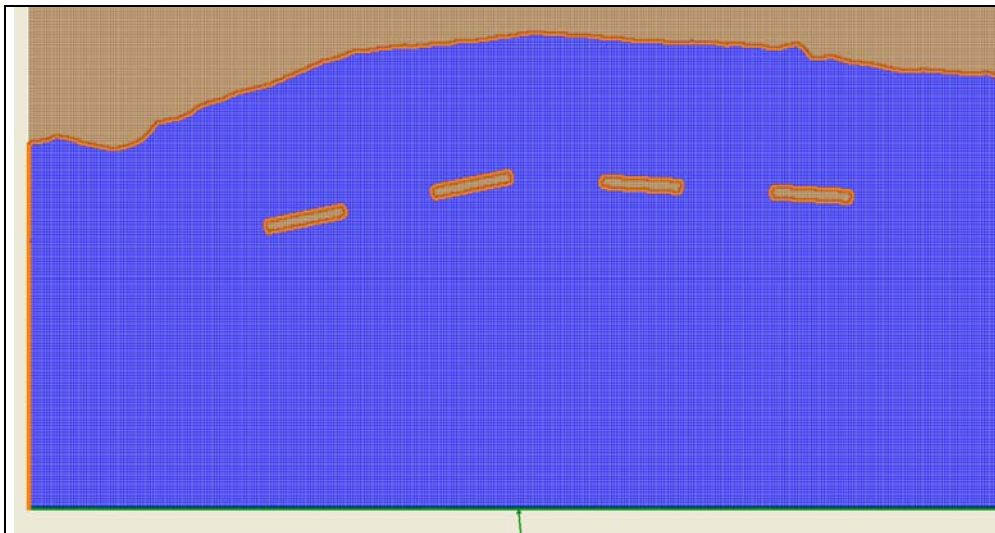


Figura 2. Configuración con cuatro rompeolas

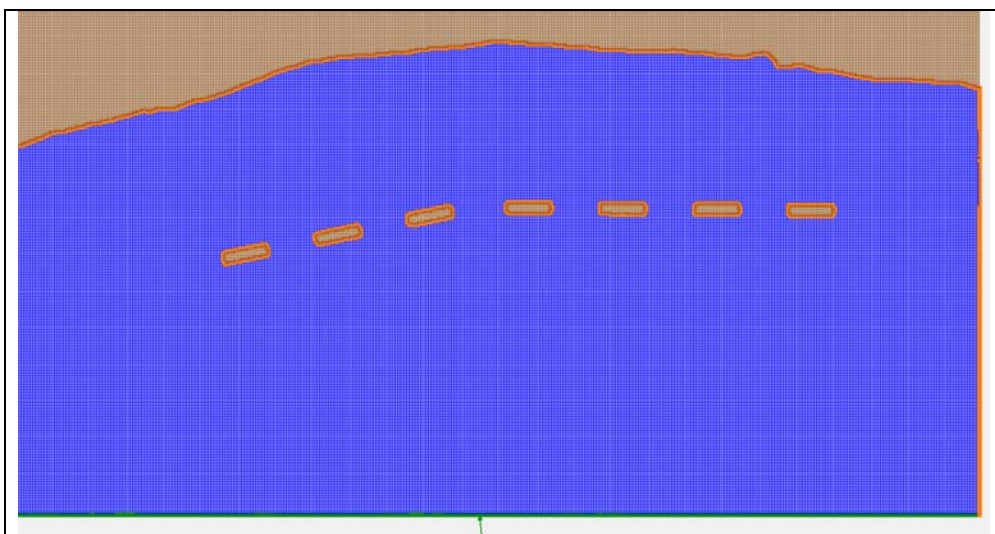


Figura 3. Configuración con siete rompeolas

4.4 Condiciones de contorno

Los bordes laterales del modelo, bordes “oceánicos”, fueron considerados como fronteras totalmente absorbentes (coeficiente de damping $\alpha=1$), permitiendo de esta manera el egreso del sistema de la energía reflejada por la presencia de las estructuras y la costa.

Para los contornos interiores se consideraron diferentes condiciones de reflexión, expresados en el modelo a través del coeficiente de amortiguamiento α . En este caso se utilizaron los siguientes valores:

- *Zona de playa:* $\alpha=0.8$ (altamente absorbente)
- *Rompeolas en bajamar (emergente):* $\alpha=0.45$ (parcialmente reflejante)
- *Rompeolas en pleamar (sumergido):* $\alpha=0.05-0.1$ (baja absorción)

La variación en la condición de absorción para la situación de pleamar depende del escenario analizado, siendo función no solo de las características físicas del rompeolas sino también del nivel de la marea y la altura de ola que pasa sobre la estructura.

Para la adopción de estos valores se tuvieron en cuenta recomendaciones bibliográficas, experiencia obtenida de estudios similares y, fundamentalmente, las mediciones realizadas en los ensayos de modelación física realizados en el canal de olas del INA (*Informe LHA- 314-01-10*).

4.5 Escenarios de cálculo

El análisis previo del clima de olas en la región fue suministrado por la empresa y permitió seleccionar un conjunto de escenarios de oleaje, representativos tanto de condiciones medias como de temporales frecuentes, utilizados para el desarrollo de las simulaciones numéricas presentadas en este informe.

Asimismo, debido a la conveniencia de evaluar el funcionamiento de los rompeolas tanto en su condición de emergentes como en la situación de estructuras sumergidas, se seleccionaron para el análisis tres niveles de mar diferente, a saber: $N = -0.41$ m (cota IGM representativa de la situación de bajamar media); $N = 1.01$ m (cota IGM representativa de la situación de pleamar astronómica máxima); y $N = 1.72$ m (cota IGM representativa de la situación de pleamar máxima asociada a $TR = 2$ años).

De la combinación de condiciones de oleaje y niveles de mar de interés surgieron los escenarios de análisis seleccionados para las simulaciones numéricas presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Escenarios simulados

Escenario	Nivel de mar (Cota IGM)	Hs (m)	Tp (s)	Dirección
Baja H12T6D135N-041	-0.41	1.20	6.0	135°
Baja H12T6D157N-041	-0.41	1.20	6.0	157.5°
Baja H12T6D170N-041	-0.41	1.20	6.0	170°
Plea H12T6D135N101	1.01	1.20	6.0	135°
Plea H12T6D170N101	1.01	1.20	6.0	170°
Plea H25T7D157N101	1.01	2.50	7.0	157.5°
Plea H12T6D157N172	1.72	2.50	7.0	157.5°
Plea H25T7D170N172	1.72	2.50	7.0	170°

En todos los casos, los valores presentados para Hs, Tp y dirección, corresponden a una ubicación donde la profundidad natural es del orden de los 10 m, coincidente con la zona definida como borde de la modelación desde la cual se propagan las olas hacia la costa.

