



# Estudios hidráulicos para el prediseño de una obra de protección costera en la localidad de Las Toninas

## Informe de avance



Programa de Hidráulica Computacional - Programa Hidráulica Marítima  
Subgerencia Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua

**Proyecto INA 403**  
**Informe SLH 01-403-21**  
**Ezeiza, diciembre de 2021**

## AUTORIDADES DEL INA

### PRESIDENTE

Dr. Ing. Juan Carlos BERTONI

### GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Lic. Máximo LANZETTA

### DIRECTOR DE LA SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Pablo D. SPALLETTI

### Equipo de trabajo (por orden alfabético)

*Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua*

Ing. Lucas Bindelli | Dr. Ing. Pablo E. García | Msc. Ing. Mariano Re

*Programa Hidráulica Marítima – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua*

Lic. Carlos Haspert | Lic. Federico Haspert | Ing. Mag. Nicolás J. Tomazin

### Informe realizado por:

Mariano Re

Lucas Bindelli

Nicolás J. Tomazin

# Estudios hidráulicos para el prediseño de una obra de protección costera en la localidad de Las Toninas

## Informe de avance

### RESUMEN

La necesidad de proteger un tramo costero de la localidad de Las Toninas, tanto por su situación crítica respecto de la erosión como por la presencia de cables submarinos de relevancia, implica un estudio detallado de la posibilidad de implementación de una obra de infraestructura. Se consideró que la implantación de un sistema múltiple de diques exentos sería la tipología más adecuada para este problema. Se utilizó la información antecedente de Boyas Virtuales en la costa bonaerense para propagar niveles y oleaje al sector costero de implementación de la obra que se estudia. Además, se puso en operaciones el software XBeach para la evaluación del impacto de ondas de tormenta sobre la playa. Luego, en función de criterios empíricos basados en las características geométricas de la implantación de la obra se determinaron seis alternativas cuya performance será evaluada mediante modelación numérica.

**Descriptorios temáticos:** erosión costera; infraestructura; diques exentos.

**Descriptorios geográficos:** Las Toninas; Partido de la Costa; Costa Bonaerense; Provincia de Buenos Aires.

## Tabla de contenido

1	Introducción .....	6
1.1	Problemas de erosión en Las Toninas.....	6
1.2	Localización de los cables .....	7
1.3	Sudestada de marzo de 2021 .....	9
1.4	Obra propuesta .....	10
1.5	Informe de avance.....	11
2	Propagación de oleaje .....	12
2.1	Boyas virtuales.....	12
2.2	Propagación de oleaje desde boyas virtuales.....	13
2.2.1	Software SWAN.....	14
2.2.2	Implementación .....	14
2.2.3	Validación.....	16
2.2.4	Oleaje en Las Toninas.....	18
3	Modelación de ondas de tormenta .....	24
3.1	Software XBeach.....	24
3.2	Validación de la metodología .....	25
3.3	Aplicación en Las Toninas .....	28
3.3.1	Selección de temporal para Las Toninas .....	28
3.3.2	Observación de la línea de costa.....	29
3.3.3	Implementación del modelo .....	31
3.3.3.1	Dominio.....	31
3.3.3.2	Topobatemetría .....	32
3.3.3.3	Forzantes.....	34
3.3.3.4	Condicionantes .....	35
3.3.3.5	Calibración .....	36
3.4	Resultados .....	38
3.4.1	Evolución de la línea de costa .....	38
3.4.2	Análisis de sensibilidad.....	45
4	Diques exentos en Las Toninas.....	46
4.1	Tipos de obras y características de los diques exentos .....	46
4.2	Diseño de diques exentos.....	47

4.2.1	Procesos principales .....	47
4.2.2	Predimensionamiento de la obra.....	48
4.3	Propuesta para Las Toninas.....	51
4.4	Criterios de predimensionamiento.....	54
5	Conclusiones.....	65
	Referencias .....	66

# 1 Introducción

## 1.1 Problemas de erosión en Las Toninas

El Partido de La Costa cuenta con aproximadamente el 50% de su línea costera urbanizada (Tomazin et al., 2020). La localidad balnearia de Las Toninas, al norte del partido, prácticamente presenta la totalidad de su frente costero con infraestructura urbana, además de un sostenido crecimiento de la población estable durante los últimos años.

El análisis llevado a cabo por Marcomini y Lopez (2010) considerando parámetros tales como la conservación de la duna costera, erosión costera y de playa, la erosión por drenajes pluviales y los ciclos naturales de la playa muestra que varios sectores del frente costero de Las Toninas se encuentran en situación crítica. El sector norte de la localidad, entre las calles 4 y 10, se presenta como el de mayor vulnerabilidad a la erosión, entre calles 10 a 18 la vulnerabilidad es moderada y de la 18 a la 50 es baja (Figura 1.1).

Durante los últimos 30 años, distintas medidas de manejo costero se implementaron en Las Toninas con el objetivo de la reconstrucción de la playa y la duna costera. En general, salvo en algunos casos particulares, estas medidas resultaron ser poco eficientes. En 1994 se realizó una defensa con cilindros de geotextil rellenos de arena, entre 1997 y 2003 se ejecutó un plan de restauración de la duna costera utilizando enquinchados, en 1998 y 2007 se realizaron obras de relleno de arena para recarga en playas, y durante los últimos cinco años se avanzó con obras de defensa utilizando gaviones. En ningún sector de la localidad se presentan grandes obras de infraestructura destinada a la defensa costera.

Además de la situación crítica del sector norte de la localidad, tanto en la situación presente como en lo contemplado por las proyecciones futuras en el marco del cambio climático (Tomazin et al., 2020), se destaca que esta zona costera recibe los cables de fibra óptica que sostienen el sistema de telecomunicaciones del país.

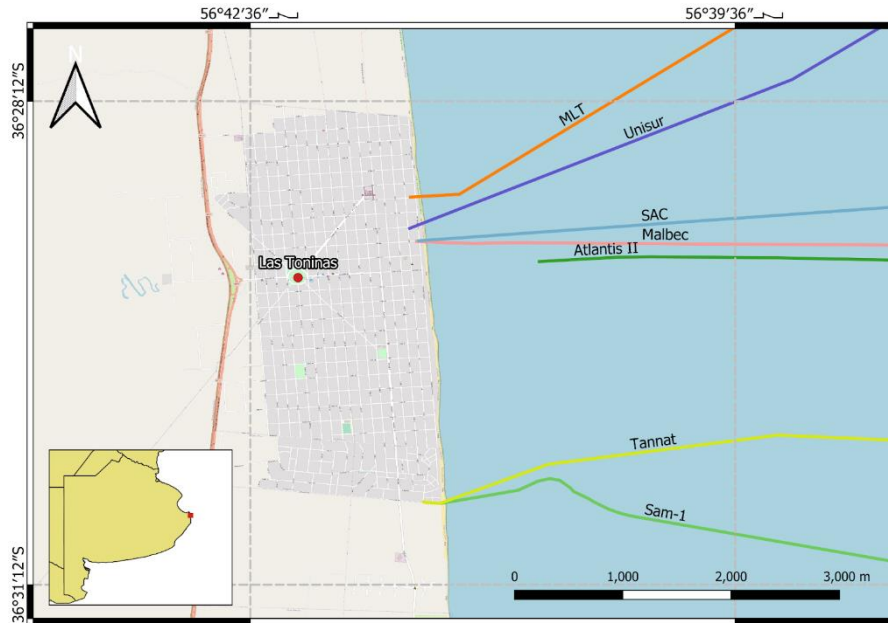


Figura 1.1. Impactos de la erosión costera sobre la línea municipal de la avenida Costanera en Las Toninas ([https://youtu.be/2\\_QipNz4u24](https://youtu.be/2_QipNz4u24), visitado 29/11/2021).

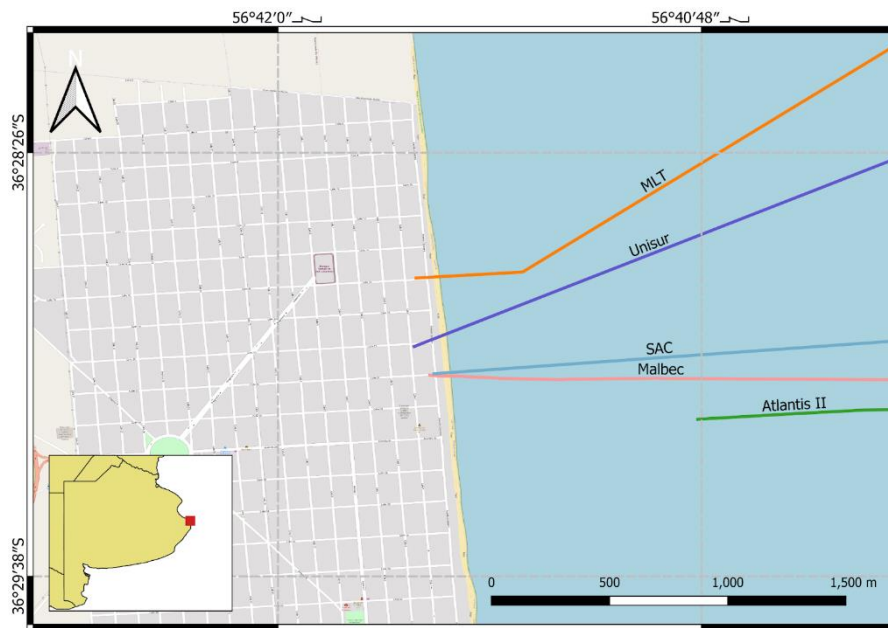
## 1.2 Localización de los cables

Actualmente, Las Toninas presenta la particularidad de ser el único ingreso desde el mar a la Argentina de siete cables de fibra óptica para la utilización de internet: Malbec, South America-1 (SAm-1), Tannat, Unisur, Bicentenario, South American Crossing (SAC) y Atlantis-2. Esta situación hace de esta localidad un punto clave para la infraestructura en telecomunicaciones del país, motivo suficiente para la ejecución de un plan de protección de su entorno costero.

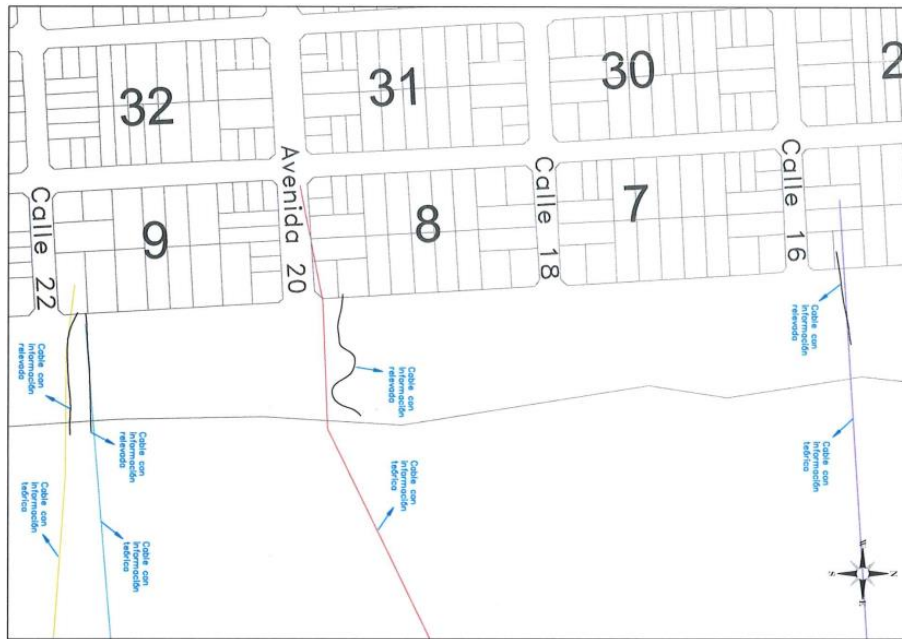
A partir de la colaboración del Departamento de Seguridad Náutica del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) se logró contar con la información precisa de la traza georreferenciada de la acometida de los cables submarinos que ingresan al país Figura 1.2. Estos ingresos, al menos en la zona más crítica del frente costero de acuerdo a los aspectos erosivos, fueron verificados durante el relevamiento topobatimétrico realizado por Cura & Jordan (2021).



a) Localización de ingreso de cables de fibra óptica en Las Toninas.



b) Localización de cables del sector de interés (Las Toninas Norte).



c) Detalle de cables de fibra óptica localizados in-situ (Cura & Jordan, 2021).

Figura 1.2. Impactos de la erosión costera sobre la línea municipal de la avenida Costanera en Las Toninas

### 1.3 Sudestada de marzo de 2021

La sudestada ocurrida el 17 de marzo de 2021 puso de manifiesto la situación de vulnerabilidad ante este tipo de eventos en que se encuentran algunos sectores del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires. Los impactos de este evento se concentraron en el Partido de la Costa, afectando principalmente las localidades de San Clemente del Tuyú, Las Toninas, Santa Teresita, Mar del Tuyú, y en menor medida San Bernardo y Nueva Atlantis.

En Las Toninas, la crecida alcanzó la línea municipal, erosionando calles y veredas y afectando mobiliario urbano (luminarias, pasarelas, etc.) e infraestructura urbana (redes de desagües cloacales, de gas, etc.). El mayor impacto se observó en el tramo que va de las calles 6 a 20 (Figura 1.3), aunque también se relevaron afectaciones considerables en el tramo restante (calles 20 a 58). Este evento demostró el alto grado de vulnerabilidad a la erosión costera en que se encuentra la localidad, específicamente en el tramo en el que se cuenta con muy poco ancho de playa y la duna costera no se observa constituida.



a) Sector Calle 6



b) Sector Calle 8

Figura 1.3. Impactos de la sudestada de marzo de 2021 (Dada Productora, material provisto por el Departamento Costa Marítima de la Dirección Provincial de Hidráulica).

#### 1.4 Obra propuesta

La magnitud del impacto de la sudestada de marzo de 2021 ha promovido el contacto entre las autoridades del Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires, específicamente de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH), y el Instituto Nacional del Agua (INA), a los efectos de brindar el asesoramiento técnico destinado a la elaboración de un plan de estudios para la evaluación del predimensionamiento de una obra de protección basada en la ejecución de una serie de rompeolas semisumergidos, paralelos y separados de la línea de costa (diques exentos o shore-parallel breakwaters por su nombre en inglés).

Desde la Subgerencia Laboratorio de Hidráulica se estudiará mediante modelación numérica la performance de una serie de alternativas de obra que protejan el frente costero desde calle 6

hasta calle 24. La protección total contempla los tramos que van de calle 6 a 16, donde no existe desarrollo de duna y son recurrentes los procesos erosivos, y de calle 16 a calle 24, donde ingresan los cables de fibra óptica. Se considerará el mismo nivel de protección en todo el tramo.

### **1.5 Informe de avance**

En este informe de avance se detallan las primeras actividades realizadas en el marco de este proyecto. En el Capítulo 2 se muestra la metodología de propagación de las condiciones de oleaje en la línea de Boyas Virtuales de la costa bonaerense (Tomazin et al., 2020) hasta el entorno de la zona de implantación de la obra. Luego en el Capítulo 3 se presenta una estrategia de modelación numérica de ondas de tormenta con el software XBeach que se utilizará para la evaluación de performance de la obra. Finalmente, en el Capítulo 4 se desarrolla una serie de alternativas de obra de acuerdo a criterios empíricos que luego serán evaluados con los modelos numéricos.

## 2 Propagación de oleaje

### 2.1 Boyas virtuales

En el marco del proyecto “*Tecnologías para el diseño y adaptación al cambio climático de un Plan Estratégico Regional de Manejo Costero en la Provincia de Buenos Aires*” (CTCN/UNIDO) (Tomazin et al., 2020), y a partir de la utilización de herramientas de modelación numérica, observaciones puntuales y observaciones remotas se realizó un reanálisis o análisis retrospectivo (*hindcast*) de las principales variables de la hidrodinámica del tramo costero marítimo bonaerense Pehuen-Co - San Clemente. A partir de este reanálisis surgió el producto Boyas Virtuales, como una herramienta de utilidad para la caracterización del clima marítimo bonaerense consistente en series de las variables referidas a viento (intensidad y dirección), niveles de marea y oleaje (altura significativa de ola, período, dirección media, entre otras), concentrada en un conjunto de puntos ficticios en dos alineamientos diferentes: 55 boyas virtuales ubicadas a 13 km de la costa separadas unos 10 km entre sí (BV-A) y 12 boyas virtuales ubicadas a 35 km de la costa con una separación de unos 50 km (BV-B). En estas locaciones se logró reconstruir la información del clima marítimo generando series de varios años: período 1985-2016 para los niveles y 1979-2018 para el oleaje y el viento.

