

## APLICACIONES DE MODELOS NUMÉRICOS A UN ESTUDIO DE PREDISEÑO DE UN SISTEMA DE DIQUES EXENTOS EN EL LITORAL ARGENTINO

**Paolo Gyssels<sup>a</sup>, Matías Ragessi, Andrés Rodríguez, Julio Cardini<sup>b</sup> y Mauro Campos.**

<sup>a</sup>*Instituto Superior de Recursos Hídricos ISRH/Laboratorio de Hidráulica LH, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, 5000 Córdoba, Argentina, [pgyssels@isrh.unc.edu.ar](mailto:pgyssels@isrh.unc.edu.ar),  
[http://www.secyt.unc.edu.ar/inst\\_rec\\_hid/](http://www.secyt.unc.edu.ar/inst_rec_hid/)*

<sup>b</sup>*Serman & Asociados s.a., Blanco Encalada, 2387 – 17 F Buenos Aires, Argentina,  
[cardini@serman.com.ar](mailto:cardini@serman.com.ar), <http://www.serman.com.ar/>*

**Palabras claves:** Hidrodinámica, dinámica sedimentaria, corto plazo, largo plazo, diques exentos.

**Resumen.** El frente costero urbano al sur de Punta Mogotes, en la ciudad de Mar del Plata, padece desde hace años un fenómeno de erosión progresiva debido a factores naturales y de origen antrópico. Se estudia la mejora de un anteproyecto existente de una obra de Protección Costera con un sistema de rompeolas aislados (diques exentos) paralelos a la línea de costa, y una recuperación de la superficie de playa. Se ha estudiado la hidrodinámica y la dinámica sedimentaria, tanto en la situación actual, como en la situación de diseño, mediante la utilización de modelos numéricos de corto plazo (en la escala de horas y días) y largo plazo (en la escala de años). A corto plazo se ha estudiado el comportamiento del sistema y la estabilidad del mismo frente a eventos extremos. A largo plazo se ha estudiado el equilibrio del sistema frente a una nueva configuración.

## 1 INTRODUCCIÓN

El frente costero urbano al sur de Punta Mogotes, al sur del Faro, en el tramo que va de Playa La Serena a Playa Acantilados, en la ciudad de Mar del Plata padece desde hace años un fenómeno de erosión progresiva que produce en principio la pérdida de superficie de las playas y que gradualmente erosiona los acantilados subyacentes como consecuencia de la acción combinada del oleaje en tormentas, del ascenso de los niveles del mar por causas meteorológicas, y de la intervención humana.

En base a un estudio histórico, se determinó que las playas en cuestión han sufrido fuertes procesos erosivos, en mayor o menor medida, en los últimos 50 años debido a:

- Extracciones de arena, en la playa seca, para la construcción.
- Fuertes tormentas desde el cuadrante SE y, en consecuencia, la acción erosiva de las olas incidentes.
- Conformación física de la costa (ancho y pendiente de la plataforma entoscada), y configuración y composición litológica del litoral.
- Fijación de las dunas y pérdida del material de reserva natural de la playa.
- Urbanizaciones costeras.
- Construcción de espigones transversales a la costa que interrumpen (parcialmente) el transporte litoral (incluyendo los diques de los puertos y de protección de zonas de playa).
- Dragados de las barras de arenas en las bocanetas de los puertos y eliminación del material dragado del sistema sedimentario costero (sin by-pass de arena).

En el Plan Director de Protección de Costas, que abarca el frente marítimo del partido de General Pueyrredón, se conviene la realización de un conjunto de obras denominadas “diques exentos”, para frenar la erosión del tramo costero y permitir la regeneración y el mantenimiento de una playa en la misma zona. Los diques exentos (“Offshore Breakwaters”, ver [Figura 1](#)) son estructuras generalmente en escollera dispuestas en serie a una cierta distancia de la costa dejando entre ellos pequeñas entradas (“gaps”) que hacen que se reduzca la energía del oleaje y por consiguiente favorecen al relleno de la playa por deposición de sedimentos.

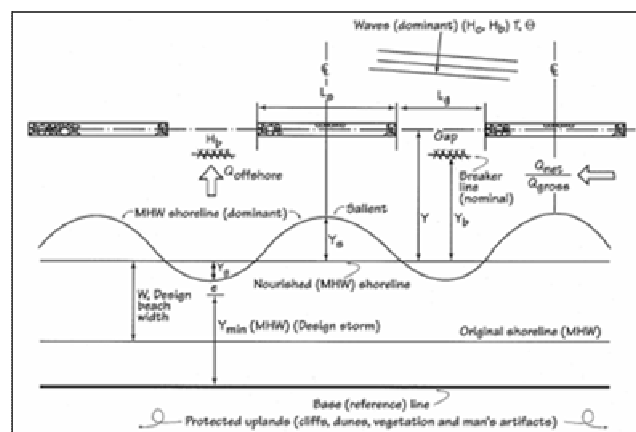


Figura 1. Vista en planta de un esquema de diques rompeolas exentos ([Coastal Engineering Manual](#)).

Si estas estructuras están cerca de la playa se forman salientes que llegan hasta la estructura en cuestión formando tómbolos, y si están lejos esas salientes no llegan a la estructura y no interrumpen el paso del sedimento litoral, por lo cual tienen menor impacto sobre la dinámica sedimentaria. El trabajo ha tenido como objetivo principal ofrecer un asesoramiento al

“Proyecto de Sistemas de Rompeolas Aislados al Sur de Punta Mogotes en la ciudad de Mar del Plata” (ver [Figura 2](#)) y proponer la optimización del anteproyecto existente ([M.I.V.S.P., 2005](#)).

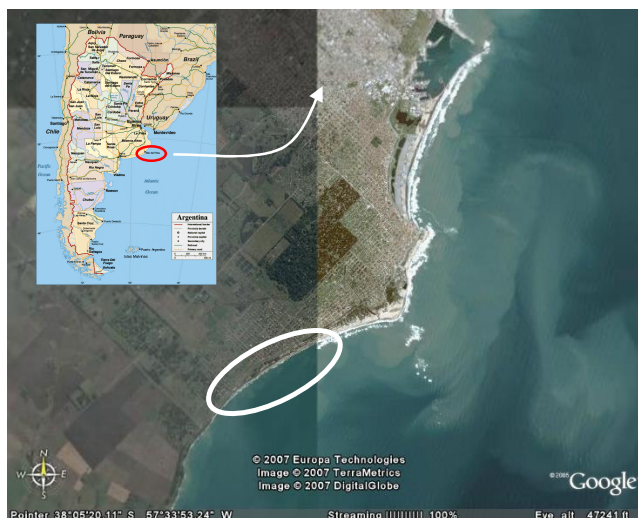


Figura 2. Imagen satelital de Mar del Plata y Punta Mogotes. Con el círculo blanco se evidencia la zona de estudio.

El planteamiento de construir, según el diseño inicial, 10 diques exentos, se realizó con la intención de detener la erosión y facilitar la reconstrucción de una playa. Los rompeolas se ubicarán a una distancia aproximada de 200 m desde la costa, lo que implicará un desafío en cuanto a la metodología constructiva y equipos necesarios, a fin de realizar las obras.

## 2 METODOLOGÍA

El éxito de un diseño de regeneración y defensa de una playa depende de nuestra capacidad a la hora de entender las causas que originan el estado de erosión de la playa en estudio, así como de nuestra capacidad a la hora de evaluar los procesos costeros que han dado lugar a dicha situación. La metodología de diseño debe explicitar al máximo los procesos involucrados, obligando al análisis de los mismos en las escalas espaciales y temporales que sean relevantes.