La dirección de propagación se encuentra medida desde el Norte en sentido horario y desde donde provienen las olas, es decir que a las olas procedentes del Sudeste les corresponde un ángulo de 135° y a las procedentes del Sur 180°.

4.6 Selección de secciones de control

Para la evaluación de los resultados se seleccionaron un conjunto de perfiles que constituyeron secciones de control a partir de las cuales fue posible caracterizar las condiciones hidrodinámicas (alturas de ola y velocidad de la corriente) resultantes de cada simulación a lo largo de toda el área de interés. La Figura 4 muestra la ubicación del conjunto de perfiles seleccionados para dicho propósito.

Tal como indica la figura, los perfiles se distribuyeron a lo largo de la franja costera siendo numerados de 1 a 9 comenzando desde el sur. La separación entre cada perfil es del orden de 100 m, al igual que su extensión promedio, abarcando desde la zona de playa seca hasta una profundidad natural del orden de 2.5 m.

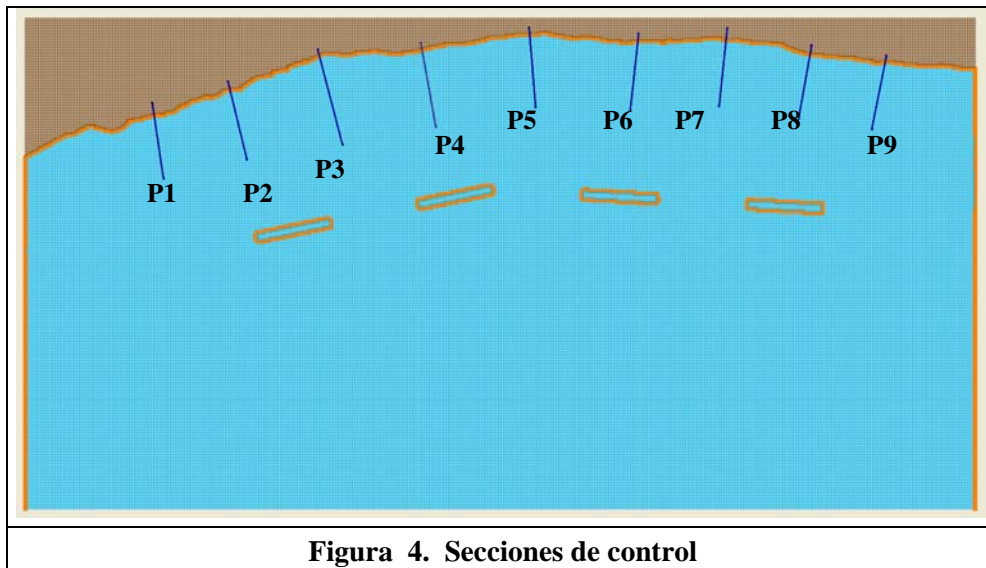


Figura 4. Secciones de control

4.7 Resultados de las simulaciones

Cada uno de los escenarios presentados en el apartado 4.5 fue objeto de una simulación numérica. Para cada aplicación del modelo, los espectros de energía del oleaje correspondientes fueron representados por la función TMA, y en cada caso se modificó convenientemente el paso temporal para el avance del cálculo de manera tal de controlar la estabilidad del mismo. Dada la discretización espacial de la grilla, y en función de los diferentes escenarios simulados (distintas celeridades de onda), los valores de Δt asociados al cálculo se mantuvieron entre 0.1 y 0.07 s.

La totalidad de los resultados obtenidos en la aplicación del modelo se encuentra en las Tablas 2 y 3, donde se presentan valores puntuales de altura significativa de ola (H_s) y velocidad de la corriente (V) sobre los perfiles seleccionados, para cada una de las tres configuraciones de planta analizadas. Los valores puntuales presentados en dichas tablas corresponden, en cada caso, al máximo valor de la variable observado sobre todo el perfil.

Así mismo, en el **ANEXO II** se presenta un conjunto de figuras en forma de gráfico de barras que muestran la comparación directa de los valores obtenidos en las tres configuraciones para todos los escenarios analizados.

Tabla 2. Resultado de la modelación. Valores máximos de Hs (m) sobre perfiles

Escenario	Configuración	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Baja H12T6D135N-041	Playa sin protección	1.41	1.24	1.47	1.34	1.22	0.83	1.14	0.91	1.20
	Cuatro Rompeolas	1.45	0.77	1.23	0.51	1.21	0.51	1.10	0.47	1.22
	Siete Rompeolas	1.47	0.94	0.63	0.50	0.94	0.80	0.83	0.45	1.16
Baja H12T6D157N-041	Playa sin protección	1.23	1.16	1.57	1.20	1.26	1.02	1.11	1.24	1.07
	Cuatro Rompeolas	1.14	1.07	0.78	0.59	1.13	0.29	1.13	0.29	1.12
	Siete Rompeolas	1.16	1.06	0.91	0.74	0.87	0.81	0.86	0.78	1.03
Baja H12T6D170N-041	Playa sin protección	1.01	1.31	1.28	1.17	1.23	0.96	1.00	1.19	1.03
	Cuatro Rompeolas	0.91	1.23	0.67	0.87	0.84	0.41	0.92	0.43	1.06
	Siete Rompeolas	0.88	1.15	0.99	0.71	0.90	0.67	0.86	1.06	0.93
Plea H12T6D135N101	Playa sin protección	1.40	1.27	1.55	1.23	1.32	1.03	1.40	1.01	1.40
	Cuatro Rompeolas	1.42	0.87	1.21	0.72	1.28	0.68	1.10	0.83	1.39
	Siete Rompeolas	1.43	0.64	1.04	0.83	1.33	1.17	1.33	1.10	1.39
Plea H12T6D170N101	Playa sin protección	0.93	1.29	1.37	1.17	1.19	0.99	1.05	1.21	1.06
	Cuatro Rompeolas	0.79	1.25	1.17	1.10	0.94	0.92	0.84	0.89	0.98
	Siete Rompeolas	0.74	1.24	1.23	1.02	1.08	0.66	0.78	0.95	1.05
Plea H25T7D157N101	Playa sin protección	1.96	2.46	2.36	2.37	1.90	2.14	1.88	1.76	1.79
	Cuatro Rompeolas	1.97	2.20	1.33	1.50	1.90	0.70	1.84	0.99	1.79
	Siete Rompeolas	1.97	2.16	1.12	1.40	1.53	1.36	1.49	1.57	1.86
Plea H12T6D157N172	Playa sin protección	1.89	2.62	2.57	2.36	2.47	2.32	2.22	2.50	2.42
	Cuatro Rompeolas	1.91	2.28	1.76	1.77	1.81	0.93	2.14	1.31	2.26
	Siete Rompeolas	1.94	2.27	1.75	1.38	1.77	1.43	1.58	1.76	2.07
Plea H25T7D170N172	Playa sin protección	1.65	2.39	2.45	2.67	2.46	2.38	2.08	2.28	1.95
	Cuatro Rompeolas	1.57	2.28	1.47	1.99	1.51	1.48	1.52	1.16	1.81
	Siete Rompeolas	1.57	2.23	1.89	1.63	1.71	1.40	1.15	1.14	1.68