En la Figura 2.1 puede observarse la zona de interés (dominio a modelar) y la presencia de dos boyas virtuales en las cercanías, las boyas 53 y 54, ambas pertenecientes al grupo de boyas BV-A. Dada la similitud entre los datos de ambas boyas, se procedió a efectuar las modelaciones con la información de la boya 54.

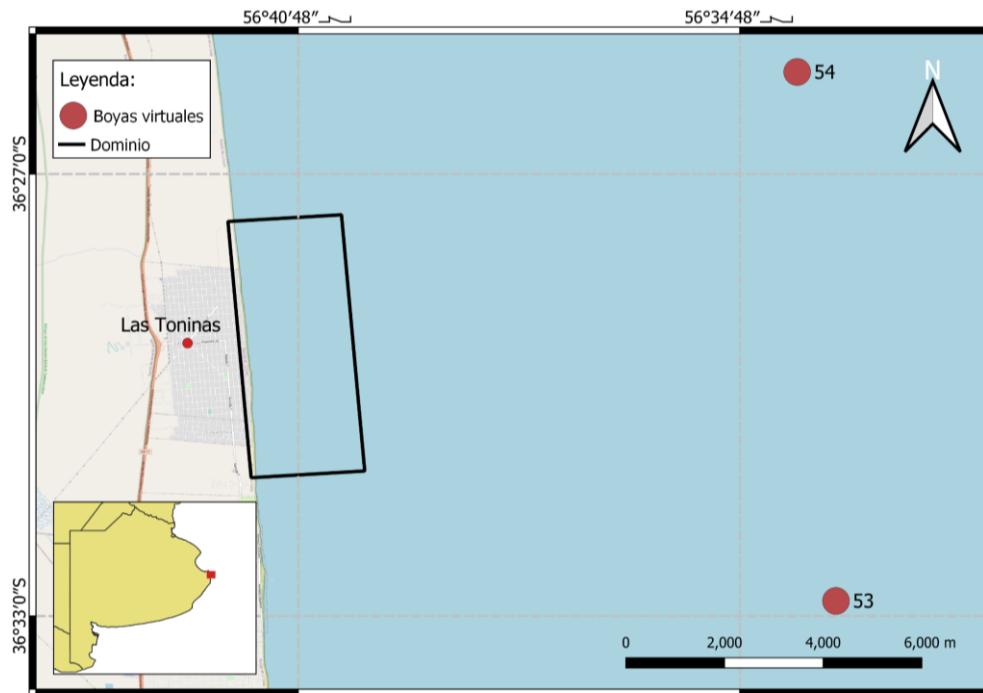


Figura 2.1. Ubicación de las boyas virtuales más próximas a Las Toninas (BV-A 53 y BV-A 54).

## 2.2 Propagación de oleaje desde boyas virtuales

La propagación del oleaje hasta la zona de emplazamiento para el proyecto de las obras de defensa tiene el propósito de obtener una caracterización mejorada del clima de olas en cercanías de la costa.

Mediante la implementación del modelo numérico SWAN (*Simulating WAVes Nearshore, Delft University of Technology*) fue posible trasladar la información de base disponible en el área de las boyas virtuales hasta la zona de interés para el estudio.

Esta tarea fue desarrollada en dos etapas. En primera instancia, se realizó una propagación del oleaje desde la zona de boyas virtuales hasta el área costera de Punta Médanos (a una distancia aproximada de 40 km al sur de la localidad de Las Toninas), donde la disponibilidad de datos de alturas significativas de ola registradas entre los años 1981 y 1982 permitió realizar una validación del modelo SWAN. En segunda instancia, contando con el modelo validado y calibrado, la propagación del oleaje hasta el área de Las Toninas posibilitó obtener la caracterización detallada del clima de olas en la zona de emplazamiento de las obras proyectadas.

### 2.2.1 Software SWAN

El software SWAN es un modelo numérico de 3ª generación desarrollado para el cálculo de olas generadas por viento, y su propagación en aguas costeras. El mismo incorpora las formulaciones de generación, propagación, disipación e interacción no lineal entre ondas<sup>1</sup>.

El modelo se basa en la resolución numérica de la ecuación general de balance de energía en el dominio del tiempo y del espacio, teniendo en cuenta los efectos de refracción. La ecuación de balance de energía contiene los términos que describen la energía aportada por el viento, y por otra la disipada por fricción, rotura del oleaje y la interacción no lineal entre frecuencias espectrales del oleaje que cumplen determinadas condiciones de resonancia entre ellas. Los modelos numéricos que resuelven la ecuación que describe este balance se clasifican como de 1ª generación o modelos desacoplados (cuando cada componente espectral evoluciona independientemente de las otras frecuencias), de 2ª generación (cuando la relación no lineal entre ondas del espectro se expresa en forma paramétrica) y de 3ª generación (cuando no se impone ninguna forma al espectro y la ecuación de propagación de energía se resuelve totalmente, incluyendo términos no lineales).

En síntesis, SWAN incorpora la representación de los siguientes procesos físicos:

- Generación del oleaje por acción del viento.
- Propagación del oleaje en tiempo y espacio, bajo, refracción por corrientes y profundidad.
- Interacción entre el oleaje.
- Fricción de fondo, rotura por profundidad, descrestamiento (*whitecapping*).
- Disipación por diversos factores.
- Apilamiento por oleaje (*wave set-up*).
- Transmisión y reflexión en obstáculos.
- Difracción del oleaje.

### 2.2.2 Implementación

La implementación del modelo implica, por una parte, la definición del tipo y dimensiones de la malla de cálculo y los datos de entrada (profundidades en los nodos de esa malla o mapa digital del lecho marino) y, por otra parte, un archivo cronológico conteniendo la secuencia de datos de olas en el borde oceánico y vientos en el área de modelación.

La información topobatemétrica utilizada para este modelo proviene de dos fuentes: 1) la digitalización de la carta náutica del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) H114 (escala 1:250.000), y 2) los relevamientos locales del área de detalle realizados para el desarrollo de estos estudios (Cura & Jordan, 2021).

---

<sup>1</sup> <http://www.swan.tudelft.nl>

Sobre la base antedicha se construyeron dos mallas elementos finitos que abarcan un área modelada de 4100 km<sup>2</sup> y de 230 km<sup>2</sup>, utilizadas para la propagación del oleaje en Punta Médanos y en Las Toninas, respectivamente (Figura 2.2).

La malla de mayor tamaño utiliza información de las Boyas Virtuales ubicadas a mayor profundidad (BV45, BV46, BV46) y permite verificar la calidad de la información disponible en las Boyas Virtuales más cercanas a la costa (BV45 a BV54). La misma se encuentra conformada por 67208 elementos triangulares y 34018 nodos. El distanciamiento entre nodos varía desde un orden de 350 m en la zona más alejada del área de interés, a 175 m en la zona de detalle.

La malla de menor tamaño utiliza información de las Boyas Virtuales BV53 y BV54, se encuentra conformada por 20988 elementos triangulares y 10785 nodos. El distanciamiento entre nodos varía desde un orden de 250 m en la zona más alejada del área de interés, a 50 m en la zona de detalle.

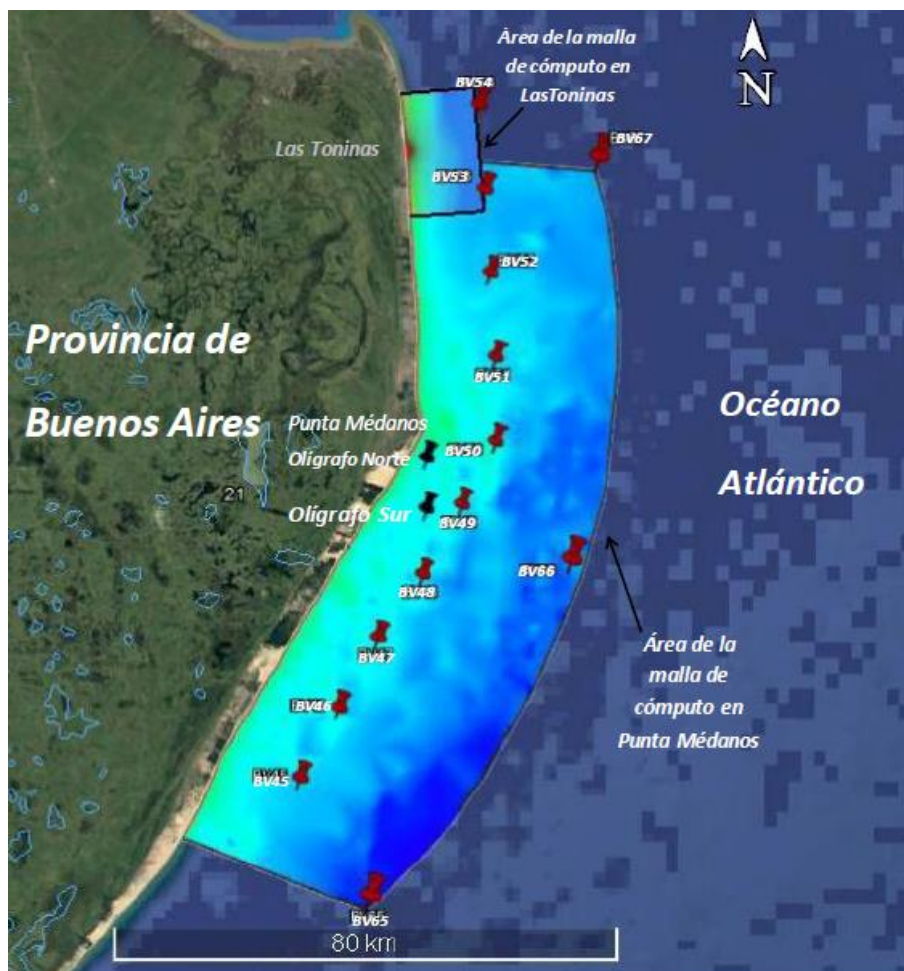


Figura 2.2. Dominios de modelación de propagación del oleaje.

Sobre ambos dominios de cálculo, el modelo fue implementado en modo no estacionario, con una simulación continua en la que van cambiando los datos de entrada en sucesivos pasos de tiempo. Los datos variables en esta aplicación son la velocidad y la dirección del viento, los cuales se consideran uniformemente distribuidos en toda el área modelada, y las condiciones de borde del oleaje (altura significativa  $H_s$ , período de pico  $T_p$  y dirección) impuestas en los bordes oceánicos.

### 2.2.3 Validación

Utilizando la información mencionada se realizó la simulación del oleaje sobre el dominio de mayor tamaño con el propósito de obtener datos de olas en área costera de Punta Médanos coincidiendo con las fechas de registros disponibles del SHN. Dichos datos fueron obtenidos por mediciones continuas realizadas entre los años 1981 y 1982 en dos olígrafos (Norte y Sur) instalados en cercanías del área costera de Punta Médanos, a una profundidad aproximada de 10 m (Figura 2.2). La Figura 2.3 muestra la comparación entre resultados obtenidos en la modelación y las mediciones directas realizadas por el olígrafo Norte entre marzo de 1981 y marzo de 1982.

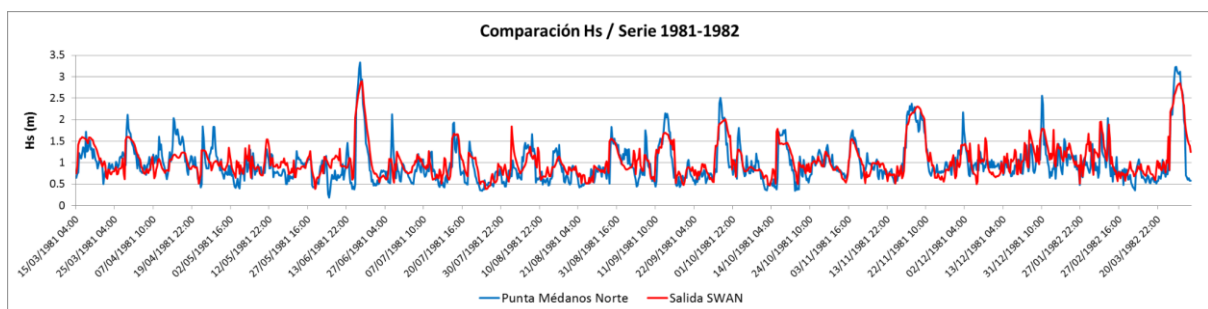


Figura 2.3. Modelación de la altura significativa de ola ( $H_s$ ) en Punta Médanos.

Se puede apreciar una buena concordancia entre las series cronológicas de altura significativa del oleaje ( $H_s$ ) medida y simulada. Este nivel de aproximación se logró calibrando el modelo mediante el ajuste del factor de fricción del lecho marino y un coeficiente de corrección para los datos de viento.

Sobre la totalidad de los datos disponibles se realizó un análisis que permitió comparar en términos estadísticos los valores de  $H_s$  registrados con los valores simulados para el mismo período. Las Figuras 2.4 y 2.5 muestran la comparación entre datos simulados y registrados en forma de histograma de distribución de  $H_s$  y curva de frecuencia acumulada, respectivamente.

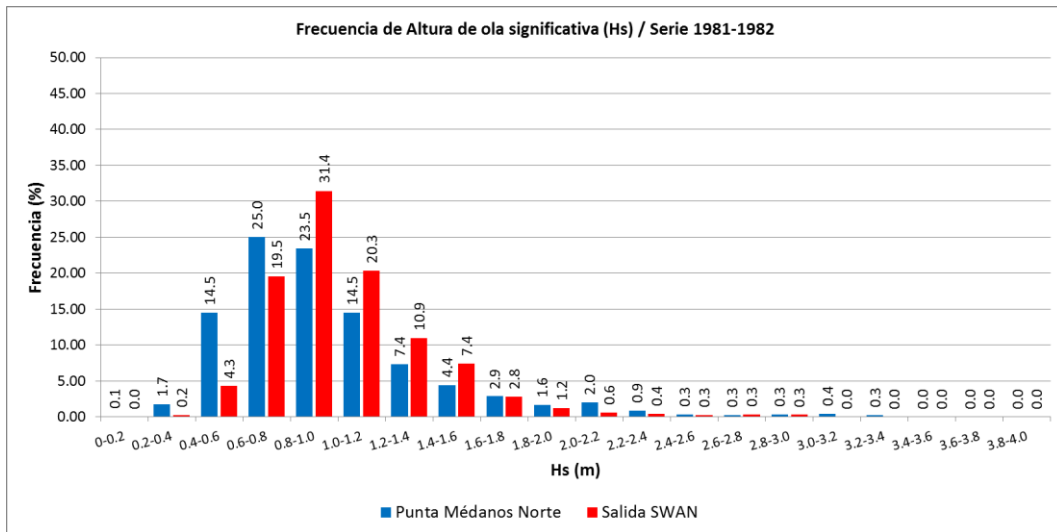


Figura 2.4. Distribución de alturas significativas del oleaje.

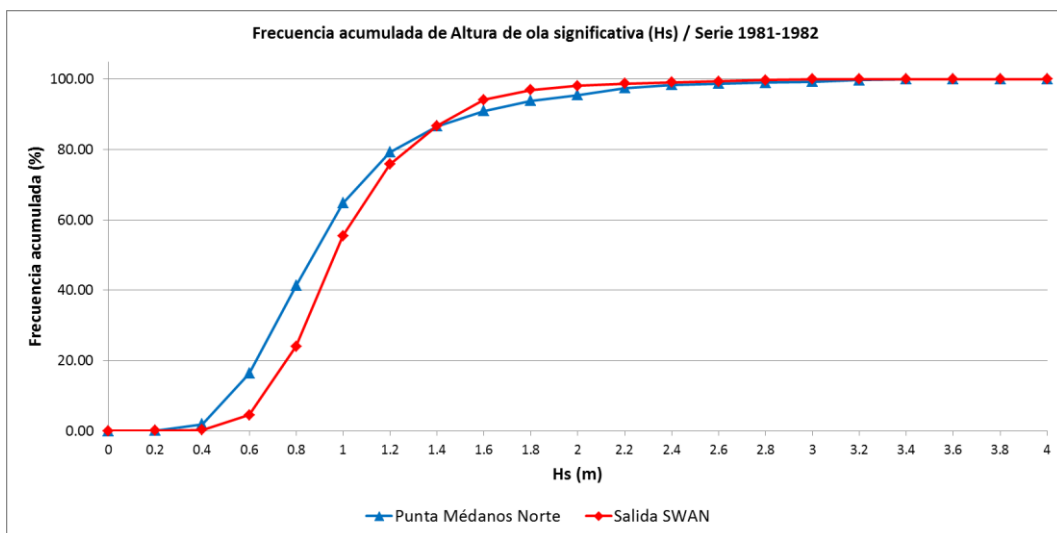


Figura 2.5. Curva de frecuencia acumulada para la altura significativa.