Toda playa cumple, en mayor o menor medida, las siguientes funciones ([G.I.O.C., 2001](#)):

- Defensa de costa
- Hábitat de flora y fauna
- Uso lúdico humano

La necesidad de regeneración está siempre originada por la falta de cumplimiento de alguna de estas funciones, y su objetivo es el restablecimiento de dicha función, al menos durante un plazo de tiempo. Para ello, se plantea el estudio de las defensas costeras a dos escalas de tiempo: a corto plazo (escala de horas-días) y a largo plazo (escala de meses y años).

El objetivo del diseño a corto plazo es doble: por un lado analizar la respuesta de la playa ante la acción de un evento y verificar que se cumplan los requisitos de funcionalidad, y por otro, aportar información sobre los procesos costeros (sistema de corrientes, transporte potencial,...) que permitan entender la morfodinámica de la playa, realizar un diagnóstico de la misma y proponer alternativas de solución.

El objetivo del análisis a largo plazo es determinar cuál será la forma final (planta-perfil) de la playa y la evolución temporal de dicha forma en escala de meses y años, a fin de asegurar que la funcionalidad de la playa se mantiene durante la vida útil de la misma. Asimismo, se trata de evaluar el impacto sobre la dinámica sedimentaria y los posibles efectos sobre la erosión y la sedimentación en otros tramos de costa debido a la presencia de las estructuras y durante su fase constructiva.

Para el estudio a corto y largo plazo se utilizan modelos numéricos que trabajan a diferentes escalas de tiempo debido a que en la actualidad no existe ningún modelo numérico de dinámica sedimentaria que pueda ofrecer soluciones a todas las escalas de tiempo, debido a la incertidumbre en las formulaciones de transporte y a la capacidad de cálculo de los ordenadores actuales.

En este trabajo se presentan los modelos numéricos para el estudio de la evolución en planta de las playas y de la línea de costa.

### 3 MODELOS NUMÉRICOS

La evolución a corto plazo de la forma en planta de una playa puede ser analizada por medio de la utilización conjunta de una serie de modelos numéricos que interactúan entre sí. Estos modelos incluyen:

- Propagación de oleaje (OLUCA)
- Sistema de corrientes (COPLA)
- Transporte de sedimentos y evolución morfológica (MOPLA = OLUCA+COPLA+EROS)

Estos modelos están incorporados en el Sistema de Modelado Costero (SMC), utilizado en el presente estudio (G.I.O.C., 2001).

Las formulaciones existentes para la escala de tiempo a largo plazo no intentan analizar los procesos (por ejemplo, transporte de sedimentos ola a ola) sino magnitudes agregadas de los mismos. Para el análisis del perfil y de la planta de una playa dos son los tipos de modelos más utilizados (G.I.O.C., 2001):

- a) modelos basados en la hipótesis de equilibrio y
- b) modelos basados en la ecuación de la difusión.

La hipótesis de equilibrio postula que si la acción de las dinámicas actuantes se mantiene indefinidamente, la forma de la playa alcanzará una posición final constante, en equilibrio con dichas dinámicas.

La ecuación de la difusión se basa, en cierto modo, en el mismo concepto y establece que la forma de una playa tiende hacia el equilibrio tanto más rápido cuanto más lejos se encuentre de dicha posición de equilibrio. Un ejemplo de estos modelos, son los modelos de evolución de la línea de costa, del tipo GENESIS, empleado en este trabajo.

#### 3.1 Modelos a Corto Plazo

MODELO OLUCA (Propagación del oleaje monocromático y espectral).

Es un modelo combinado de refracción/difracción, incluye ambos efectos explícitamente y, por lo tanto, permite el modelado del oleaje en aquellas regiones donde la batimetría es irregular y/o donde los efectos de la difracción son importantes. Es un modelo desarrollado partiendo de la ecuación de la Pendiente Suave en forma elíptica de [Berkhoff \(1972\)](#) (ver ecuación 1), aproximándola a una ecuación de forma parabólica, que no tiene en cuenta las ondas reflejadas por las estructuras, el fenómeno de la reflexión del oleaje no es reproducido correctamente.

$$\nabla(cc_g \nabla \eta) + \sigma^2 \frac{c_g}{c} \eta = 0 \quad (1)$$

Donde:

$c$  = celeridad de onda,

$c_g$  = celeridad de grupo,

$\sigma$  = frecuencia angular,

$\eta$  = desplazamiento de la superficie libre.

OLUCA representa una evolución del modelo débilmente no lineal de refracción - difracción combinada presentado inicialmente por Kirby y Dalrymple (1983a), denominado inicialmente REF/DIF, se basa en un desarrollo en serie de Stokes de las ecuaciones que definen el problema de la propagación de ondas (ver manuales de referencia, G.I.O.C., 2001).

La ecuación de tipo parabólico tiene como principal ventaja que no necesita condiciones en todo el contorno sino que basta con una condición inicial en el contorno desde el que se va a propagar y condiciones en los contornos laterales. Las desventajas son la limitación del ángulo de propagación del oleaje a  $\pm 60^\circ$ , con respecto al eje principal, (x), y que no se tienen en cuenta los efectos de las ondas reflejadas.

MODELO COPLA (corrientes en rotura en playas)

Los programas Copla-MC y Copla-SP forman parte del “Modelo Integral de Propagación de Oleaje, Corrientes y Morfodinámica en Playas” (MOPLA). Los modelos Copla-MC y Copla-SP, son modelos numéricos que resuelven las ecuaciones de flujo dentro de la zona de rompientes. Toman como datos de entrada aquellos datos de salida del campo de oleaje calculado a partir de los modelos Oluca-MC y Oluca-SP respectivamente.

Estos modelos se basan, fundamentalmente, en la resolución de las ecuaciones promediadas del movimiento y la ecuación de la continuidad. La técnica de resolución numérica más utilizada es en diferencias finitas, especialmente, esquemas de tipo implícito, dado que éstos reducen las inestabilidades numéricas (ver manuales de referencia, G.I.O.C., 2001).

El modelo bidimensional de corrientes en playa se deduce de las ecuaciones de Navier-Stokes. Se integran estas ecuaciones en la profundidad y se promedian en un período de tiempo (en la escala del oleaje) en un sistema de coordenadas localizado en el nivel medio del mar. De esta forma se obtienen las ecuaciones de continuidad (ver ecuación 2) y de cantidad de movimiento (ver ecuación 3 válida para el eje x).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xy}) + \\ + \frac{gU}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} - \varepsilon \left[ \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

$\eta$  = desplazamiento de la superficie libre,

$H = \eta + h$ ,

$U$  = componente media de la velocidad en el eje x,

$S_{ij}$  = componentes del tensor de radiación (donde  $i = x,y$ ;  $j = x,y$ ),  
 $C$  = coeficiente de Chezy (rugosidad de fondo),  
 $\varepsilon$  = “eddy viscosity” (viscosidad de remolino)

#### MODELO EROS (erosión/sedimentación)

El programa Eros forma parte del Modelo Integral de evolución morfológica de una playa debida a la acción del oleaje y a las corrientes de rotura MOPLA. Es un modelo numérico que resuelve las ecuaciones del flujo de sedimentos dentro de la zona de rompientes, así como los cambios en la batimetría asociados a las variaciones espaciales del transporte de sedimentos. Toma como datos de entrada los datos de salida del oleaje calculados por el modelo OLUCA, los datos de salida del campo de corrientes de rotura calculado por el modelo COPLA, y los datos de características del sedimento de la playa. Los modelos morfodinámicos se basan en el modelado de los procesos físicos que afectan a la playa, propagación del oleaje, corrientes de rotura, transporte de sedimentos y variación de la batimetría. En función de la interacción entre estos componentes se pueden definir dos tipos de modelos:

- a. Modelos de erosión – sedimentación inicial (ESI);
- b. Modelos de evolución morfodinámica (MEM).

Los modelos ESI evalúan la variación de la batimetría sin considerar la influencia de la variación del fondo en la hidrodinámica (oleaje y corrientes). El modo ESI permite, de una manera rápida, conocer la tendencia inicial de erosión-sedimentación de una playa sometida a unas determinadas condiciones hidrodinámicas.