Tabla 3. Resultado de la modelación. Valores máximos de V(m/s) sobre perfiles

Escenario	Configuración	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Baja H12T6D135N-041	Playa sin protección	0.58	0.34	0.38	0.18	0.24	0.47	0.27	0.38	0.25
	Cuatro Rompeolas	0.60	0.66	0.31	0.32	0.24	0.52	0.41	0.53	0.29
	Siete Rompeolas	0.40	0.47	0.28	0.31	0.23	0.40	0.40	0.42	0.33
Baja H12T6D157N-041	Playa sin protección	0.54	0.59	0.23	0.46	0.28	0.39	0.23	0.27	0.25
	Cuatro Rompeolas	0.44	0.69	0.33	0.65	0.40	0.33	0.38	0.48	0.42
	Siete Rompeolas	0.24	0.77	0.26	0.20	0.22	0.33	0.15	0.25	0.44
Baja H12T6D170N-041	Playa sin protección	0.49	0.56	0.49	0.55	0.42	0.48	0.35	0.26	0.30
	Cuatro Rompeolas	0.54	0.47	0.36	0.46	0.41	0.52	0.42	0.46	0.43
	Siete Rompeolas	0.15	0.50	0.34	0.44	0.24	0.27	0.18	0.18	0.49
Plea H12T6D135N101	Playa sin protección	0.45	0.43	0.36	0.18	0.36	0.50	0.20	0.73	0.49
	Cuatro Rompeolas	0.48	0.57	0.15	0.13	0.12	0.51	0.29	0.81	0.51
	Siete Rompeolas	0.19	0.50	0.34	0.25	0.19	0.07	0.15	0.65	0.33
Plea H12T6D170N101	Playa sin protección	0.15	0.47	0.47	0.57	0.33	0.39	0.34	0.29	0.23
	Cuatro Rompeolas	0.63	0.47	0.43	0.45	0.33	0.58	0.27	0.67	0.17
	Siete Rompeolas	0.10	0.51	0.48	0.23	0.36	0.51	0.77	0.68	0.43
Plea H25T7D157N101	Playa sin protección	0.51	0.66	0.62	0.57	0.35	0.45	0.25	0.27	0.33
	Cuatro Rompeolas	0.47	0.80	0.69	0.76	0.44	0.51	0.56	0.78	0.61
	Siete Rompeolas	0.22	0.69	0.81	0.48	0.24	0.35	0.19	0.42	0.57
Plea H12T6D157N172	Playa sin protección	0.45	0.63	0.84	0.82	0.73	0.56	0.27	0.27	0.29
	Cuatro Rompeolas	0.36	0.80	0.68	0.94	0.62	0.76	0.41	0.70	0.66
	Siete Rompeolas	0.14	0.72	0.82	0.85	0.62	0.58	0.21	0.58	0.63
Plea H25T7D170N172	Playa sin protección	0.19	0.59	0.93	0.98	0.90	0.65	0.49	0.32	0.37
	Cuatro Rompeolas	0.56	0.71	0.89	0.61	0.77	0.92	0.44	0.73	0.48
	Siete Rompeolas	0.14	0.56	0.90	0.66	0.30	0.91	0.73	0.46	0.40

El análisis comparativo de estos resultados, en líneas generales, da cuenta de un importante grado de atenuación en las alturas de ola que llegan hasta el área costera de interés para las configuraciones de ambos sistemas de rompeolas frente a la situación actual de la playa sin protección. Si bien se observan variaciones en cuanto al grado de atenuación del oleaje correspondiente a cada escenario simulado, es importante señalar que este fenómeno se presenta

para las tres direcciones de incidencia analizadas, y se da tanto en tanto para condiciones medias como para situaciones de temporal frecuente..

Las Figuras 5 a 10 muestran los resultados derivados del proceso de modelación presentando los campos de alturas de olas obtenidos para dos escenarios, señalando la comparación entre la situación actual y la correspondiente a ambas alternativas de obra. Los escenarios ilustrados representan una condición de oleaje medio con bajamar y un temporal frecuente con pleamar, respectivamente.

Con respecto a las corrientes generadas por la acción del oleaje, los valores presentados en la Tabla 3 muestran en algunos casos puntuales un incremento de intensidades para las configuraciones con rompeolas respecto de la situación actual de playa.

En este aspecto debe señalarse que dichos incrementos, cuya magnitud no representan un aumento significativo de la intensidad de la corriente, se encuentran asociados a una modificación general del patrón de circulación de la corriente, inducido por la presencia de las estructuras y los efectos que éstas generan sobre la propagación del oleaje (refracción, difracción y rotura).

Con el propósito de ilustrar lo mencionado en el párrafo anterior, las Figuras 11 a 16 muestran los resultados de la modelación presentando los campos de corrientes generados por acción del oleaje para dos escenarios diferentes, señalando la comparación entre la situación actual y la correspondiente a ambas alternativas de obra. En estas figuras se puede apreciar tanto la intensidad de las corrientes generadas como la dirección de las mismas representadas en forma de campo de vectores.

Del mismo modo que para el caso de la distribución de altura de olas, los escenarios ilustrados se encuentran asociados a una condición de oleaje medio con bajamar y un temporal frecuente con pleamar, respectivamente.