Del mismo modo que en la comparación de las series cronológicas, los resultados del análisis estadístico muestran un ajuste razonable entre la población de datos simulados y los datos del registro.

En consecuencia, se asume que el modelo de propagación del oleaje, junto con los datos de base disponibles, constituyen una herramienta apropiada para la caracterización del clima de olas en el área de estudio.

#### 2.2.4 Oleaje en Las Toninas

La misma estrategia de modelación fue implementada para propagar el oleaje desde las Boyas Virtuales hasta la zona de emplazamiento del proyecto. La Figura 2.6 muestra la zona de detalle para la modelación. En la misma, a modo ilustrativo se destaca la ubicación de tres propuestas de configuración del esquema de obra junto a la posición de los perfiles topobatimétricos relevados (Cura & Jordan, 2021), incluidos en el modelo de detalle.



Figura 2.6. Zona de emplazamiento del proyecto y ubicación de puntos de control.

Se señala también la ubicación de dos puntos de control seleccionados para caracterizar el oleaje mediante los resultados de la modelación: el primero de ellos, denominado “perfil de playa”, se encuentra en el límite de la extensión de los perfiles, a una profundidad aproximada de 7 m; mientras que el segundo, denominado “rompeolas”, se ubica en la zona de emplazamiento de las estructuras de defensa, a una profundidad aproximada de 2.5 m.

La modelación numérica realizada consistió en una simulación continua en un período de 15 años (1985-1999) para los cuales se dispuso de información de vientos, olas y niveles.

Los resultados de esta modelación consistieron en series horarias de  $H_s$ ,  $T_p$  y Dirección del oleaje para el período de años señalado. Los mismos se presentan a continuación en forma de gráficos y tablas que sintetizan la gran cantidad de información generada.

En primer lugar, las Figuras 2.7 y 2.8 muestran las rosas de oleaje correspondientes a los dos puntos de control mencionados. Estos gráficos contienen la información presentada sobre un par de ejes en coordenadas polares. Este tipo de gráfico resulta especialmente útil para la representación de datos de oleaje, ya que permite interpretar con claridad, en una misma figura,

la distribución de diferentes rangos de alturas de ola para la totalidad de las direcciones de incidencia junto con frecuencia de ocurrencia de estas.

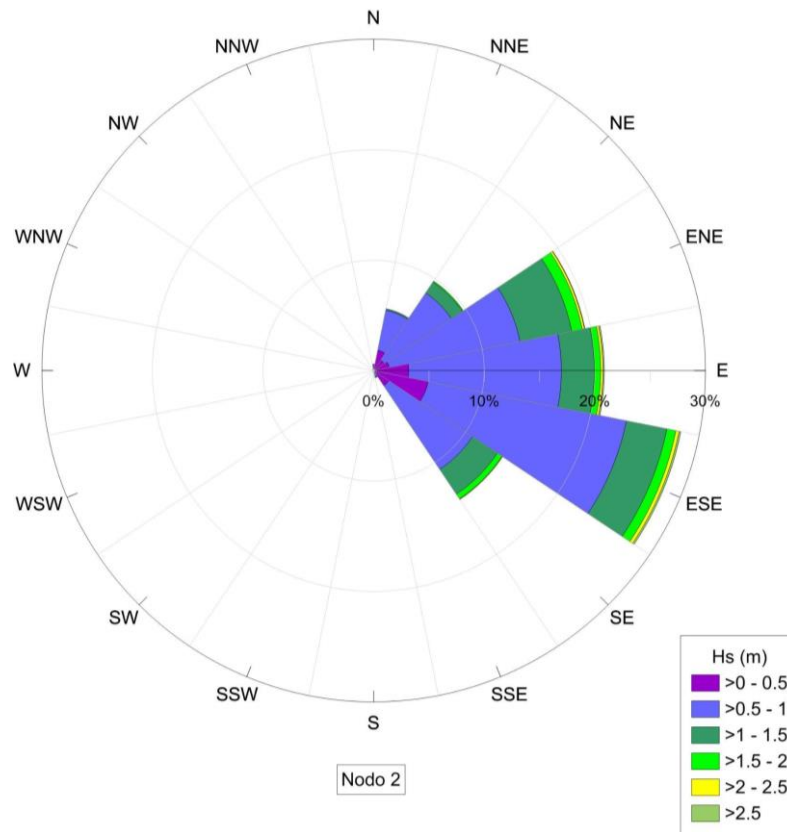


Figura 2.7. Rosa de olas en el punto denominado 'perfil de playa', sobre la isobata de 7 m.

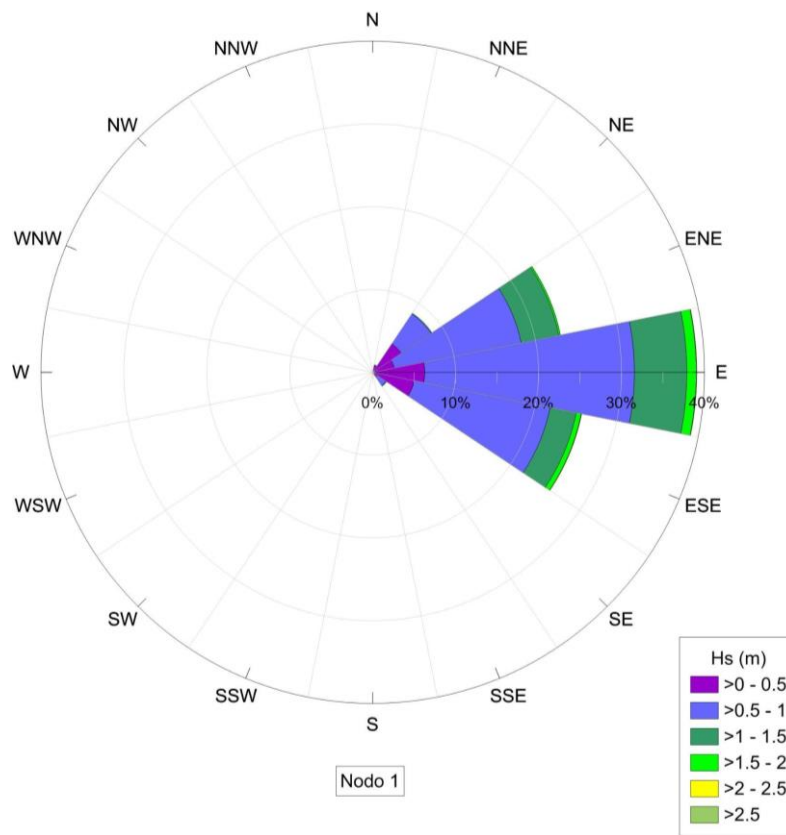


Figura 2.8. Rosa de olas en el punto denominado 'rompeolas', sobre la isobata de 2.5 m.

La comparación entre ambas rosas muestra claras diferencias en la caracterización del oleaje para las ubicaciones analizadas. Mientras que en punto de "perfil de playa" predomina el oleaje proveniente del sector ESE, a la zona de "rompeolas" llegan olas predominantemente desde el E. Este hecho hace notar la importancia de los procesos físicos intervinientes en la transformación del oleaje (fundamentalmente refracción, bajío y disipación por fricción), los cuales tienen una incidencia significativa en la zona costera con bajas profundidades modificando la altura y dirección de propagación de las olas.

En la Figura 2.9 se brinda una caracterización más amplia del oleaje frecuente en la zona de emplazamiento de los rompeolas.

Hs (m)	Ø																Totales
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0-0.5	0.13%	0.81%	4.14%	2.65%	6.28%	5.11%	0.61%	0.07%	0.06%	0.06%	0.05%	0.05%	0.04%	0.04%	0.03%	0.06%	20.18%
0.5-1	0.00%	0.12%	4.34%	15.60%	25.27%	16.70%	1.33%	0.05%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	63.42%
1-1.5	0.00%	0.00%	0.11%	4.63%	6.32%	3.22%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	14.35%
1.5-2	0.00%	0.00%	0.00%	0.19%	1.14%	0.61%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.94%
2-2.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.11%
<b>Totales</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.93%</b>	<b>8.59%</b>	<b>23.07%</b>	<b>39.06%</b>	<b>25.69%</b>	<b>2.02%</b>	<b>0.12%</b>	<b>0.07%</b>	<b>0.06%</b>	<b>0.05%</b>	<b>0.05%</b>	<b>0.04%</b>	<b>0.04%</b>	<b>0.03%</b>	<b>0.06%</b>	<b>100.00%</b>

a) Frecuencia relativa de altura significativa de ola

Hs (m)	Tp (s)														Totales
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	10-11	11-12	13-14	14-15	16-17	19-20	
0-0.2	0.04%	0.01%	0.04%	0.03%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.13%
0.2-0.4	0.17%	0.21%	1.25%	2.21%	0.61%	0.37%	0.46%	0.73%	0.71%	0.78%	0.32%	0.12%	0.04%	0.01%	8.01%
0.4-0.6	0.02%	0.12%	1.98%	10.26%	2.92%	1.77%	1.35%	2.27%	2.41%	3.07%	1.38%	0.45%	0.10%	0.03%	28.12%
0.6-0.8	0.00%	0.00%	0.39%	10.04%	5.51%	2.09%	1.25%	2.32%	2.76%	2.92%	1.53%	0.40%	0.09%	0.01%	29.31%
0.8-1	0.00%	0.00%	0.02%	3.24%	6.40%	1.98%	0.74%	1.11%	1.51%	1.78%	0.94%	0.27%	0.03%	0.00%	18.02%
1-1.2	0.00%	0.00%	0.00%	0.50%	3.18%	2.74%	0.22%	0.44%	0.56%	0.69%	0.56%	0.17%	0.01%	0.00%	9.06%
1.2-1.4	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.76%	2.25%	0.14%	0.14%	0.24%	0.26%	0.22%	0.10%	0.00%	0.00%	4.16%
1.4-1.6	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.13%	1.15%	0.13%	0.06%	0.10%	0.18%	0.11%	0.05%	0.01%	0.00%	1.92%
1.6-1.8	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.41%	0.12%	0.05%	0.09%	0.09%	0.06%	0.01%	0.00%	0.00%	0.82%
1.8-2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%	0.07%	0.06%	0.04%	0.03%	0.03%	0.02%	0.00%	0.00%	0.33%
2-2.2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.10%
2.2-2.4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.02%
<b>Totales</b>	<b>0.22%</b>	<b>0.34%</b>	<b>3.68%</b>	<b>26.32%</b>	<b>19.50%</b>	<b>12.86%</b>	<b>4.51%</b>	<b>7.21%</b>	<b>8.46%</b>	<b>9.82%</b>	<b>5.14%</b>	<b>1.61%</b>	<b>0.27%</b>	<b>0.05%</b>	<b>100.00%</b>

b) Frecuencia relativa de altura significativa de ola en función del período pico del oleaje

Tp (s)	Ø																Totales
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
1-2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.05%	0.05%	0.03%	0.03%	0.02%	0.00%	0.22%
2-3	0.01%	0.10%	0.12%	0.01%	0.00%	0.02%	0.03%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.34%
3-4	0.03%	0.32%	1.50%	0.93%	0.31%	0.37%	0.15%	0.02%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	3.68%
4-5	0.07%	0.46%	5.75%	9.24%	5.14%	4.58%	0.96%	0.07%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	26.32%
5-6	0.00%	0.02%	0.92%	7.24%	5.83%	4.84%	0.63%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	19.50%
6-7	0.00%	0.01%	0.05%	3.68%	5.69%	3.34%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	12.86%
7-8	0.00%	0.01%	0.03%	0.41%	3.03%	1.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.51%
8-9	0.00%	0.01%	0.06%	0.45%	4.63%	2.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.21%
10-11	0.00%	0.01%	0.06%	0.44%	5.01%	2.88%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	8.46%
11-12	0.00%	0.01%	0.08%	0.46%	5.44%	3.79%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	9.82%
13-14	0.00%	0.00%	0.02%	0.14%	2.82%	2.14%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	5.14%
14-15	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.93%	0.64%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.61%
16-17	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.19%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.27%
19-20	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%
<b>Totales</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.93%</b>	<b>8.59%</b>	<b>23.07%</b>	<b>39.06%</b>	<b>25.69%</b>	<b>2.02%</b>	<b>0.12%</b>	<b>0.07%</b>	<b>0.06%</b>	<b>0.05%</b>	<b>0.05%</b>	<b>0.04%</b>	<b>0.04%</b>	<b>0.03%</b>	<b>0.06%</b>	<b>100.00%</b>

c) Frecuencia relativa de altura significativa de ola en función de la dirección media de la componente de máxima energía del oleaje

Figura 2.9. Oleaje frecuente en la zona de implantación de obras.

La relación entre alturas de ola y dirección de propagación muestra el predominio ya señalado del E, con valores de Hs entre 0.5 m y 1.0 m con un porcentaje de 25.27%. Le siguen en importancia, para el mismo rango de Hs, las direcciones ESE (16.7%) y ENE (15.6%). También, se indica que valores de Hs por encima de 1.5 m tienen porcentajes de ocurrencia apenas superiores al 2%.

Con respecto al período de pico  $T_p$ , se observa el predominio de valores entre 4 y 5 seg (26.32%), destacándose el rango de alturas de ola entre 0.4 y 0.8 m. Los eventos asociados a oleaje de swell, considerando valores de  $T_p$  por encima de 8 seg, agrupan un total de 32.56% de casos, con un predominio del rango de  $T_p$  entre 11 y 12 seg (9.82%).

Las olas con valores de  $T_p$  entre 4 y 5 seg inciden predominantemente desde el ENE, mientras que los casos de swell corresponden preferentemente al E y ESE.

Finalmente, la Figura 2.10 aporta información sobre el oleaje extremo, presentándose los valores máximos anuales por dirección para el período 1985-1999 en los dos puntos de control seleccionados.

Hs (m) $\phi$																	
Año	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
1985	0.37	0.61	0.96	1.46	2.06	2.03	1.26	0.56	0.27	0.21	0.19	0.18	0.29	0.30	0.33	0.35	2.06
1986	0.45	0.57	1.47	1.69	1.84	1.85	1.08	0.51	0.48	0.42	0.36	0.34	0.22	0.41	0.29		1.85
1987	0.43	0.61	0.98	1.51	1.82	1.75	1.25	0.66	0.49	0.21	0.20	0.21	0.33	0.42	0.28	0.31	1.82
1988	0.30	0.61	1.14	1.60	1.98	2.09	0.95	0.58	0.38	0.20	0.23	0.18				0.36	2.09
1989		0.61	1.30	1.63	2.23	2.13	1.12	0.76	0.56	0.44	0.34	0.29	0.30	0.31			2.23
1990	0.47	0.66	1.01	1.51	1.93	2.09	1.11	0.76	0.63	0.36	0.31	0.30	0.25	0.26	0.21	0.40	2.09
1991	0.29	0.66	1.22	2.09	2.14	1.90	1.03	0.49	0.43	0.40	0.50	0.54	0.54	0.24	0.25	0.27	2.14
1992	0.48	0.66	1.20	1.78	1.84	1.98	1.26	0.79	0.56	0.37	0.32	0.32	0.39	0.45	0.49	0.38	1.98
1993	0.48	0.68	1.37	1.60	2.31	2.38	1.25	0.60	0.45	0.38	0.32	0.34	0.37	0.41	0.27	0.46	2.38
1994	0.52	0.64	1.18	1.90	2.14	2.09	1.21	0.65	0.48	0.48	0.31	0.33	0.37	0.43		0.42	2.14
1995	0.32	0.42	1.22	1.58	1.83	2.00	1.05	0.64	0.44	0.40	0.39	0.28			0.22	0.28	2.00
1996	0.44	0.58	1.19	1.55	1.93	1.84	1.32	0.57	0.45	0.38			0.38	0.24			1.93
1997	0.40	0.56	0.94	1.70	1.82	1.74	1.04	0.73	0.61	0.52	0.36	0.44	0.31	0.40	0.30	0.38	1.82
1998		0.69	1.13	1.75	2.13	2.18	1.20	0.78	0.55	0.46	0.41						2.18
1999	0.40	0.62	1.37	1.79	1.99	2.00	1.18	0.63	0.23		0.24	0.31	0.35	0.28	0.39	0.39	2.00
<b>Total</b>	<b>0.52</b>	<b>0.69</b>	<b>1.47</b>	<b>2.09</b>	<b>2.31</b>	<b>2.38</b>	<b>1.32</b>	<b>0.79</b>	<b>0.63</b>	<b>0.52</b>	<b>0.50</b>	<b>0.54</b>	<b>0.54</b>	<b>0.45</b>	<b>0.49</b>	<b>0.46</b>	<b>2.38</b>

a) Zona de implantación de obras.