Los modelos MEM tienen en cuenta la interacción entre la variación del fondo y las condiciones hidrodinámicas. Con la nueva batimetría se recalculan las condiciones hidrodinámicas y los nuevos flujos de transporte. Se realiza este ciclo cerrado hasta la finalización del evento que se desea simular.

Las dos formulaciones que tiene en cuenta el modelo, ampliamente contrastadas en el estado del arte, son:

1. [Bailard \(1981\)](#)
2. [Soulsby \(1997\)](#)

Las dos formulaciones computan el transporte total, suma del transporte en suspensión y del transporte por fondo.

### 3.2 Largo Plazo

#### MODELO GENESIS

El modelo GENESIS (“Generalized Model for Simulating Shoreline Change”, [Hanson & Kraus, 1989](#)), es un modelo numérico para la predicción del cambio de la línea de costa a largo plazo (1-100 meses) y a gran escala (1-100 km). También se ha denominado Teoría de Una Línea (One Line Theory, OLT) para la predicción de la línea de costa.

El movimiento de sedimentos debido al oleaje puede clasificarse en dos tipos, según su dirección: transporte longitudinal, a lo largo de la línea de costa, y transporte transversal, perpendicular a ella. Para predicciones a largo plazo, se puede asumir que el cambio de la línea de costa es debido al cambio en la tasa del transporte longitudinal.

El modelo GENESIS permite simular los cambios espacio-temporales de la línea de costa debido a diferencias en el transporte longitudinal. Es especialmente adecuado para determinar el efecto de espigones, diques exentos, aportaciones puntuales de sedimento (descargas fluviales), rellenos, etc. La hipótesis básica del modelo es que el perfil se traslada en la dirección perpendicular a la línea de costa paralelamente así mismo hasta una profundidad

denominada de cierre, por debajo de la cual el perfil ya no cambia (ver Figura 3).

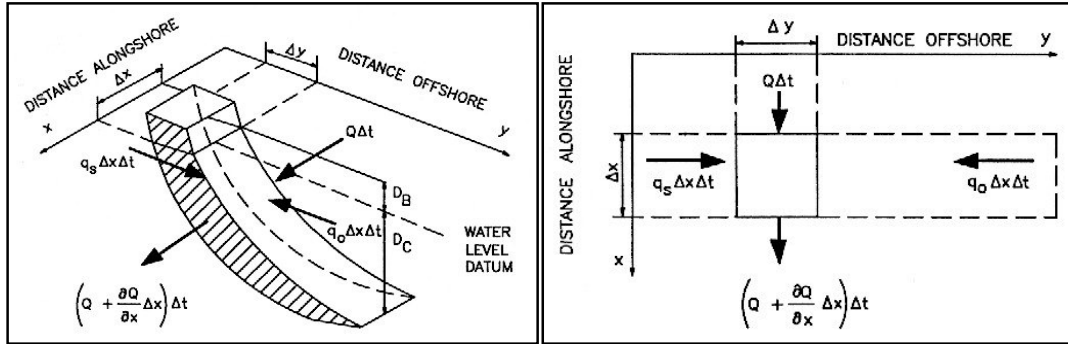


Figura 3. Vista en perfil y en planta del esquema de funcionamiento del GENESIS.

La ecuación de continuidad del sedimento que gobierna la posición de la línea de costa es la ecuación 4:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_c} \left( \frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad (4)$$

Donde:

y: posición de la línea de costa (y en la ),

$D_c$ : profundidad de cierre, o límite de la zona activa de transporte longitudinal de sedimentos,

Q: caudal de transporte longitudinal de sedimentos,

$q = q_s + q_o$ ,

$q_s$ : caudal de sedimentos por unidad de longitud que entra en el área de control por el lado de tierra.

$q_o$ : caudal de sedimentos por unidad de longitud que entra en el área de control por el lado de mar.

La formulación empírica que predice la tasa del transporte longitudinal en el modelo GENESIS es la ecuación 5:

$$Q = \left( H^2 C_g \right)_b \left[ \alpha_1 \sin 2\vartheta_{bs} - \alpha_2 \cos \vartheta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right]_b \quad (5)$$

Donde:

H: altura de ola,

$C_g$ : velocidad de grupo,

b: subíndice que denota la condición de oleaje en rotura,

$\vartheta_{bs}$ : ángulo de incidencia del oleaje en rotura con la batimetría.

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son parámetros adimensionales empíricos,

Adicionalmente, el modelo permite el by-pass de arena alrededor de las estructuras y su transmisión a través de los muelles y espigones. Considera también la difracción de las olas provocada por los espigones y los rompeolas alejados de la costa; también, la transmisión del oleaje a través de las escolleras. Los datos de ingreso del oleaje en aguas externas pueden



tener características arbitrarias (altura, período y dirección) y pueden originarse en múltiples fuentes independientes.

GENESIS considera solamente el transporte litoral debido a olas rompientes. El transporte de sedimentos se considera proporcional al flujo de energía de la ola rompiente (Inman & Bagnold, 1963) y es ligeramente modificado para considerar los gradientes longitudinales en la altura de olas rompientes inducidos por los efectos de la difracción alrededor de las estructuras costeras.

Además del modelo de transporte de Pelnard-Consideré (1956) y la ecuación de equilibrio del perfil de Dean (1977), el modelo incluye una subrutina interna para modelar la refracción y difracción de las olas transformándolas hasta la línea de rompientes.

Para este estudio se representó un tramo de 2.000 m de costa definida por una grilla de 200 celdas de 10 m cada una.

## 4 DATOS

### 4.1 Batimetría y Topografía

Se han considerado los datos de las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval: H-114, H-210, H-101, H-250. Los mapas han sido digitalizados y las coordenadas geográficas han sido convertidas en coordenadas métricas, con respecto a la proyección de Mercator UTM WGS-84 ZONA 21 SUR. Además se dispone de una batimetría de detalle de la zona en erosión y de algunos puntos topográficos recogidos en la playa seca.

En la Figura 4 se muestra un detalle de la batimetría interpolada sobre todos los puntos de sondeos (de las cartas náuticas y de la zona de detalle) en la pantalla del programa Sistema de Modelado Costero (SMC).

Los puntos topo-batimétricos han sido referenciados con respecto a la media de las más bajas mareas, que se denominará cota de la Baja Mar Viva Equinoccial (BMVE). Las cotas de referencia de la BMVE con respecto al cero del Instituto Geográfico de la Marina (IGM) resultan inferiores de 0,942m.

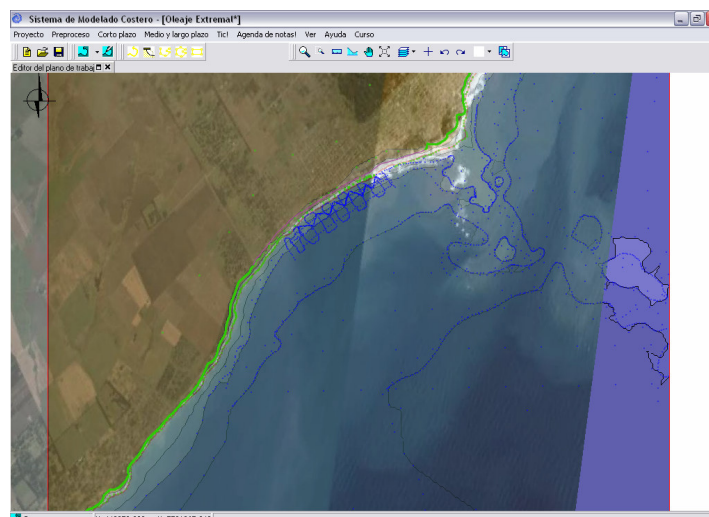


Figura 4. Puntos de sondeo e interpolación de la batimetría con el programa SMC.