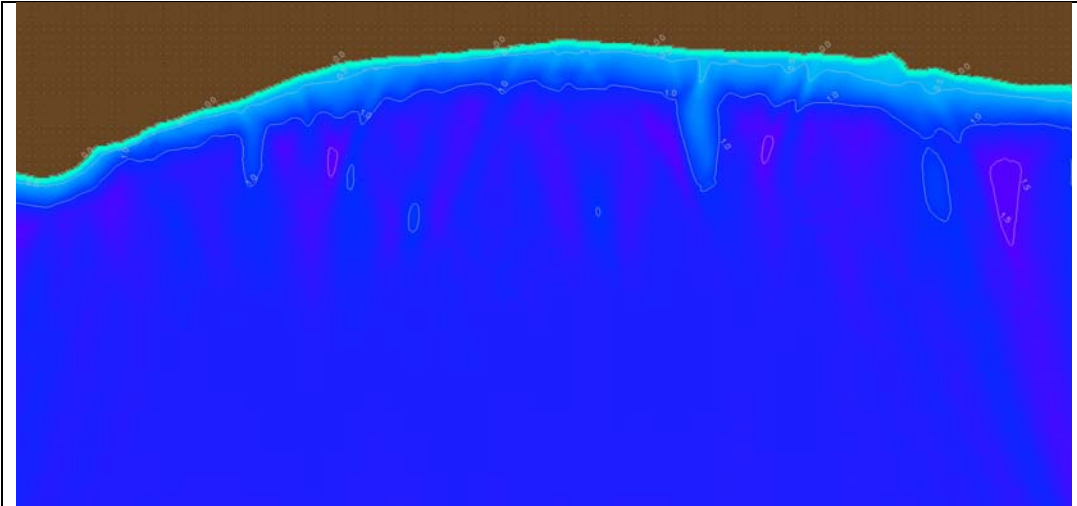


Figura 5. Alturas de ola para el escenario Baja H12T6D135N-041 . Situación actual