Hs (m) $\phi$																	
Año	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
1985	0.85	0.92	1.60	1.78	1.77	2.33	2.23	1.03	0.72	0.43	0.25	0.24	0.43	0.61	0.36	0.55	2.33
1986	1.03	1.27	1.84	2.54	2.71	2.19	1.93	1.03	0.83	0.77	0.57	0.55	0.45	0.65	0.60	0.79	2.71
1987	0.83	1.11	1.45	1.96	2.06	2.20	1.82	1.56	0.87	0.71	0.27	0.26	0.69	0.59	0.70	0.68	2.20
1988	0.77	1.35	1.76	2.73	2.93	2.77	1.71	1.01	0.61	0.48	0.32	0.39	0.25	0.52	0.57	0.39	2.93
1989	0.82	1.10	1.61	2.14	3.14	2.59	2.35	1.31	0.79	0.60	0.55	0.43	0.42	0.48	0.51	0.61	3.14
1990	0.80	1.19	1.58	1.94	2.40	2.95	2.91	1.43	1.04	0.86	0.77	0.48	0.76	0.73	0.64	0.65	2.95
1991	0.77	1.17	2.00	3.04	3.03	2.97	1.76	1.14	0.69	0.69	0.75	0.87	0.79	0.28	0.34	0.38	3.04
1992	0.69	1.31	1.67	2.75	2.82	2.46	2.79	1.31	0.93	0.81	0.68	0.49	0.68	0.70	0.55	0.69	2.82
1993	0.80	1.01	2.41	2.03	2.89	3.19	2.59	1.12	0.79	0.62	0.55	0.58	0.57	0.62	0.66	0.67	3.19
1994	0.87	1.64	1.69	2.72	2.73	2.86	2.62	1.28	0.88	0.69	0.53	0.51	0.56	0.71	0.64	0.84	2.86
1995	0.68	1.13	1.42	2.83	2.53	2.39	2.30	1.10	0.94	0.42	0.65	0.48			0.60	0.45	2.83
1996	0.84	1.23	1.89	2.30	2.90	2.24	2.21	1.07	0.71	0.63	0.56		0.58		0.30	0.73	2.90
1997	0.71	0.86	1.43	2.56	2.57	2.10	2.12	1.27	0.97	0.87	0.75	0.65	0.58	0.63	0.45	0.57	2.57
1998	0.68	1.28	1.70	2.34	2.85	3.05	2.08	1.24	0.98	0.92	0.78					0.27	3.05
1999	0.90	1.20	1.96	2.88	2.61	2.47	2.15	1.16	0.76	0.70		0.63	0.53	0.59	0.71	0.80	2.88
<b>Total</b>	<b>1.03</b>	<b>1.64</b>	<b>2.41</b>	<b>3.04</b>	<b>3.14</b>	<b>3.19</b>	<b>2.91</b>	<b>1.56</b>	<b>1.04</b>	<b>0.92</b>	<b>0.78</b>	<b>0.87</b>	<b>0.79</b>	<b>0.73</b>	<b>0.71</b>	<b>0.84</b>	<b>3.19</b>

b) Zona de inicio de perfiles de playa relevados.

Figura 2.10. Valores máximos anuales de oleaje.

La comparación entre los máximos anuales de altura de ola correspondientes a ambos sitios muestra diferencias consistentes con los aspectos señalados para el caso del oleaje frecuente. Los valores de  $H_s$  en la zona de implantación de obras resultan sensiblemente menores que en la zona de inicio de perfil.

En efecto, para los 15 años de datos se computa un valor promedio de  $H_s$  para los máximos anuales en la zona de obras de 2.10 m y un máximo de 2.38 m correspondiente al año 1993. Mientras que para el inicio de perfil el promedio da un valor de  $H_s=2.83$  m, con un máximo de 3.19 m en el año 1993.

Tal como puede observarse, para la zona de obras los máximos anuales de  $H_s$  corresponden siempre a las direcciones E y ESE, mientras que para la zona de inicio de perfil aparece también el aporte del ENE en algunos años.

## 3 Modelación de ondas de tormenta

En este capítulo se presenta una introducción a la simulación de ondas de tormenta y sus impactos sobre la costa. Para esto se describe el software XBeach, se reproduce un ejemplo de la literatura y se realiza una aplicación de validación en Las Toninas.

### 3.1 Software XBeach

El software XBeach, desarrollado en Deltares en los Países Bajos (Roelvink et *al.*, 2009), permite estudiar el impacto de ondas de tormenta sobre sectores costeros con una aproximación unidimensional (sobre el perfil de playa) o bidimensional. Este software es de libre disponibilidad y de relativamente bajo costo computacional. Ha sido desarrollado con financiación del US Army Corps of Engineers, Rijkswaterstaat (Países Bajos) y la Unión Europea, apoyado por un consorcio de UNESCO-IHE, Deltares (inicialmente WL|Delft Hydraulics), Delft University of Technology y la Universidad de Miami.

La simulación numérica de diferentes problemas vinculados a la gestión costera utilizando el software XBeach permite tomar mejores decisiones en los siguientes casos que habitualmente se reconocen en la costa marítima bonaerense: rellenos y nivelación en balnearios en la previa de la temporada de verano, impacto de la intervención sobre dunas, evaluación de medidas no estructurales y diseño de infraestructura para el control de la erosión. Este software se ha utilizado en diferentes zonas costeras del mundo y en la región se cuentan antecedentes como los de Alonso et *al.* (2018) y Montecinos Díaz (2021).

XBeach simula varios procesos hidrodinámicos entre los que se encuentran la transformación de ondas cortas (refracción, asomeramiento y rompimiento), la transformación de olas largas (ondas de infragravedad; generación, propagación y disipación), el set-up inducido por olas y corrientes impermanentes, el sobrepaso y la inundación.

Por su parte, entre los procesos morfodinámicos que se simulan se incluyen el transporte de sedimentos de fondo y en suspensión, desmoronamiento, actualización batimétrica y apertura de brechas.

Atendiendo a estos procesos, XBeach resuelve un juego de cinco ecuaciones diferenciales parcialmente acopladas:

- El balance de la acción de las olas cortas.
- El balance de energía en la zona de rompiente.
- La ecuación hidrodinámica de aguas poco profundas (para el flujo medio).

- La ecuación de transporte de sedimentos, suspendidos y de fondo.
- La evolución morfológica del fondo.

El preprocesamiento de las simulaciones se realiza a través de dos módulos complementarios del software Delft3D (Deltares) denominados RGFGRID y QUICKIN, mientras que el postprocesamiento de los resultados obtenidos se efectúa a partir de herramientas propias elaboradas con el lenguaje de programación Python 3.

### 3.2 Validación de la metodología

Para garantizar un correcto manejo del software XBeach se replicó el trabajo de Razak y Nor (2018) en el que se simulan los cambios morfológicos sobre la costa que se producen dada la presencia de un dique exento ante la acción de un oleaje estacionario incidiendo en forma perpendicular a la playa.

Con el objetivo de realizar el mismo ejercicio de simulación, poniendo a punto los sistemas computacionales a utilizar durante este estudio, se adoptaron los siguientes parámetros del problema detallados en Razak y Nor (2018) (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1. Parámetros de la simulación de Razak y Nor (2018).**

<i>Conjunto de datos</i>	<i>Variable</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Dominio y grilla	Tamaño del dominio	2100 x 790	m
	Tamaño de celdas	10 x 10	m
	Cantidad de celdas en dirección x	79	-
	Cantidad de celdas en dirección y	210	-
Dimensiones del rompeolas	Largo	300	m
	Ancho	20	m
	Alto	1.61	m
	Altura sobre el nivel del mar	1	m
	Distancia a la costa	120	m

Características del oleaje	Periodo de oleaje - $T_p$	8	s
	Altura de oleaje obtenida por error cuadrático medio - $H_{rms}$	2	m
	Altura significativa de ola - $H_s$	2.83	m
	Dirección de propagación del oleaje - $\theta$	270	°
Características del sedimento	Tamaño - D50	250	$\mu\text{m}$
	Tamaño - D90	350	$\mu\text{m}$
Características de la simulación	Nivel del mar	0.61	m
	Período simulado	50	días
Parámetros de la modelación numérica	Factor de oblicuidad y asimetría - $facua$	0.1	-
	Coefficiente de rugosidad de Chezy - $bedfriccoef$	60	-
	Dispersión direccional del oleaje - $dtheta$	10	°
	Factor de aceleración morfológica - $morfac$	100	-

La simulación fue planteada estrictamente bajo las mismas condiciones mencionadas en Razak y Nor (2018) obteniéndose los resultados que se presentan en las Figuras 3.1 y 3.2. Se observa un alto grado de acuerdo entre los resultados del modelo generado por Razak y Nor (2018) y el modelo implementado por este grupo de trabajo. Si bien no hay una coincidencia exacta entre ambos, se especula que las diferencias se deben a la definición de algunos parámetros numéricos no detallados en Razak y Nor (2018) y a la infraestructura computacional utilizada. A pesar de esto, se observa una clara formación de tómbolo y una modificación muy similar de las curvas de nivel de la playa.

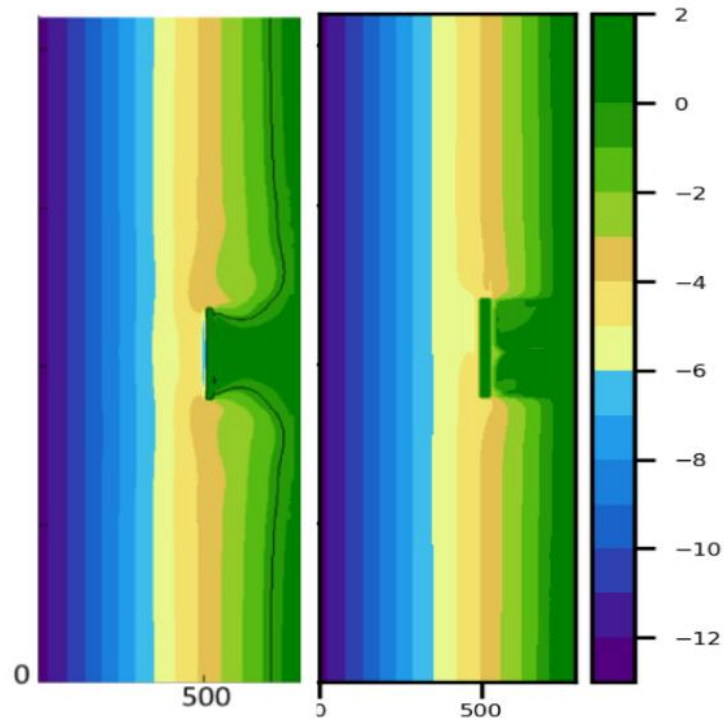


Figura 3.1. Comparación de resultados obtenidos por Razak y Nor (2018, izquierda) y con modelo propio (derecha) - Cambios morfológicos.

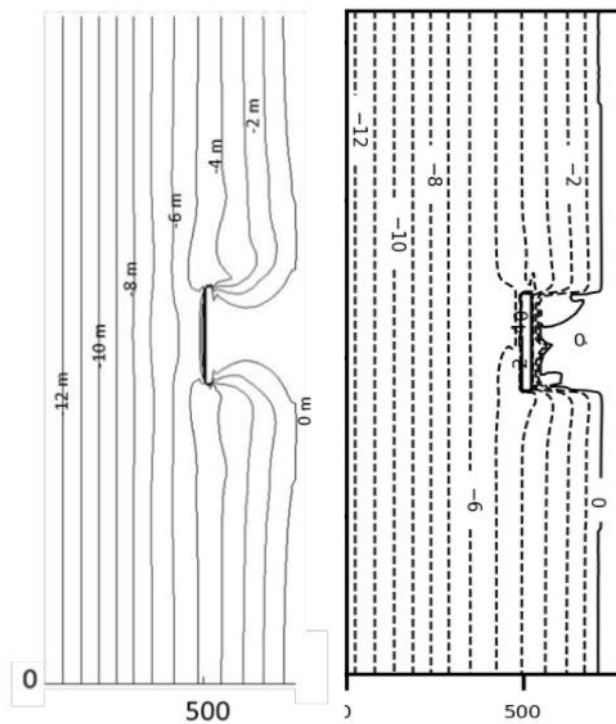


Figura 3.2. Comparación de resultados obtenidos por Razak y Nor (2018, izquierda) y con modelo propio (derecha) - Curvas de nivel resultantes.

Adicionalmente, y a modo de ejemplo, se muestra la Figura 3.3 que denota la gran utilidad de este tipo de modelos numéricos producto del análisis sobre el perfil de playa. En este caso, se observa un corte transversal de la estructura modelada en este ejercicio junto con las modificaciones morfológicas en valor absoluto y relativo.

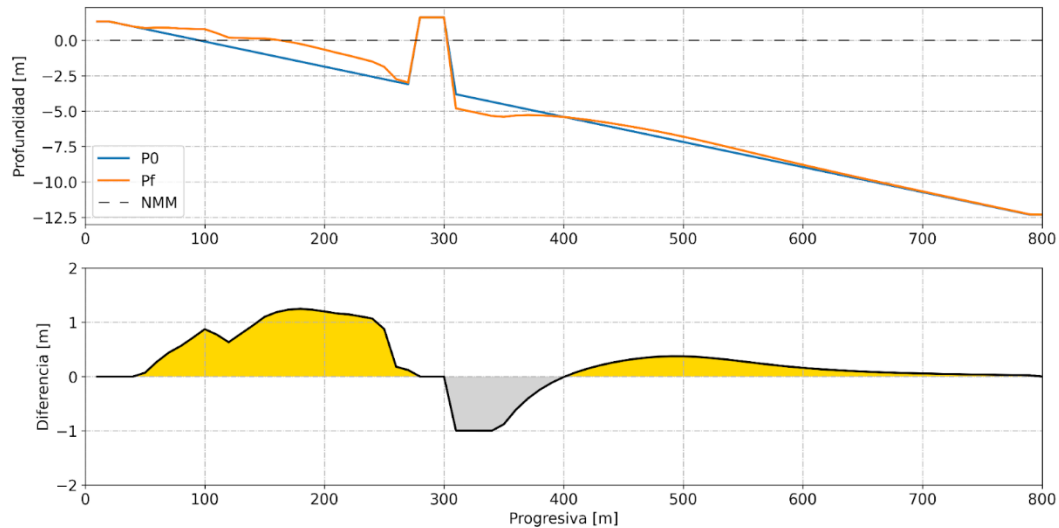


Figura 3.3. Corte transversal del modelo. Cambios morfológicos absolutos (superior) y relativos (inferior; depositación y erosión).

### 3.3 Aplicación en Las Toninas

#### 3.3.1 Selección de temporal para Las Toninas

En este ítem se plantea la simulación con XBeach de un evento de tormenta en Las Toninas con el objetivo de iniciar el proceso de calibración del sistema de modelación. La elección de un temporal para realizar esta modelación debe cumplir con las siguientes características: ser de reciente ocurrencia y contar con información suficiente para poder representarlo en la modelación (implementación y calibración).

Se realizó un proceso de selección utilizando información de las Boyas Virtuales (Tomazin et al., 2020). Debido a la limitación temporal de la componente de niveles de estas boyas, el año más reciente que cuenta con información tanto de niveles como de oleaje es el 2016. Por lo tanto, se identificaron cuatro ondas de tormenta de gran magnitud ocurridas en ese año: 25-27 de julio, 5-7 de septiembre, 13-15 de septiembre y 26-28 de octubre. Entre estos, se seleccionó el evento de octubre para este análisis, por tratarse del de mayor magnitud: la altura de ola significativa alcanzó en la línea de Boyas Virtuales frente a Las Toninas un valor de 3,9 m y los niveles superaron los 2,6 m (cero MOP) (Figura 3.4).