## 4.2 Clima marítimo

Se realizó el estudio del “Régimen” o “Clima de Olas” incidente en la zona de implantación de las estructuras, mediante el análisis del oleaje en aguas profundas (tipo “swell”) y el local producido por la acción del viento (tipo “sea”), considerando la transformación que el mismo sufre durante su propagación hacia la costa.

Se presentan los resultados del análisis según:

A. Estadísticas de ola de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration de USA), en base a datos cada 3 horas de la Serie Histórica 1997-2006, para la Altura Significativa (Hs), Período y Dirección de Incidencia de las olas, correspondientes a los siguientes tres puntos ubicados en aguas profundas y próximos a la zona de interés:

- Lat. 38° S, Long. 56,25° W (al Este de Mar del Plata)
- Lat. 38° S, Long. 57,50° W (al Sur del área de estudio)
- Lat. 39° S, Long. 58,75° W (al Sur de Quequén)

B. Estadística de olas por modelación matemática

### Clima medio

En el Punto objetivo que se ubica en zona de rompeolas a 10 m de profundidad, se ha calculado la propagación de las olas oceánicas (de tipo “swell”) mediante un modelo matemático de refracción (STWAVE) para cada una de las direcciones de incidencia en aguas profundas y para cada uno de los períodos representativos considerados en la estadística. Adicionalmente a la propagación de las olas hasta la costa, el modelo STWAVE permite la generación y transformación de olas locales (tipo “sea”) a partir de campos de viento actuantes sobre el área.

Se calcularon la dirección de llegada, y el coeficiente de corrección  $K_r \cdot K_s$  (refracción y asomeramiento) para cada juego de olas oceánicas propagadas hasta una profundidad de aproximadamente 10 m al Cero en el área de interés.

Para el oleaje de tipo “swell”, las Alturas de olas Significativas más frecuentes se corresponden con las direcciones E, ESE, con alturas comprendidas entre 1 y 1,5 metros. Las máximas alturas medias proceden del sector ESE-SSW (en el sentido de la aguja del reloj) con un promedio entre 3 y 4 metros. Los períodos asociados son de 6-8 segundos para las alturas medias y de 8-10 segundos para las máximas medias.

Para determinar las olas de tipo “sea” o locales, se calcularon la altura y período generados por cada una de las velocidades de viento límites de cada intervalo en la estadística correspondiente (SPM, 1984). Las Alturas de olas Significativas más frecuentes se corresponden con los sectores SE-SSE, y SSW-SW, con alturas comprendidas entre 0,5 y 1 metros. Las máximas alturas medias proceden de los mismos sectores con un promedio entre 1,5 y 2 metros. Los períodos asociados son de 2-4 segundos para las alturas medias y de 4-6 segundos para las máximas medias, como se resume en la siguiente tabla.

Las olas incidentes pueden clasificarse como la suma de las olas generadas por vientos locales (de tipo “sea”, actuando sobre una distancia limitada), más las olas provenientes del océano (de tipo “swell”), que son generadas por tormentas lejanas y se propagan hasta el área de interés.

El resumen de los principales resultados se muestra en la [Tabla 1](#).

Oleaje tipo swell+sea	SECTORES	VALORES
MEDIAS	E-ESE	H <sub>s</sub> =1-2M; TP=6-8S
MÁXIMAS MEDIAS	SSW-S	H <sub>s</sub> =3,5-4,5M; TP=8-10S

Tabla 1. Principales sectores de procedencia y valores de oleaje tipo “sea”+”swell” en el punto objetivo.

**Clima extremal.** Se muestran los resultados de los cálculos del período de retorno para todas las direcciones, correspondientes a los casos de oleaje “sea” + “swell”.

Tr (años)	Hs (m)
2	5,9
5	6,4
10	6,7
15	6,9
20	7,0
25	7,1
50	7,5
100	7,8
500	8,4

Tabla 2. Período de retorno y altura significativa correspondiente, en aguas profundas para todas las direcciones.

### 4.3 Marea

Las mareas responden a un régimen mixto. En algunas partes del mes tienen carácter diurno (un período por día), y en otras semidiurno (dos períodos por día) (INCYTH, 1984). La creciente genera corrientes hacia el norte (0,05-0,15 m/s); la bajante hacia el sur (0,1-0,2 m/s). De la base de datos del Servicio de Hidrografía Naval, para los años 2006 y 2007 se han obtenido las siguientes estadísticas: Amplitud Máxima 1,73 y 1,63 metros, respectivamente; Amplitud Media 0,78 metros en los dos años. Durante los eventos extremales, en las simulaciones se ha considerado una sobrelevación añadida estimada en 1 metro aproximadamente, debido a la marea meteorológica.

### 4.4 Granulometría

Como datos de ingreso a los modelos se necesitan las características granulométricas del sedimento. Para ello, se recogieron 9 muestras de sedimentos del lecho marino a distintas profundidades mediante buceo, y 4 muestras en la playa seca en examen, durante la bajamar, con el fin de comprobar su situación actual y obtener testimonio gráfico de sus principales características (ver Figura 5). Las características granulométricas principales de las muestras se resumen en la Tabla 3. Se observa que casi todas las muestras (8 de 13) dan valores de D<sub>50</sub> correspondientes a arenas muy finas (valores entre 0,0625 y 0,125 mm), mientras que las

muestras en la playa seca dan valores correspondientes a arenas finas y medias (valores entre 0,125 y 0,5 mm), según la clasificación de [Wentworth \(1922\)](#).

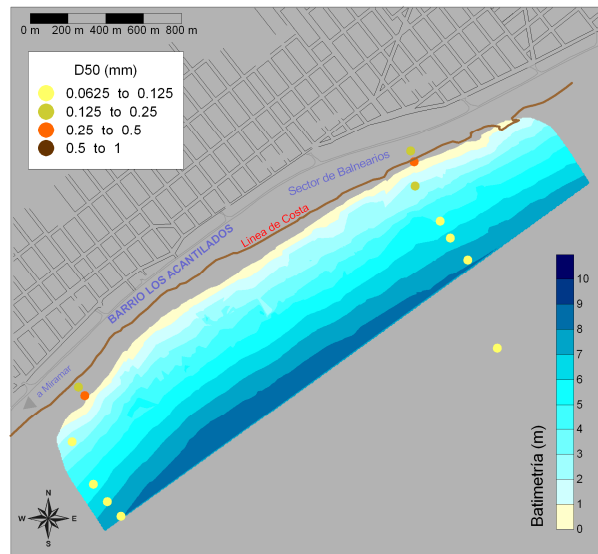


Figura 5. Ubicación de los puntos de muestreo de la granulometría con respecto a la batimetría de detalle, y representación del valor del D50 (Clasificación de Wentworth, 1922).

MUESTRA	D <sub>84</sub> (MM)	D <sub>50</sub> (MM)	D <sub>16</sub> (MM)
1	0,23	0,15	0,09
2	0,14	0,11	0,08
3	0,15	0,11	0,08
4	0,14	0,10	0,08
5	0,14	0,10	0,08
6	0,14	0,10	0,08
7	0,14	0,10	0,08
8	0,14	0,10	0,08
9	0,13	0,10	0,08
10	0,39	0,23	0,16
11	0,78	0,40	0,22
12	0,35	0,23	0,18
13	0,39	0,25	0,18

Tabla 3. Características principales de granulometría de las muestras obtenidas en la campaña de campo del 20/12/2006.

#### 4.5 Calibración

El modelo de oleaje ha sido calibrado propagando los datos de la NOAA desde aguas profundas hasta la costa en la zona de Puerto Quequén (100 km más al sur de la zona de estudio) donde estaban disponibles datos medidos con un ológrafo. Los modelos de corrientes

debidas al oleaje y los modelos de transporte no han podido ser calibrados no disponiendo de datos de campo.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Diagnóstico

En la [Tabla 4](#) se muestran las condiciones de oleaje simuladas, en los tres momentos mareales de pleamar, media marea, y bajamar.