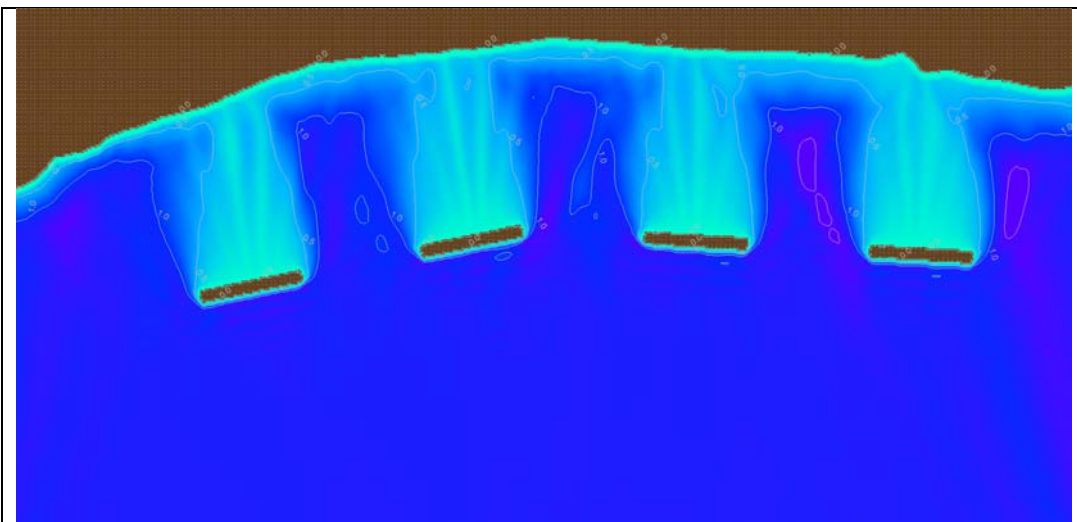


Figura 6. Alturas de ola para el escenario Baja H12T6D135N-041. Cuatro Rompeolas

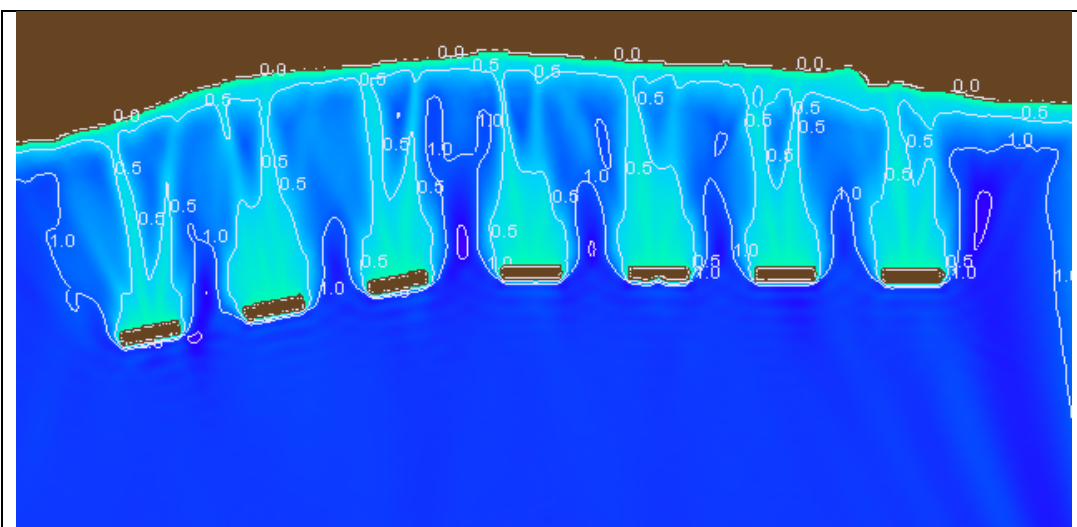


Figura 7. Alturas de ola para el escenario Baja H12T6D135N-041. Siete Rompeolas

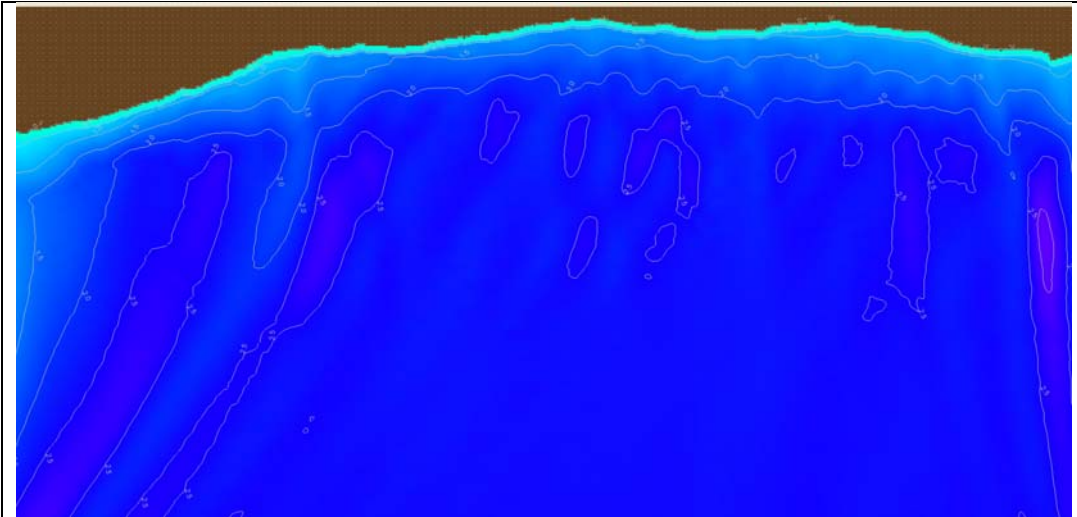


Figura 8. Alturas de ola para el escenario Plea H25T7D157N172. Situación actual

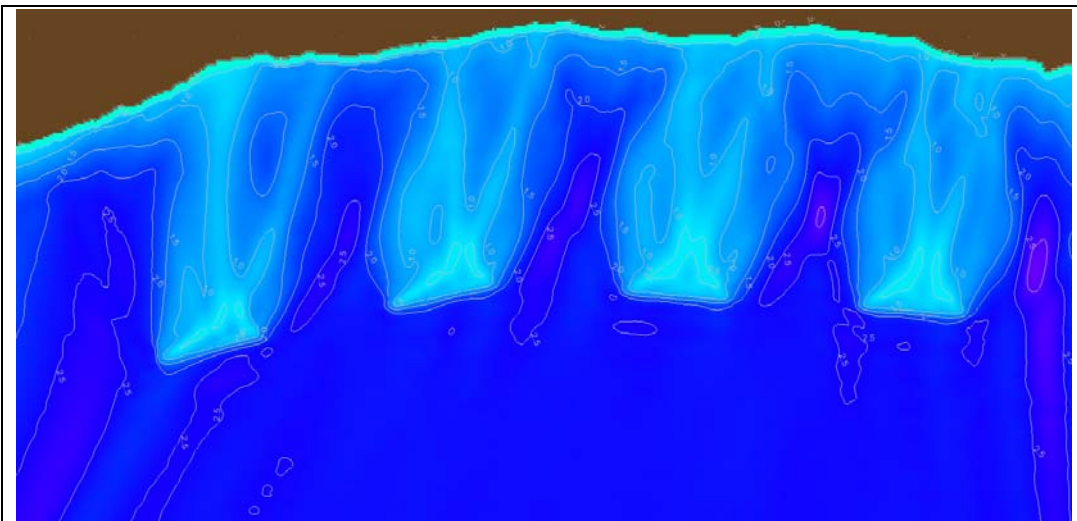


Figura 9. Alturas de ola para el escenario Plea H25T7D157N172. Cuatro Rompeolas

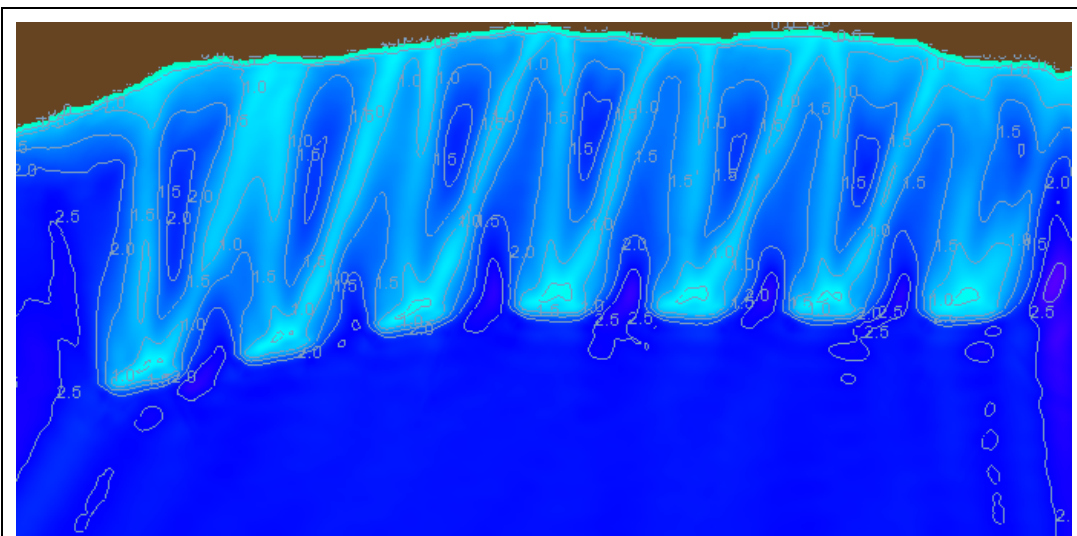


Figura 10. Alturas de ola para el escenario Plea H25T7D157N172. Siete Rompeolas

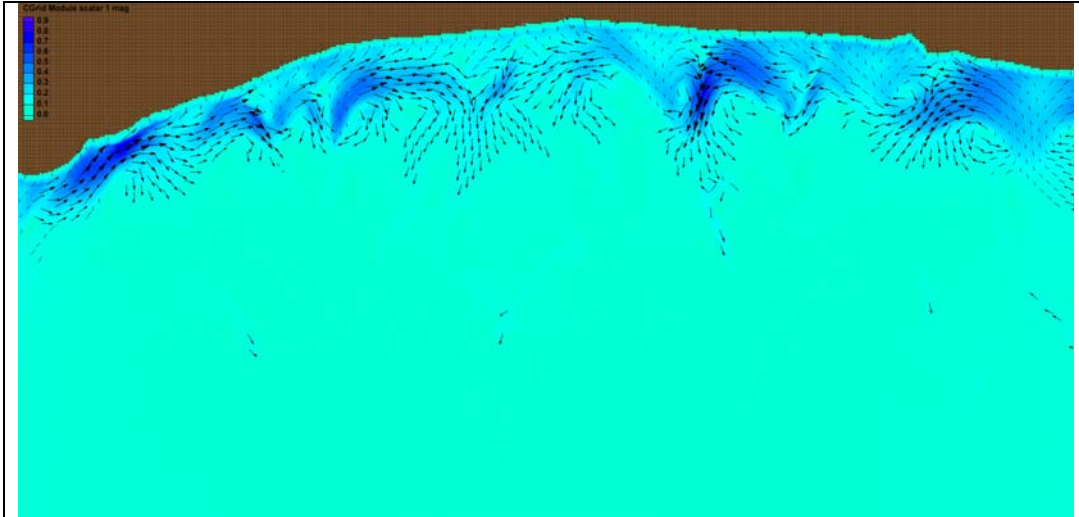


Figura 11. Corrientes para el escenario Baja H12T6D135N-041. Situación actual

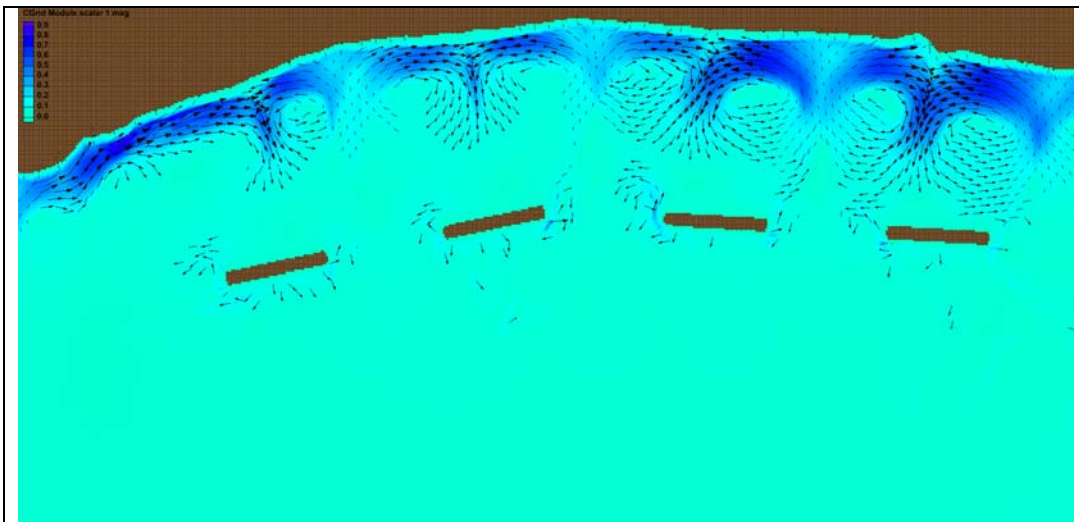


Figura 12. Corrientes para el escenario Baja H12T6D135N-041. Situación actual

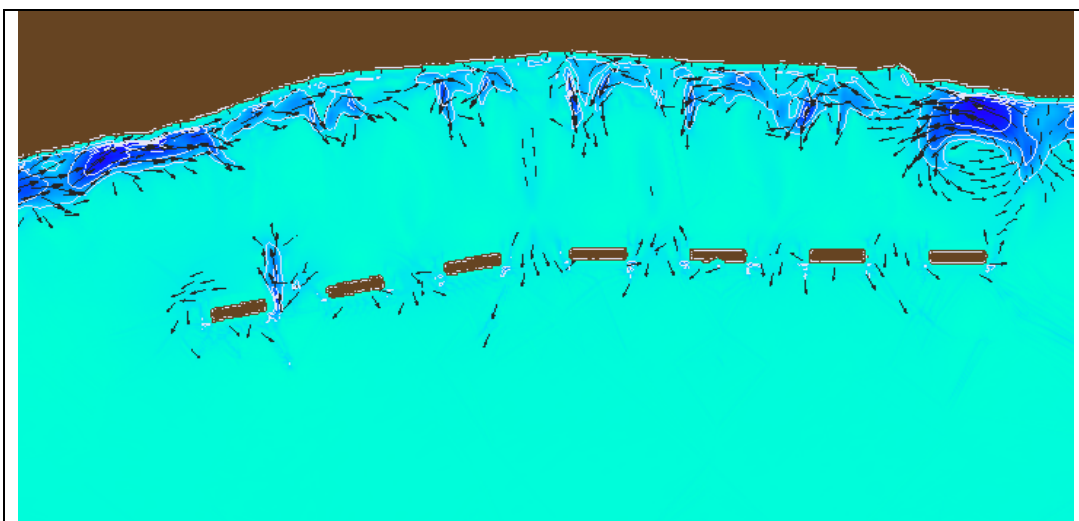


Figura 13. Corrientes para el escenario Baja H12T6D135N-041. Situación actual

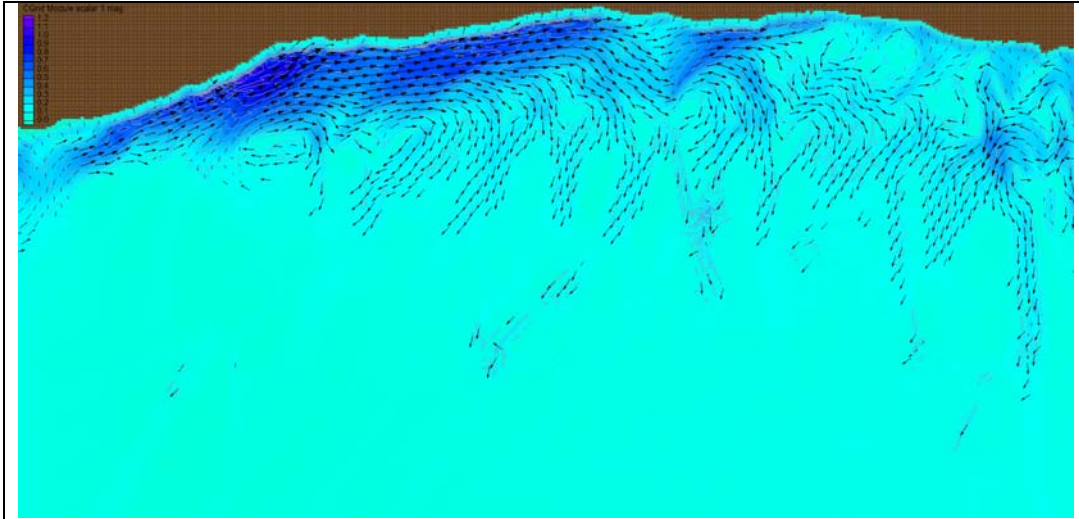


Figura 14. Corrientes para el escenario Plea H25T7D157N172. Situación actual

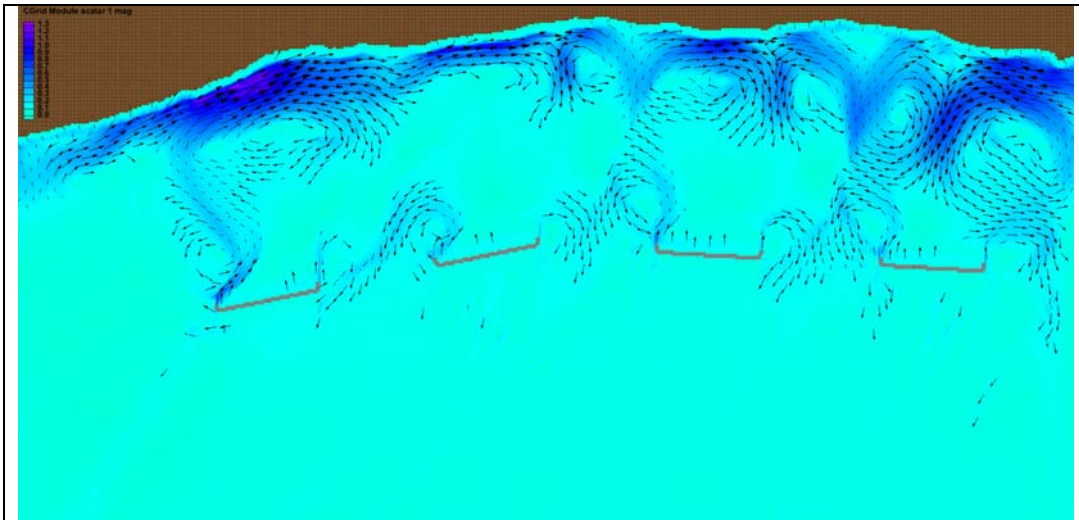


Figura 15. Corrientes para el escenario Plea H25T7D157N172. Cuatro Rompeolas

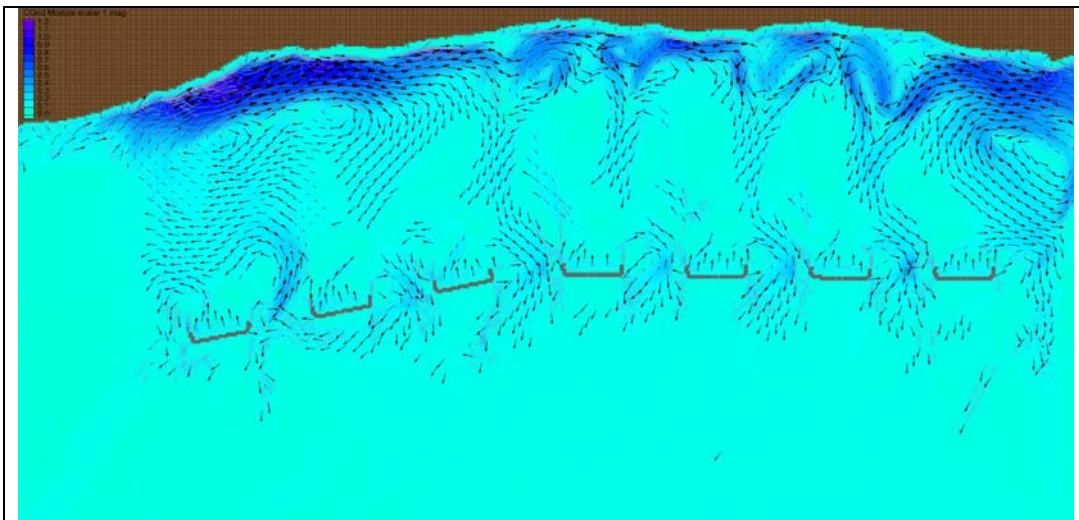


Figura 16. Corrientes para el escenario Plea H25T7D157N172. Siete Rompeolas

5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS

Con el propósito de evaluar en forma directa la incidencia de las dos alternativas propuestas para la implementación del sistema de rompeolas costeros se procedió al cálculo de los porcentajes de reducción de alturas de ola generados por cada uno ellos en referencia a la condición actual de playa.

Consecuentemente, contando con los valores de H_s (m) presentados en la Tabla 2, referidos al valor máximo de altura de ola sobre cada perfil para los distintos escenarios analizados, se computaron los valores porcentuales de reducción de la siguiente manera:

$$Dif = \frac{H_{playaActual} - H_{rompeola}}{H_{playaActual}} \times 100$$

El resultado del cómputo para ambas alternativas, contemplando la totalidad de perfiles y escenarios simulados, es presentado en la Tabla 4.

Tabla 4. Diferencias porcentuales de reducción de altura de ola para cada configuración

Escenario	Configuración	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Baja H12T6D135N-041	Cuatro Rompeolas	-2.9	38.1	16.5	61.7	0.6	38.6	3.6	48.4	-1.3
	Siete Rompeolas	-3.7	24.2	57.4	62.5	22.4	3.4	27.4	50.2	3.8
Baja H12T6D157N-041	Cuatro Rompeolas	6.8	8.0	50.5	50.5	10.3	71.7	-1.9	76.8	-4.9
	Siete Rompeolas	5.4	8.8	42.2	37.8	31.2	20.1	22.5	37.0	3.3
Baja H12T6D170N-041	Cuatro Rompeolas	9.6	5.8	47.6	26.1	32.0	57.6	7.7	64.2	-2.1
	Siete Rompeolas	13.4	12.3	22.9	39.8	27.4	30.4	14.0	10.5	10.2
Plea H12T6D135N101	Cuatro Rompeolas	-1.0	31.6	22.3	41.6	2.8	33.6	21.8	17.5	0.7
	Siete Rompeolas	-2.1	50.0	32.8	32.2	-0.5	-13.7	5.2	-8.6	0.7