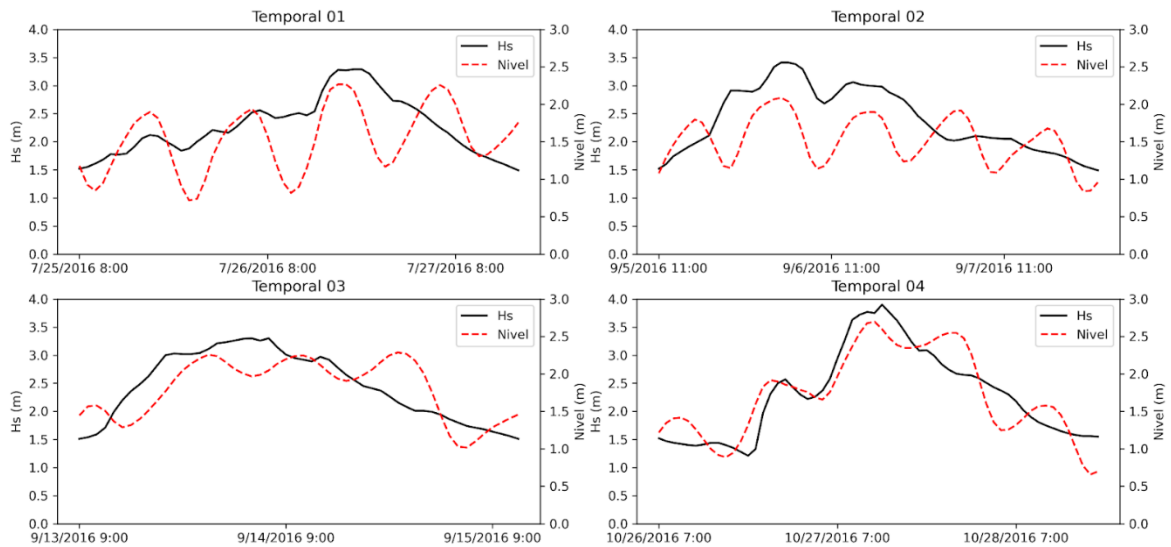


Figura 3.4. Temporales de gran magnitud para el año 2016 en la Boya Virtual 54.

### 3.3.2 Observación de la línea de costa

Se utilizó información satelital para poder calibrar la respuesta del modelo ante los cambios morfológicos sobre la línea de costa por impacto del temporal. La posibilidad de contar con imágenes capturadas antes y después de un evento permite cuantificar la modificación en la línea de costa.

En el caso del temporal seleccionado (octubre 2016) se cuenta con imágenes del 14/10/2016 y del 30/10/2016 (el pico del evento fue el 27/10/2016), entre las cuales se observa una distancia entre líneas de costa que oscila entre los 14 y los 47 metros (32 metros en promedio; Figura 3.5). Cabe aclarar que en esta figura las líneas de costa que se representan no cuentan con una corrección por nivel del mar y que la imagen satelital del fondo presenta una situación de marea baja de Sicigia sin componente meteorológico.

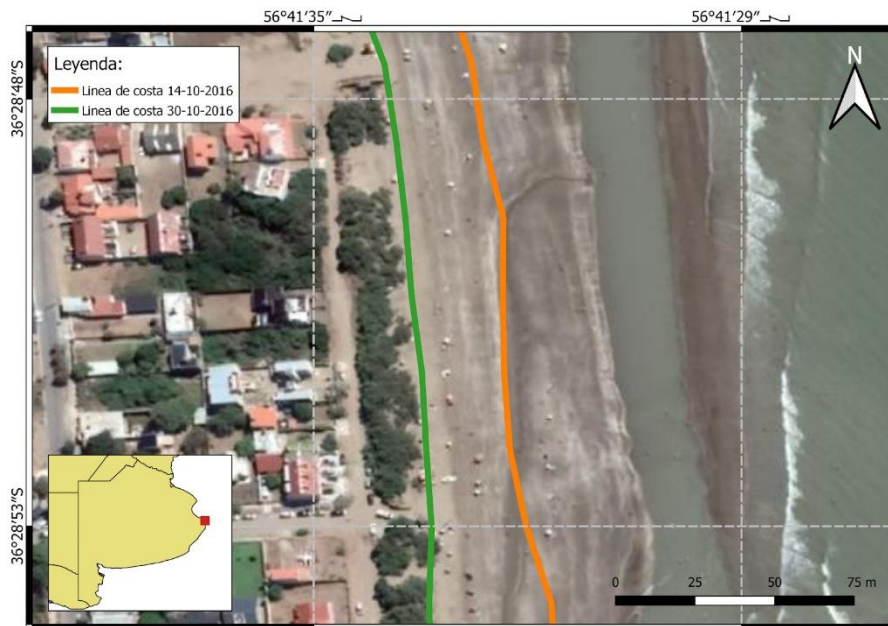


Figura 3.5. Líneas de costa anterior y posterior al temporal de octubre 2016.

Esta metodología de seguimiento de líneas de costa con información satelital requiere de un proceso de adquisición y procesamiento de imágenes que puede ser implementado con la herramienta USGS Earth Explorer, la cual permite, entre otras cosas, la descarga rápida de imágenes Landsat de libre disponibilidad.

Para este caso, se utilizaron las imágenes de los sensores OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor) a bordo del satélite Landsat 8, operativo desde 2013. Estos instrumentos recogen datos de imagen de nueve bandas de onda corta con resolución espacial de 30 m (visible, NIR y SWIR) y 15 m (pancromático), y dos bandas térmicas de onda larga con resolución espacial de 100 m, respectivamente. El Landsat 8, por su parte, tiene una órbita heliosincrónica (705 km de altitud) con un período de revisita de 16 días y una cobertura espacial por escena de 185 x 180 km.

También fue necesario disponer de datos de niveles medidos por el Servicio Hidrografía Naval en Santa Teresita, por ser el punto de medición más cercano a Las Toninas (4 km de distancia). De esta manera, fue posible vincular la fecha y hora de las imágenes obtenidas con una altura del nivel del mar. Los criterios aplicados para la selección de las imágenes fueron:

- a. Nubosidad muy baja o nula en la zona de interés.
- b. Ubicación temporal de las imágenes lo más próxima posible al temporal analizado (tanto antes como después).

Para delimitar la línea de costa, el primer paso consistió en clasificar los píxeles de las imágenes seleccionadas en dos categorías: agua y tierra. Esto se realizó a partir de la utilización del Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI), que permite diferenciar los territorios

cubiertos por agua de aquellos que no lo están (Xu, 2006). La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR)$$

donde *Green* es la banda del verde (banda 3 del sensor OLI) y *MIR* es la banda del infrarrojo medio (banda 6 del sensor OLI). Los valores positivos de este índice clasifican a los píxeles en la categoría agua, mientras que valores de cero o negativos están asociados a la vegetación, el suelo o las construcciones (Matsushita, 2016). No obstante, según Xu (2006), la mejor caracterización de la superficie de agua de una imagen se consigue utilizando un valor umbral de 0,09. Este valor fue el que se utilizó para clasificar los píxeles de las imágenes en agua (1 si  $MNDWI > 0,09$ ) o tierra (0 si  $MNDWI \leq 0,09$ ).

### 3.3.3 Implementación del modelo

#### 3.3.3.1 Dominio

Para este modelo se decidió representar el frente costero de Las Toninas en su totalidad, por lo que el dominio de cálculo presenta una extensión de 6.5 km en sentido paralelo a la costa (con eje central en la Calle 28) y unos 2.3 km en sentido transversal partiendo desde la Calle 1 (Figura 3.6). En todo el dominio se adoptó una grilla regular, de celdas cuadradas de 10 metros de lado.

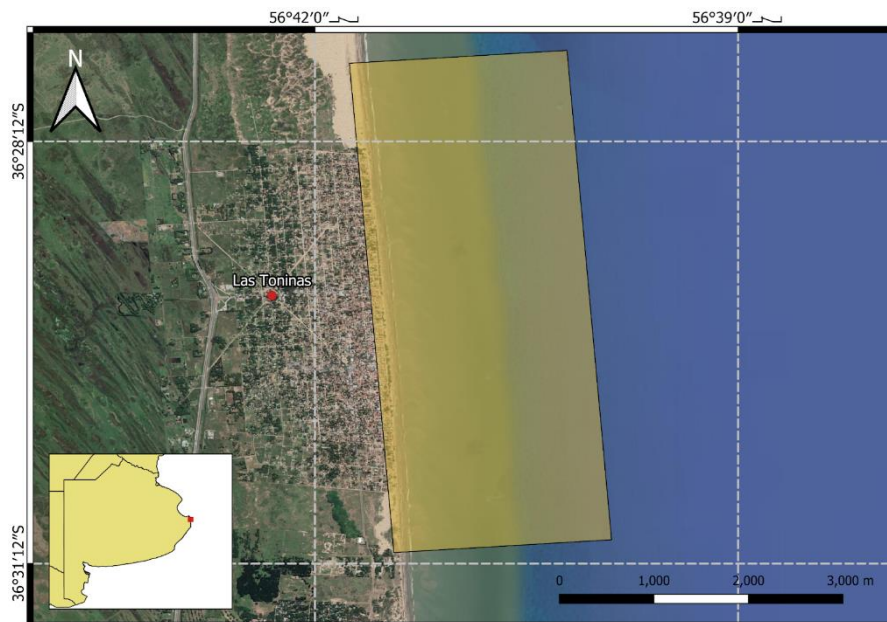


Figura 3.6. Dominio de modelación.

El dominio temporal de la simulación va desde el 14/10/2016 a las 11:00 horas hasta el 30/10/2016 a las 11:00 horas, abarcando el lapso entre las imágenes satelitales previas y posteriores al temporal.

El dominio cuenta con tres bordes abiertos: uno paralelo a la costa (off-shore) y dos perpendiculares (laterales).

### 3.3.3.2 Topobatemetría

La batimetría del modelo, al no contar con un relevamiento con fecha cercana al período de simulación, se generó a partir de la combinación de datos provistos por distintas fuentes libremente disponibles.

En primer lugar, se digitalizó la carta H-114 del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), que abarca desde la mitad de la Bahía de Samborombón hasta Miramar, la zona contenida entre la costa y el meridiano  $55^{\circ}40''$ .03W (Figura 3.7).

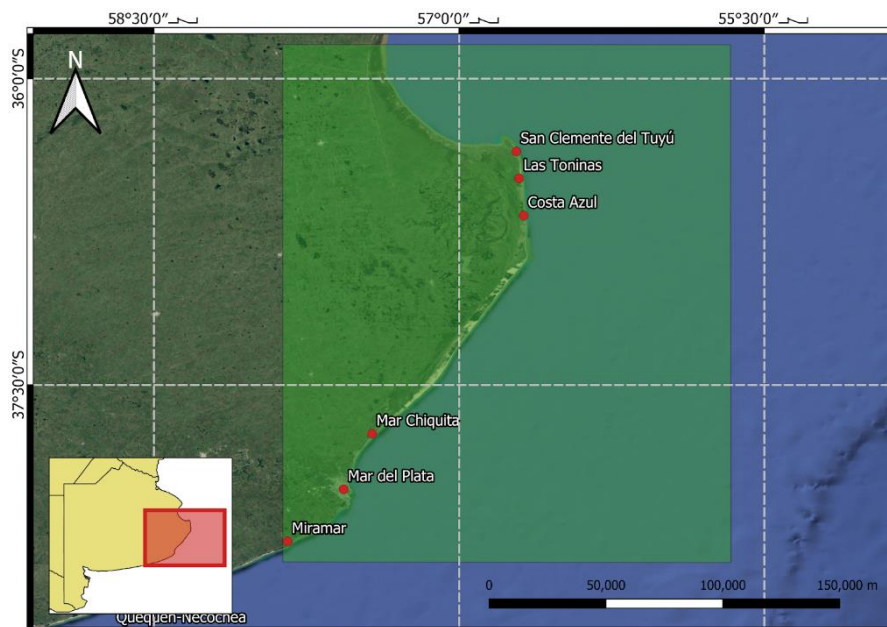


Figura 3.7. Extensión de carta H-114 provista por el Servicio de Hidrografía Naval.

En segundo lugar, se utilizaron los datos del Modelo Digital de Elevación 3757-10 realizado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), que consiste en información topográfica en formato matricial con una resolución de 30x30 metros y abarca la zona terrestre desde San Clemente del Tuyú hasta Costa Azul, desde la costa hasta unos 28 km hacia el Oeste (Figura 3.8).

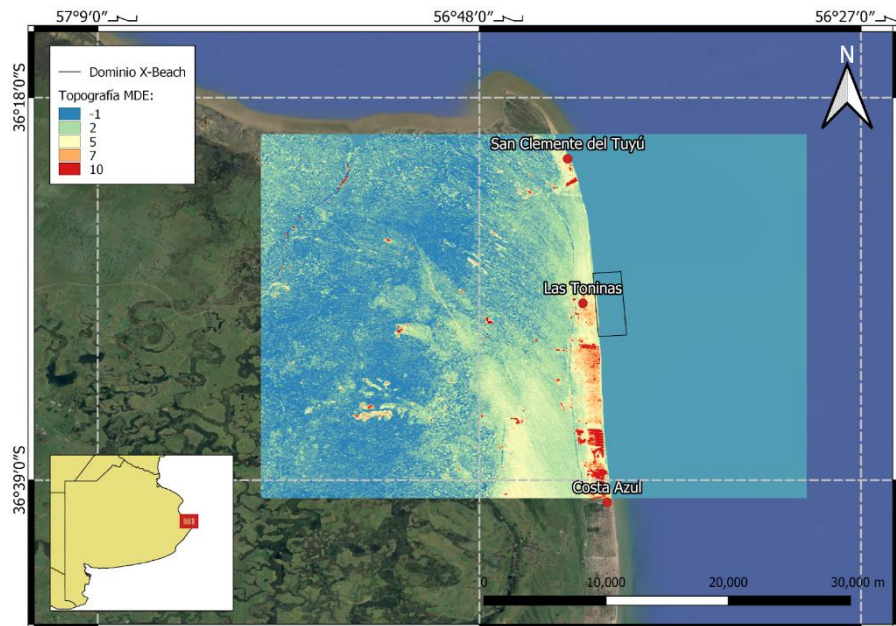


Figura 3.8. Modelo Digital de Elevación 3757-10 (IGN).

Para representar fielmente la topobatemetría de la zona de playa se utilizó la línea de costa obtenida por imágenes satelitales en la fecha previa al temporal analizado (14/10/2016) y se adicionaron dos curvas de nivel idénticas a esta, pero a una altura y distancia tal que permita recrear las características de la zona de playa descrita por Marcomini y López (2010), en donde se menciona que presenta un ancho variable de 80 a 100 m desde la línea de baja marea media hacia la duna y una pendiente media de 0,015 y no se reconocen bermas estables ni estacionales en ningún período del año.

La Figura 3.9 presenta el modelo digital del terreno utilizado para esta modelación, en donde se contempla la topobatemetría generada combinando toda la información disponible de este sector costero.