**Oleaje medio.** Se observa una zona de acumulación del oleaje, situada en la zona al sur de la malla, debido a la refracción del oleaje por la conformación batimétrica local. Las corrientes debidas a oleaje determinan celdas de circulación en aguas poco profundas, sin evidenciar una dirección de transporte uniforme, y determinadas por efectos muy locales de la línea de costa y de la batimetría (ver [Figura 6](#)). Por lo tanto, también el transporte está influenciado por efectos muy locales de la batimetría, sin evidenciar una tendencia uniforme en su dirección.

Caso	Oleaje	Punto Objetivo
<b>OLEAJE MEDIO (MÁS FRECUENTE)</b>	<b>MONOCROMÁTICO</b>	<b>HS = 1,25M TP = 8S</b>
<b>OLEAJE CON TR = 50 AÑOS</b>	<b>ESPECTRAL (T.M.A.)</b>	<b>HS = 7,3M TP = 14S</b>

Tabla 4. Parámetros de oleaje utilizados en las propagaciones.

Básicamente, el oleaje medio no es el responsable de la deriva litoral y muestra sus efectos a una escala muy local (del orden de centenares de metros) debido a efectos muy locales de la batimetría.

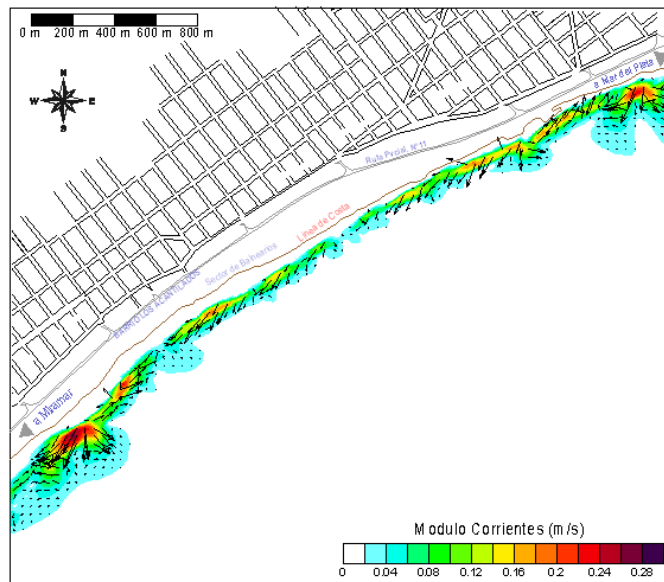


Figura 6. Corrientes debidas a la rotura del oleaje medio en la zona de detalle (Hs=1,25m y Tp=8s).

**Oleaje extremal.** Para el oleaje de tormenta se estima oportuno, a nivel de prediseño, y vista las características de la obra a realizar, considerar un oleaje representativo del SSE (dirección más desfavorable y muy frecuente) con período de retorno de 50 años, una altura significativa de 7,3 metros y un período de 14 segundos; ha sido propagado en tres situaciones de marea: en bajamar, en media marea y en pleamar. Las dimensiones del espaciado en la malla interior de detalle son de aproximadamente 5 por 8 metros.

Se observa que el oleaje llega a la costa relativamente uniformemente distribuido, presentando algunas zonas de acumulación debido a la conformación batimétrica local (ver [Figura 7](#)). Las alturas más grandes se presentan en pleamar, como era de esperarse puesto que en calados mayores llegan olas más grandes.

Las corrientes debidas a oleaje muestran una tendencia dominante de circulación hacia el noreste (ver [Figura 8](#)). Asimismo, también el transporte general es hacia el noreste, evidenciando una tendencia uniforme en esta dirección (ver [Figura 9](#)).

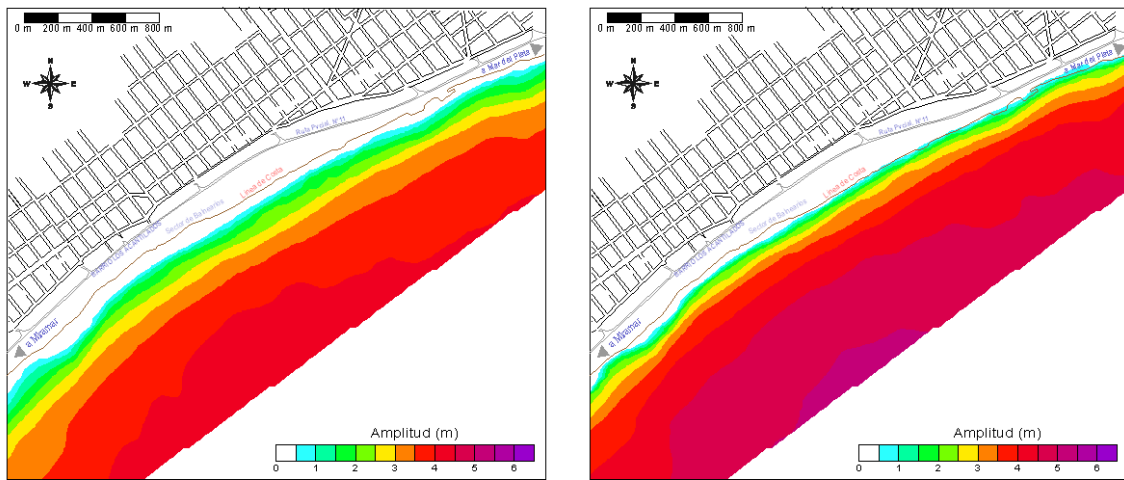


Figura 7. Amplitud del oleaje con período de retorno de 50 años ( $H_s=7,3m$  y  $T_p=14s$ ) en bajamar (izquierda) y pleamar (derecha), en la malla de detalle.

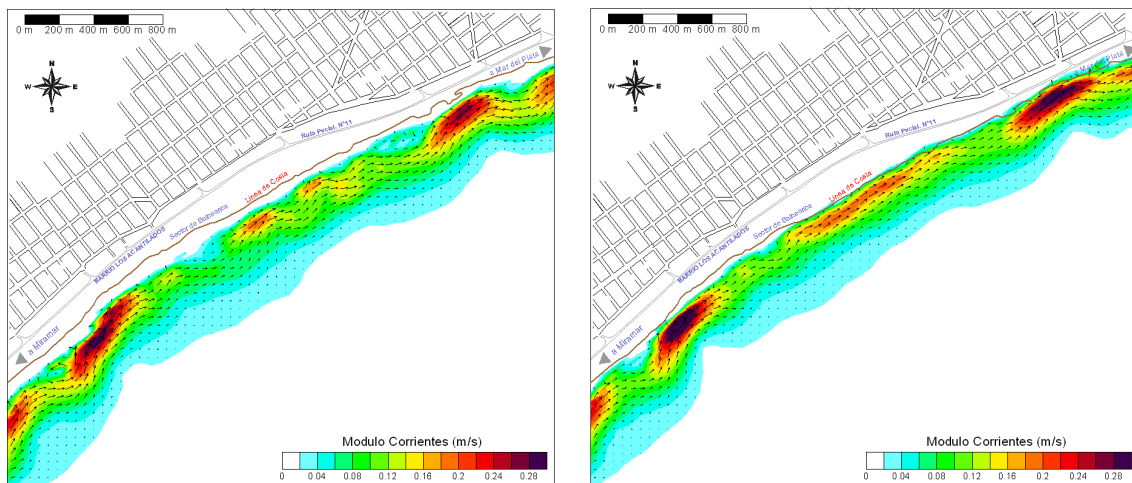


Figura 8. Corrientes debidas a la rotura del oleaje con período de retorno de 50 años ( $H_s=7,3m$  y  $T_p=14s$ ) en bajamar (izquierda) y pleamar (derecha), en la malla de detalle.