Plea H12T6D170N101	Cuatro Rompeolas	14.9	3.4	14.2	6.4	21.3	6.7	19.9	26.6	8.1
	Siete Rompeolas	20.5	4.2	10.0	13.6	9.5	33.8	25.3	21.9	1.3
Plea H25T7D157N101	Cuatro Rompeolas	-0.3	10.7	43.5	36.7	-0.1	67.5	2.6	44.0	-0.2
	Siete Rompeolas	-0.5	12.1	52.7	40.8	19.5	36.4	20.8	10.6	-4.2
Plea H25T7D157N172	Cuatro Rompeolas	-1.1	13.1	31.6	25.0	26.9	60.1	3.8	47.8	6.7
	Siete Rompeolas	-2.6	13.4	32.1	41.4	28.3	38.4	29.0	29.5	14.8
Plea H25T7D170N172	Cuatro Rompeolas	4.8	4.6	39.8	25.7	38.7	37.8	26.9	49.3	7.5
	Siete Rompeolas	4.7	6.6	22.7	39.1	30.3	41.3	44.6	50.2	13.8

Los valores presentados en la Tabla 4 permiten apreciar que sobre los perfiles ubicados en los extremos del tramo costero analizado (P1 y P9), los porcentaje de reducción del oleaje son significativamente menores que en la zona central, e incluso, dependiendo del escenario, pueden aparecer valores negativos que indican un leve incremento de la altura de ola respecto de la situación actual de la playa.

Para los perfiles P2 a P8 , los porcentajes de reducción del oleaje son elevados y, dependiendo del escenario simulado, pueden ser mayores en una u otra configuración de rompeolas.

En efecto, promediando los porcentajes de reducción observados sobre los nueve perfiles para un mismo escenario se obtienen los valores medios presentados en la Tabla 5, lo cual resulta un indicador del grado de atenuación de la energía del oleaje que inducen estas configuraciones de rompeolas sobre la franja costera frente a la ocurrencia de cada escenario.