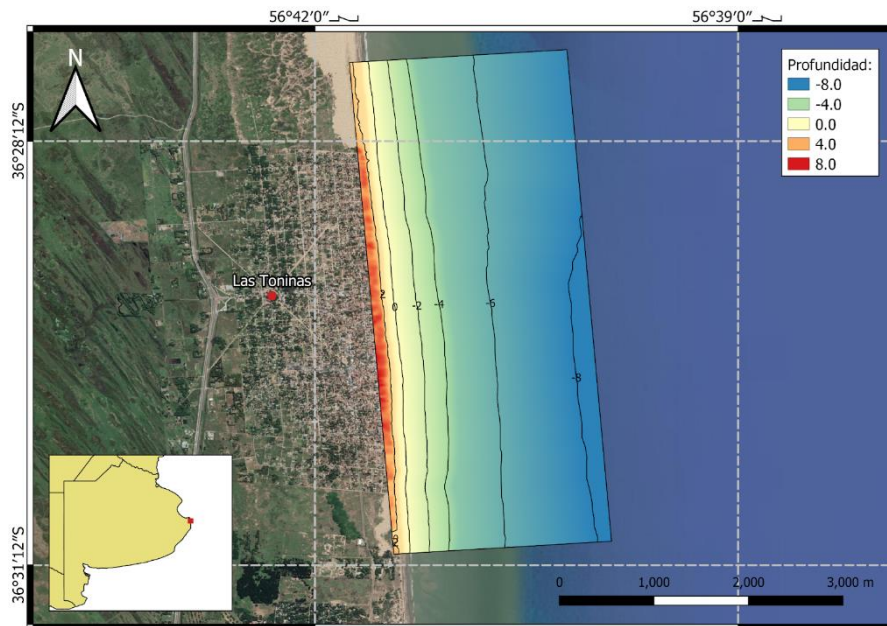


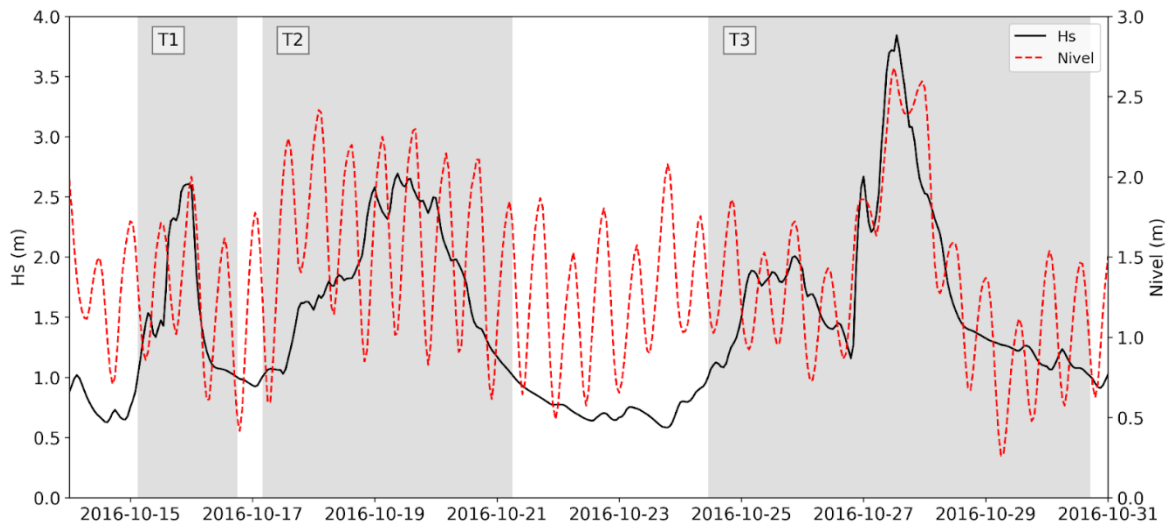
Figura 3.9. Modelo digital del terreno utilizado para la modelación.

### 3.3.3.3 Forzantes

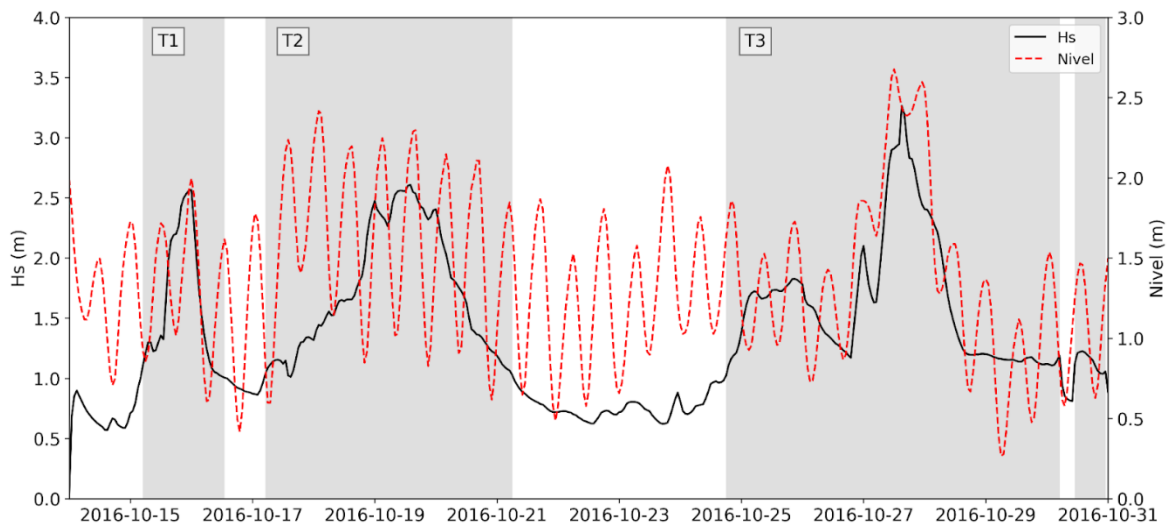
En el borde off-shore (paralelo a la costa, borde este) se imponen los forzantes del modelo. En este caso se determina la serie de niveles y condiciones de oleaje de acuerdo a la propagación de la información que se dispone en la Boya Virtual 54.

En los bordes laterales (perpendiculares a la costa, bordes norte y sur), se impone la condición de Neumann, lo que implica que en las celdas que lo conforman los gradientes de niveles y velocidades son nulos.

En la Figura 3.10 se observan los niveles y la altura de ola en la Boya Virtual 54 y en el Borde Este del dominio para el período de simulación. Puede observarse que dentro de este período se produjeron tres temporales donde la altura del oleaje se mantuvo de manera sostenida por encima del valor de  $H_s=1.5$  m tanto en la Boya Virtual como en el Borde Este. En particular, se trata de dos temporales de menor escala (T1 y T2), con alturas de oleaje que superan los 2.5 m y similar comportamiento en la Boya Virtual y en el Borde Este, y un tercer temporal de mayor magnitud (T3), donde se presenta una reducción evidente del valor máximo de altura significativa de ola desde la Boya Virtual al Borde Este.



a) Boya Virtual 54



b) Borde Este

Figura 3.10. Niveles [m MOP] y altura significativa de ola en la Boya Virtual 54 y en el Borde Este del modelo.

### 3.3.3.4 Condicionantes

Sobre la topografía costera existe un amplio sector cubierto por vegetación. Actualmente la duna se encuentra vegetada en gran medida con especies arbóreas (*Tamarix gallica*), que cambian notoriamente su dinámica por interrumpir el intercambio natural de arena con la playa (Marcomini y López, 2010). Además, se presentan estructuras que actúan como mecanismo de protección de márgenes (por ejemplo, bajadas a la playa).

Por lo tanto, dado el notorio efecto que ambas tipologías aportan sobre la reducción de la capacidad erosiva de la playa, se procedió a modelar ambas superficies como “zonas no

erosionables” condicionando la dinámica de la playa. En la Figura 3.11 se presenta a modo ilustrativo un sector con duna vegetada.



Figura 3.11. Zonas no erosionables: protección de márgenes y vegetación.

### 3.3.3.5 Calibración

Como estrategia de calibración se plantea una comparación de la evolución de la línea de costa simulada respecto de la observada a partir de imágenes satelitales. Este proceso de calibración se considera cuali-cuantitativo debido a las limitaciones que ofrece el seguimiento de la línea de costa mediante información satelital.

La resolución de las imágenes LANDSAT utilizadas es de 30 m y la distancia horizontal entre las curvas de nivel comparadas (antes y después del temporal) es del mismo orden de magnitud ( $\approx 32$  m). Adicionalmente, no se contó con relevamientos topobatimétricos de precisión para la zona y el período modelado. Es por eso que lo que se buscó en este proceso fue obtener un cambio morfológico que sea del mismo orden de magnitud que el capturado por estas imágenes.

Para evaluar la performance de la calibración del modelo desde el aspecto cuantitativo, a sabiendas de sus limitaciones, se obtuvieron los valores de dos indicadores en los que se compararon los valores observados y simulados del corrimiento de la línea de costa: Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y Coeficiente de correlación de Pearson R:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - y_n)^2}{N}}$$

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - \bar{S})(y_n - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (\hat{y}_n - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{M})^2}}$$

donde

$\hat{y}_n$  es la diferencia (en metros) entre puntos inicial y final de las líneas de costa obtenidas con imágenes satelitales.

$y_n$  es la diferencia (en metros) entre puntos inicial y final de las curvas de nivel del modelo.

$\bar{S}$  es el promedio de las diferencias (en metros) entre puntos iniciales y finales de las líneas de costa obtenidas con imágenes satelitales.

$\bar{M}$  es el promedio de las diferencias (en metros) entre puntos iniciales y finales de las curvas de nivel del modelo.

N es la cantidad de puntos.

Ambos indicadores fueron aplicados a las curvas obtenidas de la diferencia entre las curvas de nivel de cota +0.76 MOP y +1.26 MOP resultantes de cada modelo en comparación con la curva obtenida mediante la diferencia entre las líneas de costa de las imágenes satelitales.

Se consideraron los siguientes parámetros de calibración del modelo:

- Factor de aceleración morfológica (*morfac*): es un coeficiente que se aprovecha de las distintas escalas de tiempo de la hidrodinámica y la evolución morfológica, y que consiste en aplicar un factor constante (*morfac*) a los flujos de sedimento en cada paso de tiempo hidrodinámico, traduciéndose en una disminución en el costo computacional de la simulación. Se aplicaron valores de *morfac* de 1, 3, 5 y 7, obteniendo los mejores resultados con *morfac* = 5.
- Coeficiente de fricción de Chezy (*C*). Para un valor de *morfac* = 5, se aplicaron valores del coeficiente de fricción de Chezy de 35, 40, 45, 50 y 60. Los mejores resultados de RMSE se obtuvieron para *C* = 40 mientras que los mejores valores de R se obtuvieron para *C* = 50. Finalmente, en base al análisis general del acuerdo de los dos indicadores se adoptó el parámetro *C* = 40.

Los indicadores calculados para cada simulación pueden observarse en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Indicadores obtenidos durante la calibración del parámetro C (coeficiente de fricción de Chezy).

Indicador	C = 30	C = 35	C = 40	C = 45	C = 50	C = 60
RMSE (m)	7.82	7.71	7.60	8.00	8.60	11.68
R	0.56	0.59	0.63	0.68	0.73	0.64

## 3.4 Resultados

### 3.4.1 Evolución de la línea de costa

Con los parámetros de calibración definidos ( $\text{morfac} = 5$  y  $C = 0.40$ ) se obtuvieron los siguientes valores en los indicadores de performance:  $\text{RMSE} = 7.60$  y  $R = 0.63$ . Además, para completar el análisis se obtuvo que la distancia promedio entre las curvas de nivel modelada y observada es de 1.7 m. Mientras que el RMSE acumula las diferencias entre una curva y otra independientemente de la ubicación relativa de estas, el promedio de las diferencias tiene en cuenta esto último mediante el signo (positivo o negativo en función de qué curva se encuentre más próxima al médano), haciendo que las mismas se compensen. Los resultados de la evolución de la línea de costa según la observación satelital y la modelación numérica se presentan en la Figura 3.12.

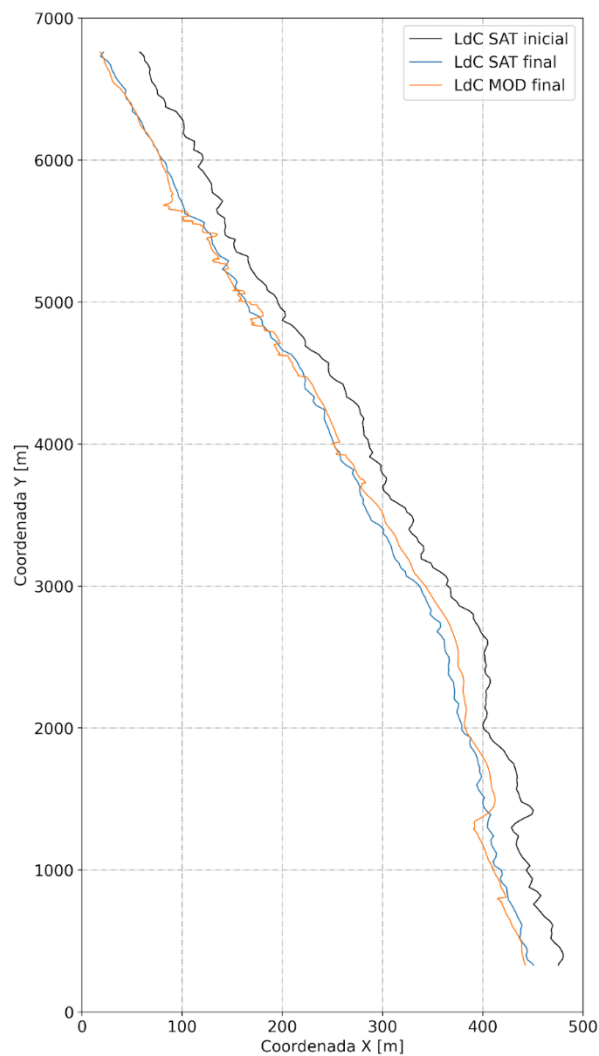


Figura 3.12. Curvas de nivel previas y posteriores al temporal de octubre 2016 obtenidas mediante imágenes satelitales y el modelo calibrado.

La falta de información topobatemétrica de detalle en la zona de mayor interés (dunas, playa distal y playa frontal) dificulta la posibilidad de obtener una calibración de mayor precisión. Además, la limitante referida a la precisión de la observación satelital también se impone como una condición a tener en cuenta. De todas maneras, dado que la respuesta de la modelación es consistente con lo observado satelitalmente al máximo nivel de precisión alcanzable de acuerdo a la información disponible y a los criterios cuali-cuantitativos utilizados en el proceso, se puede considerar por calibrado el modelo.

A modo de complementación de la evaluación de las simulaciones se realizaron comparaciones con lo expuesto en Marcomini y López (2010), en donde se realiza un análisis de la evolución de perfiles relevados en Las Toninas durante el período 1998-2009. La caracterización de sectores de playa se presenta de acuerdo a lo señalado en Bertola (2006). En Marcomini y Lopez (2010) se destaca que la acción de eventos de tormenta erosiona la playa frontal y moviliza bermas, disminuyendo la pendiente y generando barras en la zona de transformación.

Los resultados de las simulaciones para una situación posterior a la ocurrencia del temporal muestran procesos de erosión en la playa frontal, disminución de pendiente y generación de barras. Esto puede observarse para todo el dominio (Figura 3.13) y para los distintos perfiles de playa seleccionados a modo de ejemplo (Figuras 3.14, 3.15 y 3.16).

En la Figura 3.13 se distingue la presencia de dos barras. Una de mayor envergadura, que podría considerarse como el reservorio natural mencionado por Marcomini y López (2010), situada aproximadamente entre las isobatas de 2 y 2.5 m (ejemplo (Figuras 3.14 y 3.15), y a unos 360 metros de la isobata 0 IGN de la batimetría inicial, con una extensión que abarca la totalidad de Las Toninas y un ancho de unos 130 m, ocupando parte de la playa interior y de la playa exterior. La segunda es una barra localizada en la zona de rompiente (Figuras 3.13 y 3.16), que resulta de igual altura, pero más pequeña, tanto en extensión (desde calle 26 hasta calle 56) como en ancho (aproximadamente 20 m).

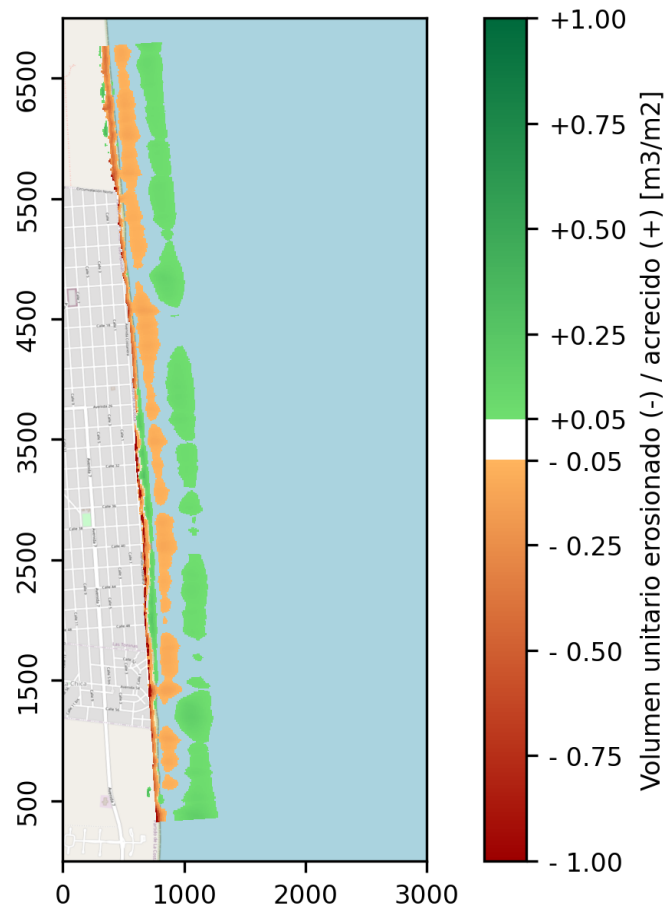


Figura 3.13. Cambios morfológicos en planta resultantes al final de la simulación del temporal de octubre 2016.