La zona de rompientes, empieza aproximadamente entre las cotas -5 y -3 metros (es variable en función del nivel de la marea y del grupo de olas incidentes) y tanto las mayores corrientes como el transporte de sedimentos, se ubican entre las mismas batimétricas de -3 y -5 metros.

Los efectos de este oleaje en la erosión y la sedimentación, muestran también la erosión de la parte alta de la playa y una acumulación en la parte baja (en aguas más profundas), como corresponde a un oleaje de tormenta.

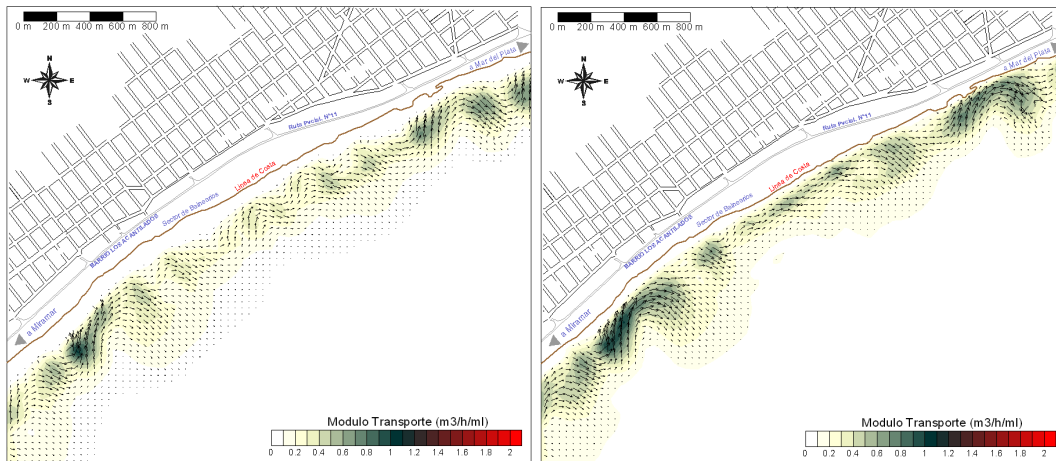


Figura 9. Transporte debido a las corrientes a rotura del oleaje con período de retorno de 50 años ( $H_s=7,3\text{m}$  y  $T_p=14\text{s}$ ) en bajamar (izquierda) y pleamar (derecha), en la malla de detalle.

Por lo tanto, resumiendo:

- (i) este oleaje es el responsable de la mayor cantidad de transporte de sedimentos longitudinal hacia el noreste, y
- (ii) es responsable también de la erosión de la parte “alta” de la playa con depósito de la arena en la parte más sumergida, con formación de una playa más tendida.

El orden de magnitud calculado del transporte longitudinal, en las zonas de máximo transporte, es del aproximadamente  $0,6-0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$ . Esto quiere decir que en una tormenta de este tipo de la duración por ejemplo, de 6 horas, se generaría un transporte de aproximadamente  $850 \text{ m}^3$  en una sección media de la playa.

El efecto erosivo por el transporte longitudinal a largo plazo, estaría equilibrado por: (i) el aporte del sedimento procedente de zonas que se ubican más al suroeste (en el caso que haya disponibilidad de arena), cuando el aporte entrante equivalga al aporte saliente (medianamente a largo plazo). Eso quiere decir que, si no existe un aporte similar al transportado hacia el noreste desde el suroeste, la playa sufriría erosión; (ii) el movimiento transversal de arena debido a las variaciones climáticas (erosión de la parte alta de la playa con tendencia a formar una playa disipativa durante eventos de tormenta, y acumulación en la parte alta de la playa durante períodos de relativa calma con tendencia a formar una playa más reflejante) y a la disponibilidad de reserva de arena en las dunas de las playas. En el momento que las dunas sean estabilizadas, se elimina una reserva importante de arena del sistema en equilibrio de la playa. Por otro lado, en presencia de una secuencia de fuertes tormentas y la ausencia de períodos de calma, se genera una pérdida de arena de las playas que puede necesitar muchos años para ser recuperada.

El orden de magnitud calculado del transporte transversal, en las zonas de máximo transporte, es del aproximadamente  $0,3-0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ml}^{-1}$ . Esto quiere decir que en una tormenta

de este tipo y de la duración, por ejemplo, de 6 horas, se generaría un transporte de aproximadamente 350 m<sup>3</sup> hacia el mar abierto.

## 5.2 Optimización y diseño

**Largo Plazo.** En este apartado se exponen los resultados de la verificación del esquema adoptado inicialmente para el diseño de los diques exentos. En particular se verifica la funcionalidad del esquema propuesto por M.I.V.S.P (2005), en cuanto a la posibilidad de formación de salientes o tómbolos.

El esquema a adoptar debe de ser funcional en cuanto a:

1. Garantizar la formación de salientes;
2. Impedir la formación de tómbolos;
3. Garantizar el mantenimiento de una playa de ancho mínimo de 25m (previa regeneración de la misma);
4. Impedir la pérdida del material arenoso de la playa durante eventos climatológicos extremales;

La metodología adoptada para este estudio ha sido la siguiente:

- a. Verificación de la funcionalidad del esquema inicial mediante el empleo de las formulaciones experimentales o empíricas, y mediante simulaciones con modelos numéricos (GENESIS);
- b. Optimización del esquema mediante el uso de las formulaciones empíricas;
- c. Estudio mediante modelos numéricos de la mejor solución encontrada con las formulaciones empíricas.

La optimización del esquema de los diques exentos se basa en los siguientes principios:

- Reducción máxima del riesgo de formación de tómbolos
- Garantía de conservación de una playa de ancho mínimo de 25 metros

Por lo tanto, en primer lugar, se procede a un estudio de las geometrías en planta, mediante formulaciones empíricas que determinan el esquema con la mejor funcionalidad según los objetivos mencionados. En segundo lugar, se estudia la evolución de la línea de costa a largo plazo con la geometría adoptada. Este estudio permite evaluar la forma en planta de la playa en cuestión y de las playas adyacentes después de haber alcanzado un nuevo equilibrio como resultado de la interacción del oleaje con los diques.

Por último, se estudia la evolución a corto plazo de la playa a proteger y de las playas adyacentes para verificar la estabilidad de las mismas durante eventos extremales de corta duración. Asimismo, se estudia un diseño de los diques con un objetivo añadido:

- Mínimo impacto visual

Este nuevo objetivo debe de ser compatible con los objetivos de funcionalidad propuestos.

Datos de la nueva propuesta:

Extensión costa a proteger:	1.000 m
Nº rompeolas (paralelos a la costa):	8
Extensión dique exento:	$L_i = 60$ m
Abertura entre diques:	$X_i = 70$ m
Distancia de la costa:	250 m
Ubicación Isobata:	-4,1 m BMVE (-5 IGM)

El resultado de la aplicación del modelo GENESIS, fue la formación de salientes esperada, donde cada rompeolas trabaja como una estructura semi-sumergida (ver Figura 10), como se puede apreciar en las figuras siguientes, para coeficientes de transmisividad en el orden de los considerados razonables para esta condición.



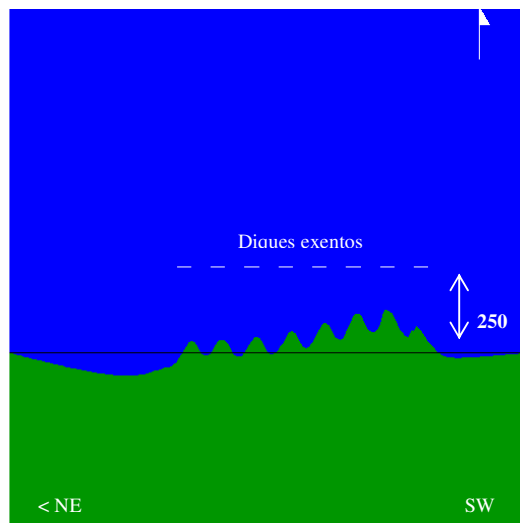


Figura 10. Sistema de Rompeolas Aislados Alternativo – Formación de Salientes. (Coeficiente de Transmisividad  $T=0,5$ ).