Tabla 5. Reducciones promedio para cada escenario

Escenario	4 Rompeolas	7 Rompeolas
Baja H12T6D135N-041	22.6	27.5
Baja H12T6D157N-041	29.8	23.1
Baja H12T6D170N-041	27.6	20.1
Plea H12T6D135N101	19.0	10.7
Plea H12T6D170N101	13.5	15.6
Plea H25T7D157N101	22.7	20.9
Plea H25T7D157N172	23.8	24.9
Plea H25T7D170N172	26.1	28.1
Promedio total=	23.1	21.4

Como era de esperar, los escenarios correspondientes a un estado de bajamar presentan valores elevados de reducción de altura de ola dado que bajo esta situación los rompeolas poseen su cota de coronamiento por encima del nivel del mar, actuando como una barrera de cierre parcial frente al avance de las olas y reflejando gran parte de la energía propagada por las mismas.

Bajo condiciones de pleamar, con los rompeolas totalmente sumergidos, dado un escenario de oleaje determinado, existirán olas capaces de propagarse por encima de estas estructuras y otras que disiparán gran parte de su energía, principalmente, en forma de rotura. Esto se ve reflejado en la diferencia observada entre los valores de reducción correspondientes a las filas 4 y 5 de la Tabla 5 (asociados a valores de $H_s=1.2\text{m}$) y los valores correspondientes a las filas 7, 8 y 9 (asociados a valores de $H_s=2.5\text{m}$).

Esta situación resulta particularmente interesante dado que señala que para condiciones de temporal, con alturas de olas importantes, la acción de los rompeolas conduce a un amortiguamiento mayor de la energía del oleaje incidente.

Observando el promedio total de la Tabla 5 asociado a cada una de las dos configuraciones se infiere en primera medida que la alternativa de Cuatro rompeolas (reducción total de 23.1%) presenta ventajas sobre la alternativa de Siete Rompeolas (reducción total de 21.4%) desde el punto de vista de atenuación de la altura de olas. Cabe señalar que una selección distinta de perfiles de control podría haber generado resultados levemente diferentes.

Respecto de las corrientes generadas por acción del oleaje la comparación directa entre los resultados obtenidos para las dos configuraciones de rompeolas no resulta tan evidente como para las alturas de ola, debido a que, como se mencionó anteriormente, la presencia de estas estructuras modifica los patrones de circulación, alterando no solo los valores de intensidad sino también direcciones y sentido de circulación.

Como ejemplo de esto, pueden observarse las Figuras 14 a 16, donde se han presentado los campos de corrientes obtenidos sobre la situación actual de playa y para ambas alternativas de obra correspondientes al escenario Plea H25T7D157N172, el cual presentaba en la Tabla 3 el valor de intensidad más elevado asociado a una de las configuraciones de rompeolas ($V=0.94$ m/s en P4 para 4 rompeolas).

Mas allá del valioso aporte que representan los valores de intensidad de corriente señalados en la Tabla 3 en cuanto a la caracterización hidrodinámica del área modelada, cabe señalar que dentro del conjunto de situaciones simuladas se obtuvo como valor máximo para esta variable en la condición actual de la playa el valor de $V=1.15$ m/s, correspondiente al escenario Plea H25T7D157N172. Asimismo, la presencia de las estructuras induce incrementos transforman estos valores en $V=1.32$ m/s y $V=1.25$ m/s para las configuraciones de 4 y 7 rompeolas, respectivamente.

Siendo estos los valores más elevados que se obtuvieron para el conjunto total de escenarios simulados, puede inferirse que de acuerdo con los resultados de esta modelación la implantación de los rompeolas sobre el área costera no induciría aumentos sustanciales en la intensidad de las corrientes en el sector de playa.

Por otra parte, la comparación entre las Figuras 12 y 13, como también entre 15 y 16, permite apreciar que en el sector de apertura entre rompeolas la configuración correspondiente a siete elementos genera corrientes de mayor intensidad que las que observadas para el conjunto de cuatro. Estos valores llega a ser de 0.35 m/s para siete rompeolas contra 0.20 m/s para el esquema de cuatro, en el peor de los casos. Si bien las diferencias que se obtienen en esta comparación no resultan incrementos de gran magnitud, esta circunstancia debería ser considerada puesto que puede ser un indicador de una tendencia desfavorable para el esquema de siete rompeolas.

6 CONCLUSIONES FINALES

En este informe se presentó la descripción y el desarrollo de las tareas destinadas a la caracterización hidrodinámica del frente costero sobre el cual se prevé la construcción de un sistema de rompeolas aislados paralelos a la línea de costa.

Mediante la simulación numérica de un conjunto amplio de escenarios de propagación de oleaje, contemplando diferentes direcciones de propagación, alturas de ola y nivel del mar; se evaluaron dos alternativas de obra comparando los resultados obtenidos en cada caso con la configuración actual de playa.

En función de los casos analizados pudo establecerse que es esperable que la presencia de un sistema de rompeolas en la zona de estudio produzca una importante reducción de las alturas de ola que se propagan hasta la costa. En efecto, los porcentajes promedio observados en este informe representan valores que superan el 20 %, lo cual representa una reducción muy importante en cuanto a la energía del oleaje que incide sobre la playa.

Por otra parte, se comprobó que la reducción de la energía propagada por el oleaje se produce tanto en condiciones de bajamar como de pleamar, destacando que bajo condiciones de temporal, con alturas de olas importantes, la acción de los rompeolas conduce a un amortiguamiento importante de la energía del oleaje incidente por efectos disipación, fundamentalmente rotura.

Asimismo, por su interacción con el oleaje, la presencia de estas estructuras modifica los patrones de circulación de corrientes que pueden establecerse en la situación actual, alterando no solo los valores de intensidad sino también direcciones y sentido de circulación.

En este aspecto, considerando el conjunto total de escenarios simulados puede inferirse que de acuerdo con los resultados de esta modelación la implantación de los rompeolas sobre el área costera no induciría aumentos sustanciales en la intensidad de las corrientes en el sector de playa. En referencia a las corrientes generadas en el entorno propio de las estructuras, la alternativa de cuatro rompeolas mostró resultados más satisfactorios que la de siete, mostrando valores de menor intensidad en la apertura conformada entre estructuras debido a la mayor separación de las mismas.

7 REFERENCIAS

Rizzo – Alpa Vial. *Obras de protección y recuperación de playas. Proyecto Ejecutivo: Informe de avance I*, Septiembre 2010.

Rizzo – Alpa Vial. *Obras de protección y recuperación de playas. Proyecto Ejecutivo: Informe Final*, Diciembre 2010.

Informe INA-LHA 314-01-10. *Sistema de rompeolas para la defensa costera de Mar del plata. Estudio mediante modelación física de la transmisión de oleaje y estabilidad de coraza*. Noviembre 2010.

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