En las Figuras 3.14 a 3.16 se presenta la disminución de la pendiente en las playas frontal y distal, junto con el retroceso del pie de médano, que se evidencia más fuertemente en el perfil de la calle 30 en donde la erosión supera el valor de 1.4 m.

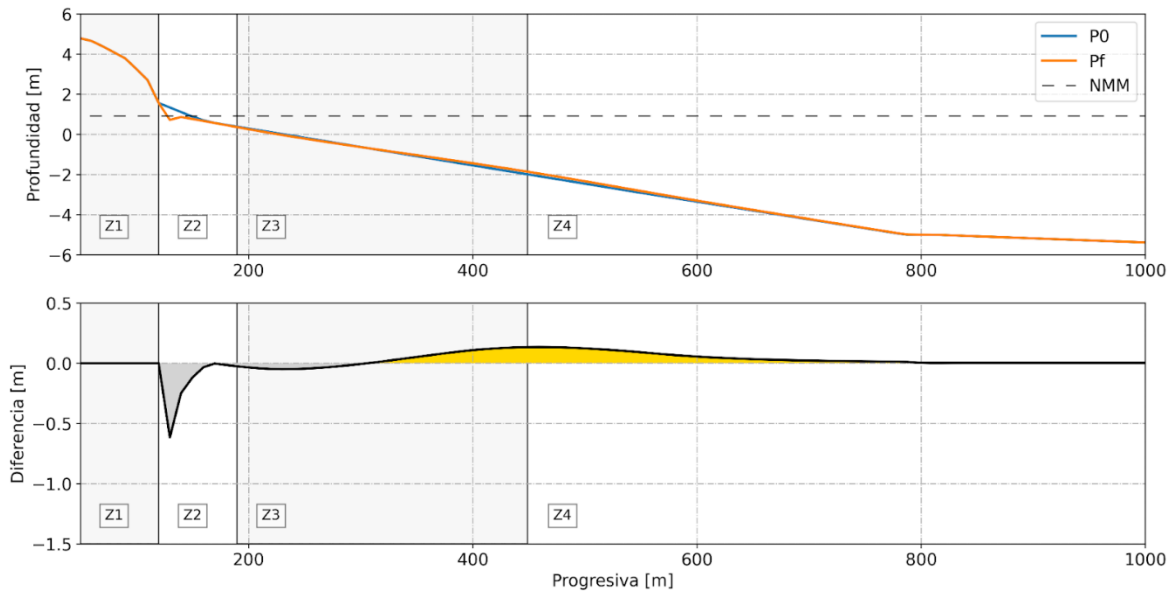


Figura 3.14. Cambios morfológicos resultantes al final de la modelación discretizado por zonas (Z1: Médano y Playa Distal; Z2: Playa Frontal; Z3: Playa Interior; Z4: Playa Exterior) - Perfil situado en la calle 14.

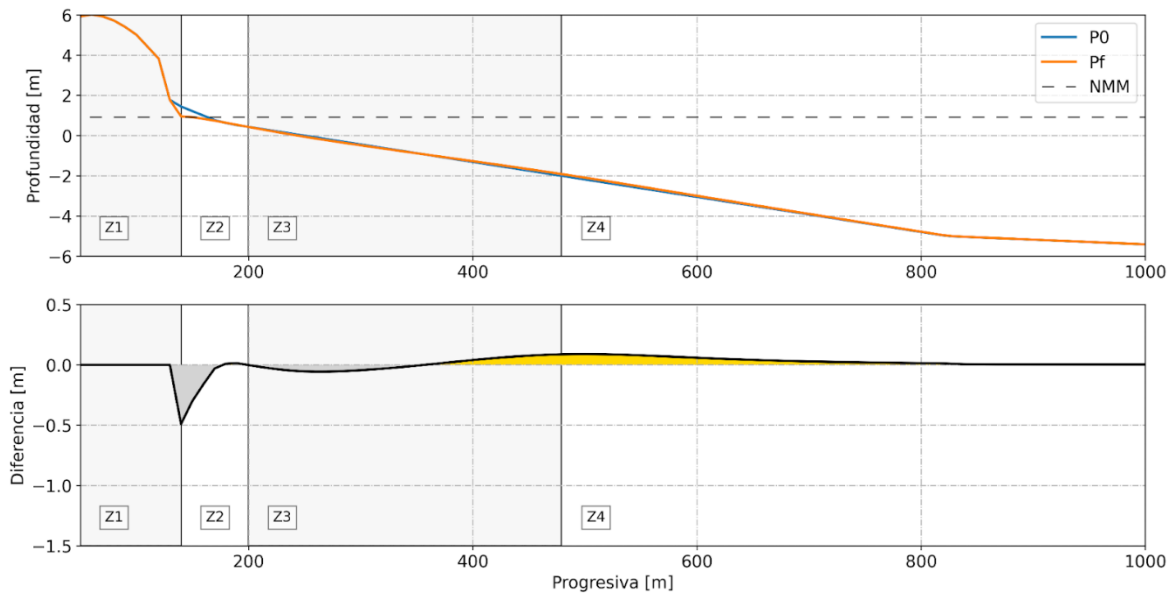


Figura 3.15. Cambios morfológicos resultantes al final de la modelación discretizado por zonas (Z1: Médano y Playa Distal; Z2: Playa Frontal; Z3: Playa Interior; Z4: Playa Exterior) - Perfil situado en la calle 24.

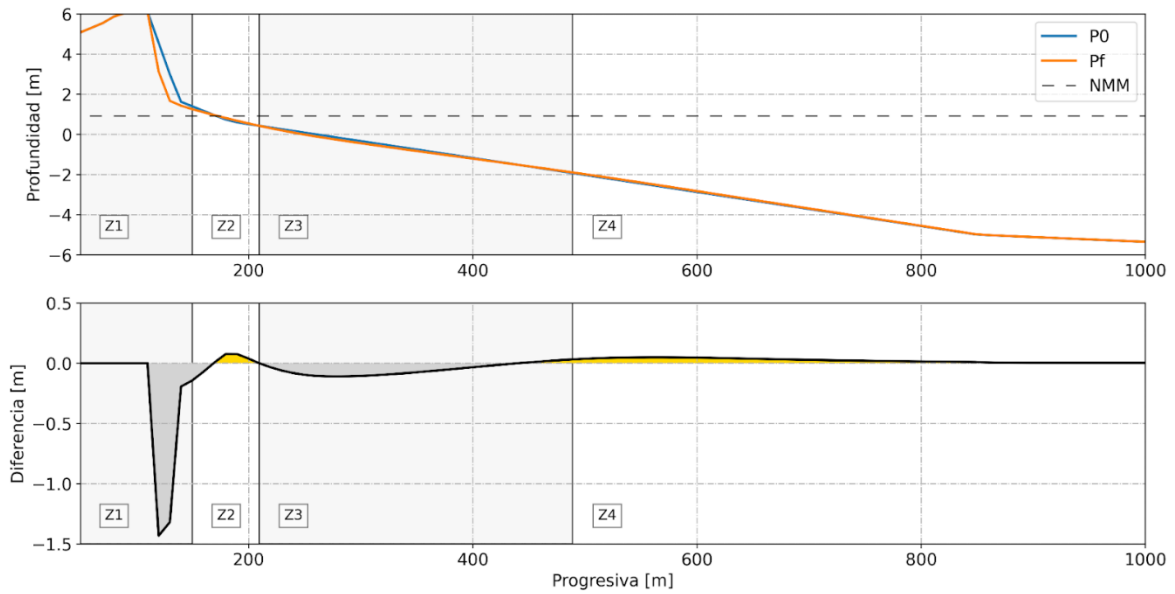


Figura 3.16. Cambios morfológicos resultantes al final de la modelación discretizado por zonas (Z1: médano y playa distal; Z2: playa frontal; Z3: playa interior; Z4: playa exterior) - Perfil en calle 30.

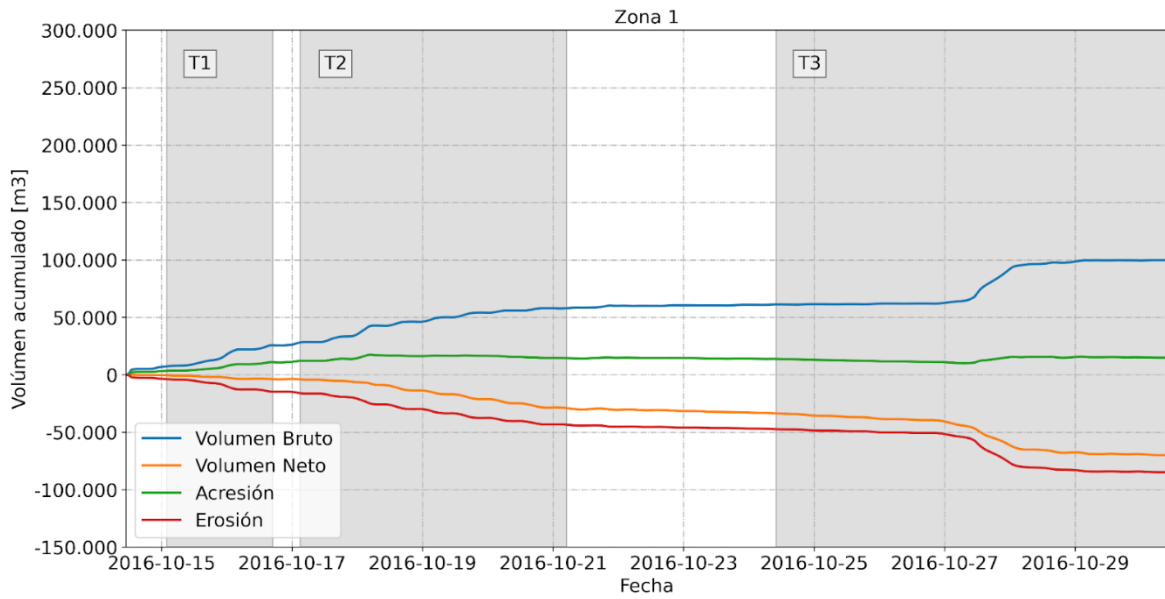
En los perfiles asociados a cada calle se obtuvo el valor máximo de erosión simulada según cada zona. Luego se promediaron los valores de todos los perfiles (asociados a calles) con el objetivo de contar con indicadores de máxima erosión vertical en playa frontal y playa distal. Estos valores y las dimensiones de las barras resultantes se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Dimensiones principales promedio de los cambios morfológicos obtenidos.

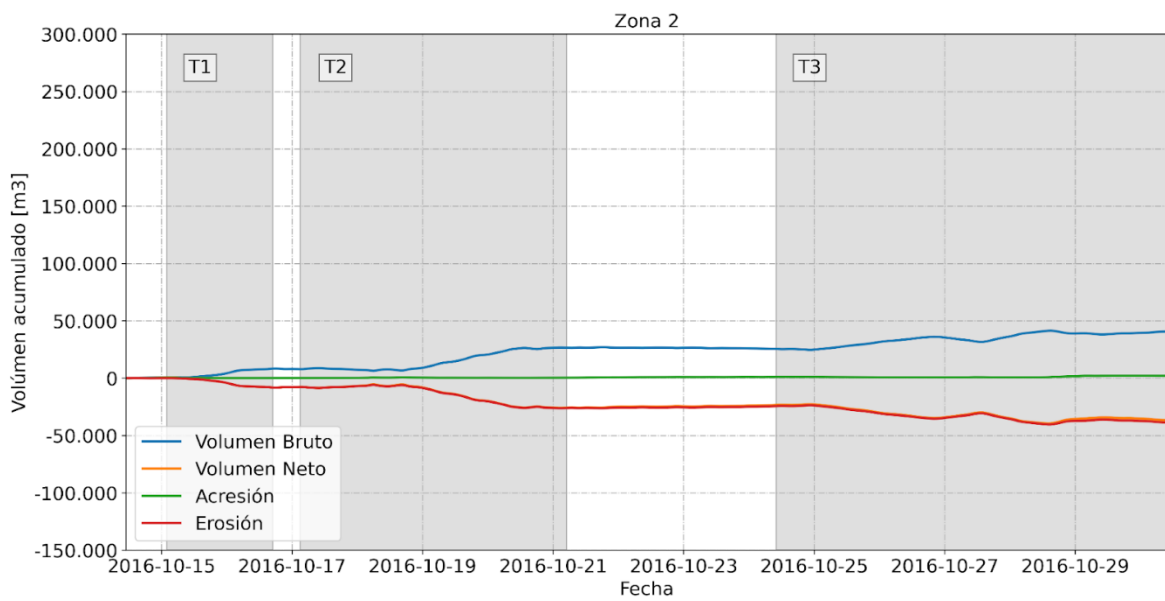
Máxima erosión vertical en playa frontal [m]	Máxima erosión vertical en playa distal [m]	Distancia barra 1 [m]	Ancho barra 1 [m]	Altura barra 1 [m]	Distancia barra 2 [m]	Ancho barra 2 [m]	Altura barra 2 [m]
-0.80	-0.20	510	130	0.10	170	19	0.10

La erosión vertical simulada es de 80 cm en promedio para la playa distal (dentro del rango de 20-120 cm indicado por Marcomini y López, 2010) y la erosión vertical en la playa frontal es de unos 20 cm, algo menor al rango de 30-133 cm que indican estos autores para una onda de tormenta que alcanzó 2.8 m (similar a la modelada).

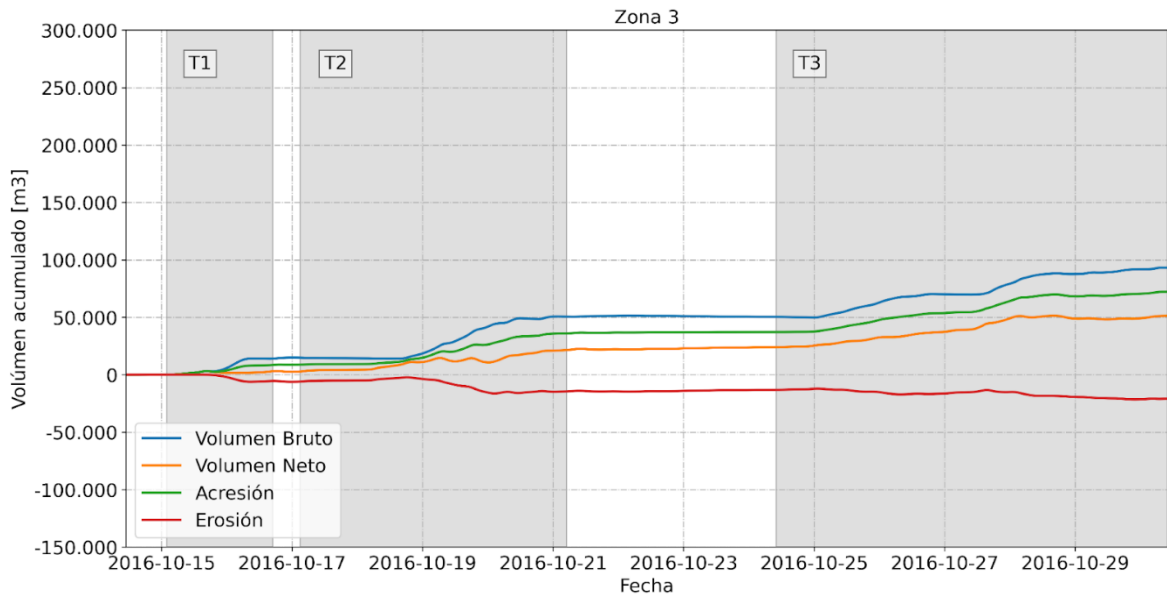
También se analizaron los volúmenes movilizados durante la simulación según cada zona (Figura 3.17) y en todo el dominio (Figura 3.18). En la Figura 3.17, se observan volúmenes netos negativos (erosión) en las zonas 1 y 2 (médano, playa distal y playa frontal), y valores positivos (acreción) en las zonas 3 y 4 (playas interior y exterior).