Esto indica que sería posible implementar un esquema de protección costera con rompeolas paralelos a la costa que sea adecuado (o sea, que no forme tómbolo) solamente considerando una estructura semi-sumergida (a nivel medio), para la cual aproximadamente el 50% o más de la energía de las olas pueda ser transmitida. También se ve claramente que existe un impacto erosivo al NE a controlar mediante un relleno de arena que pre-configura el volumen de la saliente que se desea formar, si bien resulta muy difícil predecir tal efecto con precisión, debido a la escasa información de base disponible. Se estima que un relleno razonable para tal fin debería provocar un avance de la costa de unos 25 m aproximadamente.

El escenario de situación futura, comprende la modelación de la etapa constructiva, cuya configuración fue evaluada con el objeto de determinar el comportamiento de la línea de costa en el transcurso de dicha etapa. Se realizaron por lo tanto, diversas simulaciones con esquemas representativos de las distintas metodologías constructivas.

De las mismas, surgió que la metodología constructiva mas aceptable considerando el avance desde tierra, es aquella que disminuye el desequilibrio generado en la línea de costa, y consiste en la construcción del espigón de acceso hasta el borde entre el primer “gap” o vano y el rompeolas situado al SW. De esta forma, se construye inicialmente el “gap”, luego el rompeolas al NE, luego se retrocede retirando el coronamiento de éste rompeolas y el “gap”, y finalmente se construye el rompeolas ubicado al SW.

En este proceso, el plazo en que el transporte es fuertemente obstruido se reduce a no más de 2 o 3 meses, resultando el efecto que se muestra en las figuras siguientes para el primer y cuarto mes (en las cuales se asume que la estructura está formada por un rompeolas y un “gap” (longitud total de estructura 130 m).

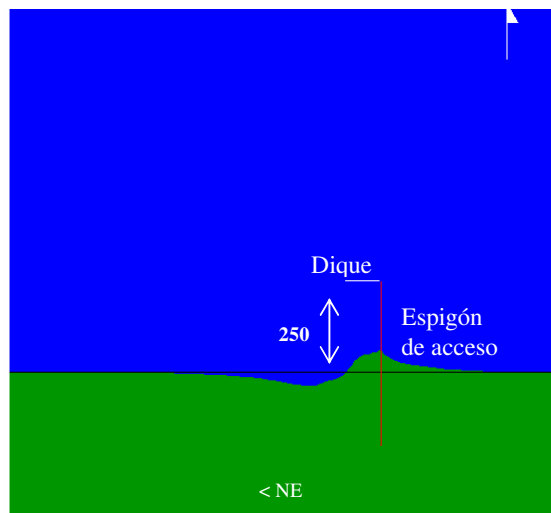


Figura 11. Fase Constructiva Evolución estimada en 1 mes.

**Corto Plazo.** El objetivo principal de esta parte del estudio es verificar el “fallo” de la obra (en este caso la pérdida de la funcionalidad de la misma o de estabilidad de la playa) y, por lo tanto, se han realizado simulaciones de eventos extremos, con tormentas con período de retorno de 50 años. Los eventos extremos son aquellos que generan la mayor cantidad de transporte sedimentario y, como consecuencia, en la playa se evidencian los mayores cambios morfológicos (erosión y sedimentación) de la playa.

El objetivo secundario es comparar la funcionalidad de la estructura semi-sumergida (con una cota de coronación puesta al nivel de la media marea) con la funcionalidad de la estructura totalmente emergida.

Las simulaciones se corresponden a los dos casos de cota de coronación planteados:

- a) diques totalmente emergidos (cota +3 BMVE, y +2,1 Cero IGM)
- b) diques parcialmente sumergidos (cota +1,1 BMVE), o a nivel de la media marea (Cero del IGM)

En todos los casos simulados se ha considerado una regeneración de una playa de al menos 25 metros de ancho, y un nivel añadido de 1m debido al levantamiento del nivel medio por la marea meteorológica.

La presencia de los diques modifica la propagación del oleaje y el sistema de circulación de corrientes y de dinámica sedimentaria. En particular, disminuyen las alturas de olas incidentes a la playa, así como las corrientes y el transporte inducidos por el oleaje, en la zona entre la playa y los diques (ver [Figura 12](#)).

El esquema con los diques totalmente emergidos garantiza la funcionalidad de la obra puesto que no se aprecian tendencias de transportes de sedimentos, en la zona comprendida entre los diques y la línea de costa, generalizados hacia el mar abierto, tanto en bajamar como en pleamar. Se observan aceleraciones del transporte, hacia mar abierto, en los primeros “gaps” al sur del esquema en planta. Sin embargo el patrón general del transporte no empeora sustancialmente el patrón detectado para la situación actual, sin diques (ver [Figura 13](#)).

El esquema con los diques exentos con cota de coronación a nivel de la media marea no empeora sustancialmente la tendencia del transporte calculada con el esquema con diques totalmente emergidos.

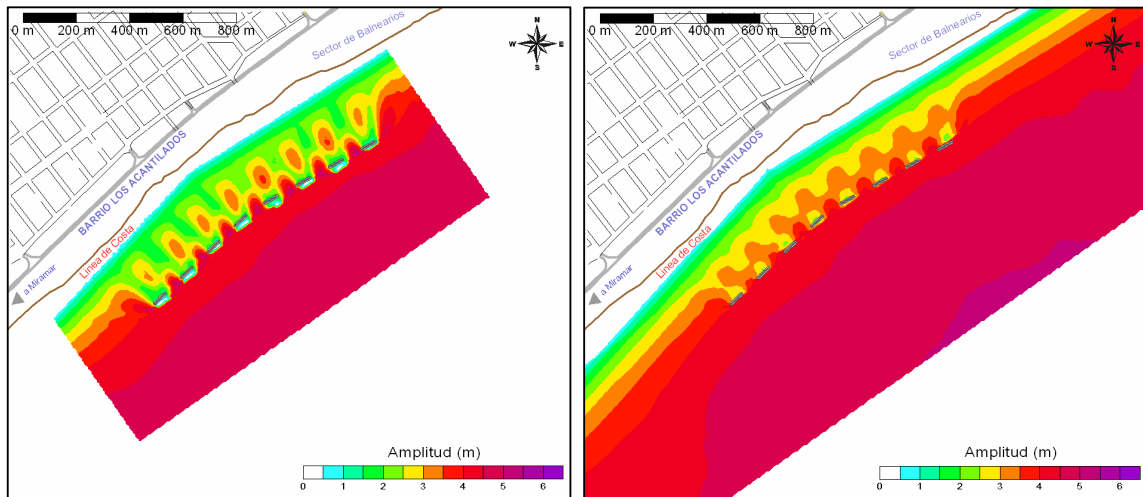


Figura 12. Amplitud de la ola incidente en la zona de detalle en pleamar con diques a la cota +3 (izquierda) y con diques a la cota +1,2 (IGM) (derecha).

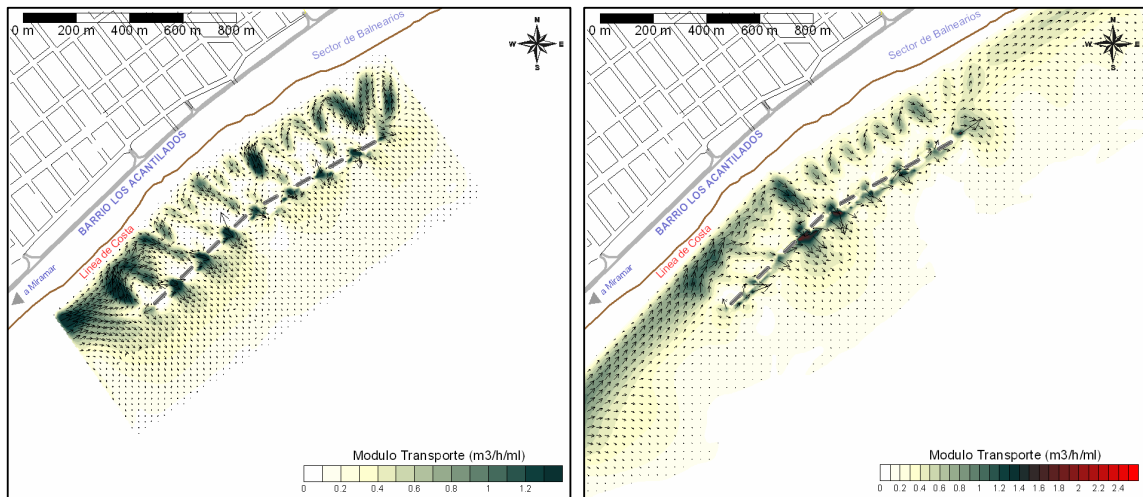


Figura 13. Transporte de sedimentos por oleaje a rotura en la zona de detalle en pleamar con diques a la cota +3 (izquierda) y con diques a la cota +1,2 (IGM) (derecha).

## 6 CONCLUSIONES

1. Los modelos numéricos son una buena herramienta de estudio (en fase de diagnóstico y predicción) de casos reales solamente en el caso que estén bien calibrados con medidas de campo. En este trabajo, se han podido calibrar solamente los modelos de oleaje pero no los modelos de corrientes y de transporte por ausencia de datos y la imposibilidad de realizar campañas de campo por el alcance del trabajo.
2. El estudio de la situación actual a corto plazo ha permitido evidenciar los efectos muy locales del oleaje medio sobre la hidrodinámica y el transporte de sedimentos. Los oleajes más fuertes (de más altura de ola y período, como por ejemplo el oleaje estudiado con período de retorno  $T_r = 50$  años) contribuyen en un gran porcentaje a generar la dinámica sedimentaria litoral. El estudio del transporte potencial ha confirmado que el transporte litoral tiene un balance neto hacia el Noreste de aproximadamente  $445.000 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ .

3. La verificación de la obra propuesta en el diseño de anteproyecto ha evidenciado el alto riesgo de formación de tómbolos, que causan la interrupción del transporte litoral, y fuertes impactos erosivos en las playas más al norte. Por lo tanto se ha estimado necesario mejorar la configuración propuesta.
4. Se ha definido un esquema optimizado de 16 diques exentos, cada uno de 60m de largo, con intervalos entre ellos (“gaps”) de 70m, con una cota de coronación dispuesta a la cota de media marea (o nivel medio), a 250m de la línea de costa, en correspondencia de la batimétrica -4,1m con respecto a la bajamar viva equinoccial. La metodología constructiva propuesta en este estudio es para realizar mitad de la obra (8 diques exentos).
5. Es posible implementar un esquema de protección costera con rompeolas paralelos a la costa, que no forme tómbolo, solamente considerando una estructura semi-sumergida (a nivel medio), para la cual aproximadamente el 50% o más de la energía de las olas pueda ser transmitida.
6. El esquema propuesto asegura que no se formen tómbolos y garantiza la protección de la costa con una regeneración de la playa de 25m de ancho. Este resultado ha sido estudiado con modelos a corto plazo (verificación por tormentas) y largo plazo (evolución hasta el estado de equilibrio medio).
7. La metodología constructiva prevista para la materialización de la obra (los 8 primeros diques) se basa en el aporte de la roca desde tierra, a través de espigones de avance.
8. Se prevé la realización de obras complementarias al sistema dispuesto, para minimizar posibles impactos negativos sobre el medio. Estas obras comprenden: (i) la realización de un relleno de playa para compensar la retención de material estimada por efecto de los rompeolas, de un origen supeditado a un estudio específico que demuestre su aplicabilidad como relleno de playa. El volumen de arena a disponer será de 250.000m<sup>3</sup>; (ii) el manejo de la arena a través de un sistema de by-pass para controlar posibles erosiones de la costa durante el proceso constructivo, hasta que se efectúe el retiro del espigón de avance.
9. Los resultados presentados son a nivel de prediseño, no son rigurosos para el proyecto de las estructuras. A nivel de proyecto se recomienda recurrir a un estudio de detalle con una mejor calibración de los modelos numéricos a emplear, mediante una nueva campaña de medidas de oleaje “in situ” (aunque para el oleaje hay algunos datos disponibles en una zona próxima), de corrientes y transporte de sedimentos.

## REFERENCIAS

- Bailard, J. A. (1981). An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research*. 86 (C11), 10938-10954.
- Basco, D.R. (1983). Surf-Zone Currents. *Coastal Engineering*, Elsevier, 7, pp. 331-357.
- Berkhoff, J.C.W. (1972). Computation of Combined Refraction-Diffraction, *Proceedings of the 13th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Vancouver, pp. 471-490.
- Bruun, P. 1954. Coast Erosion and the Development of Beach Profiles. Technical Memorandum No. 44, *Beach Erosion Board*.
- Dean, R.G. 1977. *Equilibrium beach profiles. US Atlantic and Gulf Coasts*. Ocean Engineering Technical Report No. 12. Department of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware.
- De Vriend, H.J. (1987). Two- and Three-Dimensional Mathematical Modelling of Coastal

- Morphology. *Delft Hydraulics Communications*, No. 377.
- Coastal Engineering Manual (CEM). EM-1110-2-1100 Part V Beach Fill Design.
- Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C.), 2001. Universidad de Cantabria. *Documento Temático. Regeneración de Playas. Manual de referencia del SMC.*
- Hanson, H., and Kraus, N. C. 1989. GENESIS: *Generalized Model for Simulating Shoreline Change*. Technical Report CERC-89-19, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Inman, D.L. y R.A. Bagnold, 1963. *Littoral processes. The Sea, Vol. 3*, M.N. Hill ed. Interscience, New York, pp. 529-553.
- Johnson, I.G. (1919). *Shore Processes and Shoreline Development*. Wiley. New York, 589 págs. Facsimile edition: Hafner, New York.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple (1983a). A Parabolic Equation for the Combined Refraction-Diffraction of Stokes Waves by Mildly Varying Topography. *J. Fluid Mech.*, 136, pp. 543-566.
- Liu, P.L.F. and T.K. Tsay (1984). On Weak Reflection of Water Waves. *Journal Fluid Mech.*, 131, pp. 59-71.
- Longuet-Higgins, M.S., R.W. Stewart (1962). Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves, with Application to 'Surf Beat'. 5, *Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 481-504.
- Ministerio de Infraestructura, Vivienda y Servicios Públicos (M.I.V.S.P.), Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas – Departamento Zona X Obras Marítimas, 2005. Anteproyecto: Sistema de Rompeolas Aislados al Sur de Punta Mogotes. Municipio de General Pueyrredón.
- Pelnard-Considere, R., 1956 Essai de theorie de l'évolution des formes de vivage en plages de sable et de galets. *IV Journees de l'Hydraulique*, Question III, Rapport 1, 289-298.
- Shore Protection Manual (SPM) 1984. 4th Ed., Vol 2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Government Printing Office, Washington, DC.
- Sistema de Modelado Costero (SMC). Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC), de la Universidad de Cantabria (UC) y Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente (MMA).
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford Publications, Londres.
- Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam.
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Jour. Geol.* 377-392. 30.