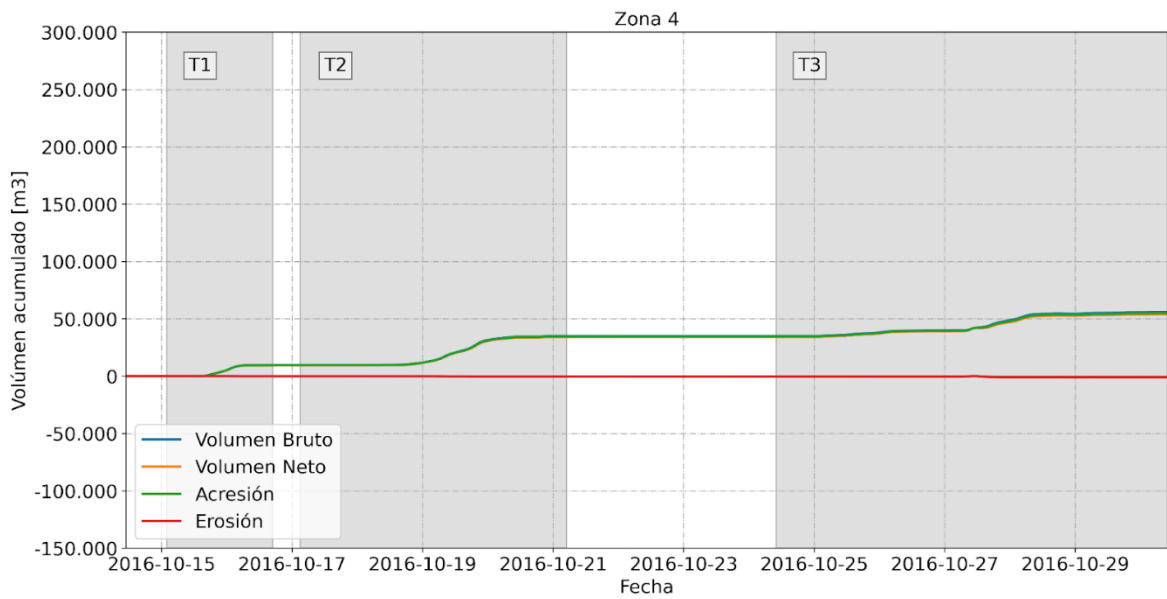
a) Costa y playa distal



b) Playa frontal



c) Playa sumergida interior



d) Playa sumergida exterior

Figura 3.17. Volúmenes de sedimento desplazado a lo largo de la simulación identificado según zona.

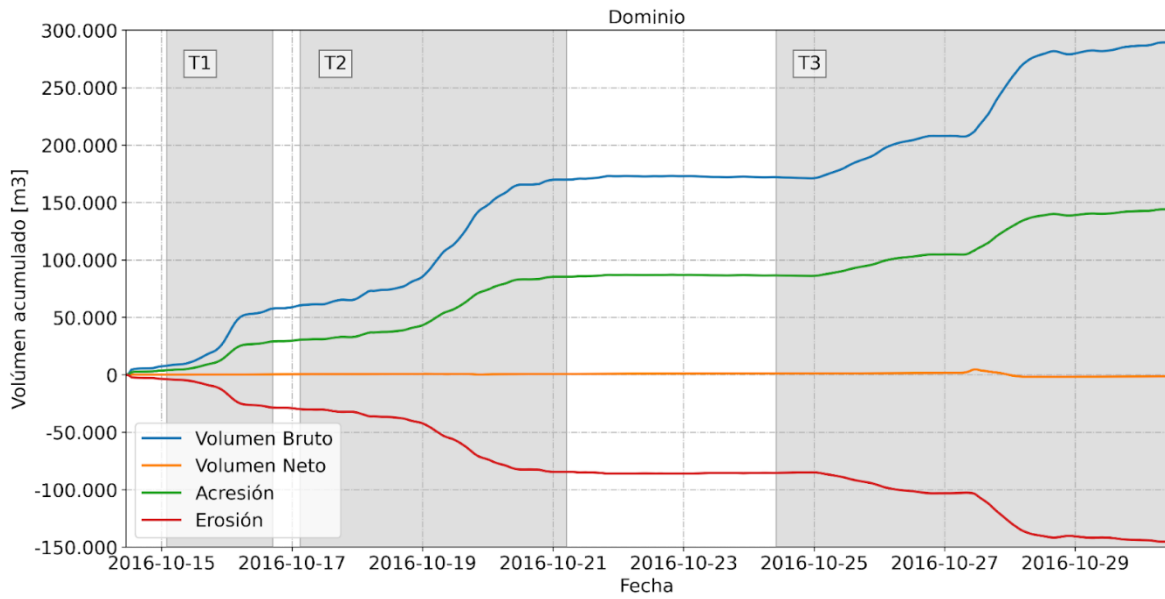


Figura 3.18. Volúmenes de sedimento desplazado a lo largo de la simulación para todo el dominio modelado.

### 3.4.2 Análisis de sensibilidad

De acuerdo a la incertidumbre que se maneja con la definición del tamaño de sedimentos en las playas de Las Toninas (determinación de los D50 y D90), se efectuó un análisis de sensibilidad a cambios en estas variables. Según Marcomini y López (2010) las playas de esta zona están constituidas por arena fina a mediana. Para la zona del Partido de la Costa, en Tomazin et al. (2020) se definió como indicador del tamaño de la arena un D50 de 0.25 mm y en Alonso et al. (2018) un D50 de 0.19 mm. Por esta razón, se implementaron modelos con pares de valores de D50 y D90 de 0.10 y 0.20 mm, 0.20 y 0.30 mm, 0.30 y 0.40 mm para los valores de morfoc y C definidos durante la calibración.

Considerando que los valores seleccionados para la definición del tamaño de la arena resultaron D50 = 0.20 y D90 = 0.30, y observándose en la Tabla 3.4 que los mejores resultados respecto de la observación satelital se dieron con la definición D50 = 0.10 y D90 = 0.20, se sugiere que estos parámetros requieren un mayor nivel de detalle en su caracterización.

Tabla 3.4. Indicadores obtenidos durante la calibración de los parámetros D50 y D90 (diámetros característicos del sedimento).

Indicador	D50 = 0.10 / D90 = 0.20	D50 = 0.20 / D90 = 0.30	D50 = 0.30 / D90 = 0.40
RMSE [m]	7.60	8.45	9.16
R	0.63	0.51	0.45

## 4 Diques exentos en Las Toninas

### 4.1 Tipos de obras y características de los diques exentos

Los diques exentos o rompeolas paralelos (detached breakwaters por su denominación en inglés), consisten en una forma muy generalizada de protección costera desligada de la costa. Los diques exentos protegen la línea de costa básicamente modificando la acción del oleaje y la dinámica sedimentológica en su entorno. El concepto de protección de los diques exentos combina la disipación de energía de las olas de una barra paralela a la costa (o un arrecife natural) con los efectos de difracción que genera una isla cercana a la línea de costa. La reducción de la energía del oleaje y los cambios en su dirección, que provocan estas obras, generan una zona de sombra donde se produce mayor retención de sedimentos (tanto del que se transporta como deriva litoral como el que provenga de un relleno artificial). Esta condición podría modificar la línea de costa generando una saliente. Si esta característica deposicional se conecta con la estructura, la formación se denomina tómbolo (Figura 4.1).

Los diques exentos pueden construirse como una única estructura, para proteger algún sector muy localizado de la costa, o como un conjunto de obras que permitan extender la zona de protección. En comparación con otros tipos de obras de protección costera, la construcción de diques exentos presenta dos ventajas destacables: i) pueden ejecutarse sin convertirse en una barrera al transporte litoral ni promover pérdidas mar adentro, y ii) su impacto podría ser mínimo si se los complementa con un relleno costero artificial. Entre las desventajas se contarían las dificultades constructivas, la escasa documentación asociada al diseño de los mismos, y el estado de avance del conocimiento sobre los procesos que controlan la compleja interacción entre los sedimentos y estas estructuras (Rosati, 1990).

Los diques exentos se utilizan para proteger playas desde la década de 1960. Han sido construidos mayoritariamente en Estados Unidos, Japón y costas del Mar Mediterráneo (Chasten et al., 1993). La sistematización de la performance de distintas experiencias, principalmente en estos sitios, permitió el desarrollo de una serie de formulaciones empíricas útiles para su diseño y la predicción de la respuesta de la línea de costa. Estas herramientas consisten en una muy buena primera aproximación al predimensionamiento de este tipo de obras. En muchos casos estas formulaciones se limitan a la determinación de la formación o no de tómbolo o saliente. En este trabajo, se utilizarán estas formulaciones compendiadas por Chasten et al. (1993), para obtener dimensiones aproximadas de la obra necesaria para la protección de la costa en Las Toninas. Los emplazamientos resultantes de la aplicación de estas herramientas serán analizados con diferentes herramientas de modelación numérica.

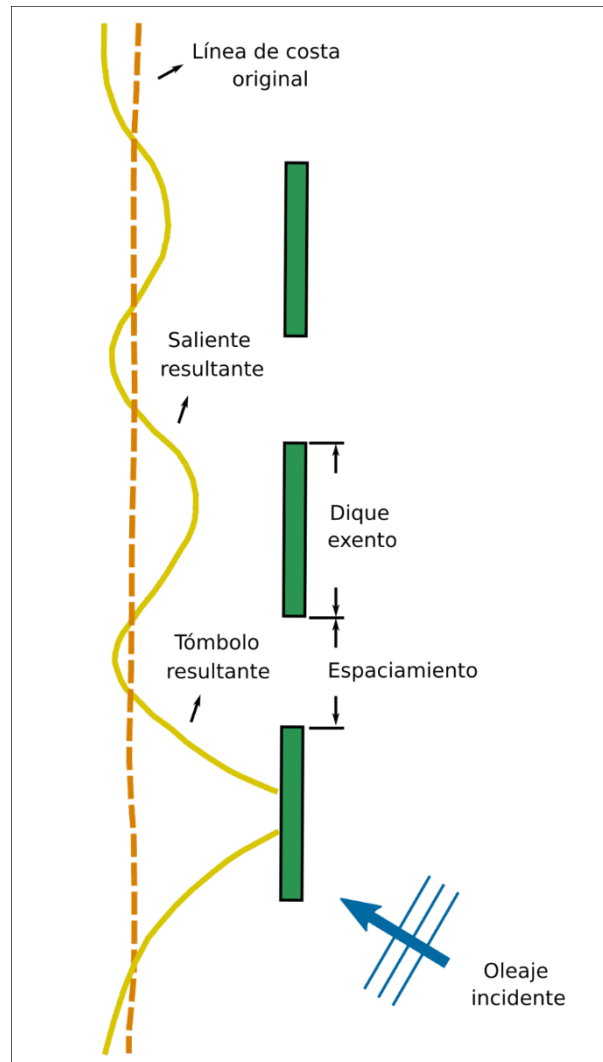


Figura 4.1. Diques exentos, saliente y tómbolo (adaptado de Dally y Pope, 1986).

## 4.2 Diseño de diques exentos

### 4.2.1 Procesos principales

Un detallado análisis de la dinámica litoral de la zona a proteger permite la predicción de forma precisa de la respuesta que la construcción de diques exentos genera sobre la línea de costa. Dally y Pope (1986) resumieron los principales procesos físicos que se dan en el entorno de una implantación de diques exentos, que se resumen a continuación:

La zona inmediatamente detrás de cada dique exento resulta protegida porque la energía del oleaje se disipa o se refleja en la estructura.

La energía de las olas se reduce a medida que las ondas se difractan en torno a los extremos de los diques exentos, resultando en la propagación lateral del oleaje y la consecuente reducción de la energía que alcanza la línea de costa.

El efecto neto consiste en la reducción de la capacidad de las olas para movilizar y transportar sedimentos en la zona de sombra del dique y la conducción de arena hacia el área de protección, provocando saliente en ese sector de la línea de costa.

La deriva litoral que ingresa a la zona de influencia del dique exento puede ser atrapada permanentemente o ser eliminada posteriormente cuando cambien las condiciones de transporte.

Si las condiciones de oleaje son relativamente constantes, se puede alcanzar un estado de equilibrio dinámico.

En la Figura 4.2 se presenta un esquema de lo previamente mencionado.

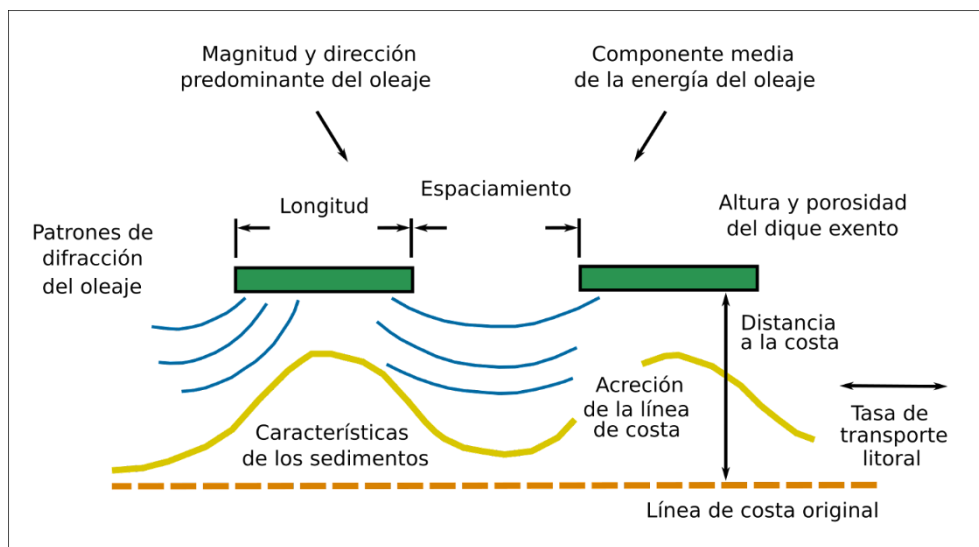


Figura 4.2. Principales variables y procesos de interés para el diseño de diques exentos (Dally y Pope, 1986).

#### 4.2.2 Predimensionamiento de la obra

El diseño de diques exentos se basa en la compatibilización de conocimiento experto, la performance resultante de obras existentes y la comprensión general de la dinámica costera. Este proceso resulta iterativo. En general, se parte de una configuración inicial cuya performance se evalúa de acuerdo a las condiciones de la playa a proteger y ajustándose las dimensiones de forma de obtener una caracterización óptima.

Según Rosati (1990), la modelación física y numérica, los métodos empíricos y la evaluación de prototipos son las herramientas disponibles para apoyar el proceso de diseño de obras de este tipo. En este trabajo, se propondrá una configuración aproximada que se obtendrá mediante la aplicación de formulaciones empíricas disponibles, cuyo comportamiento será evaluado utilizando modelos numéricos. La propuesta resultante ofrecerá una primera aproximación a las posibles dimensiones de la obra, de manera tal que sirva de insumo para el desarrollo de un proceso licitatorio que involucre la optimización del diseño y la posterior construcción de la obra.

El dimensionamiento de un dique exento depende del balance que se pretenda respecto del tamaño y la forma de la saliente a obtener y su estabilidad. Para evaluar estas características, a primera aproximación, se cuenta con una serie de formulaciones empíricas que posibilitan un pre-diseño de la estructura. Estas relaciones surgen del análisis del comportamiento de la línea de costa en diferentes obras realizadas. El objetivo de estas herramientas es lograr una predicción del comportamiento morfológico de la playa, principalmente en función de la longitud del dique exento ( $L_B$ ), su distancia a la costa original ( $X_B$ ), el espaciamiento entre diques ( $G_B$ ) y la profundidad en el dique por debajo del nivel medio del agua ( $h_B$ ). La mayoría de las formulaciones propuestas se basan en la relación  $L_B/X_B$  y se presentan a continuación en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 de acuerdo a lo compilado por Chasten et al. (1993).

**Tabla 4.1. Condición para la formación de tómbolo.**

<i>Condición</i>	<i>Impacto</i>	<i>Referencia</i>
$L_B/X_B > 2.0$	-	Shore Protection Manual (1984)
$L_B/X_B > 2.0$	Doble tómbolo	Gourlay (1981)
$L_B/X_B > 0.67$ a $1.0$	Tómbolo (aguas poco profundas)	Gourlay (1981)
$L_B/X_B > 2.5$	Tómbolo periódico	Ahrens y Cox (1990)
$L_B/X_B > 1.5$ a $2.0$	Tómbolo	Dally y Pope (1986)
$L_B/X_B > 1.5$	Tómbolo (diques múltiples)	Dally y Pope (1986)
$L_B/X_B > 1.0$	Tómbolo (dique solitario)	Suh y Dalrymple (1987)
$L_B/X_B > 2 G_B/L_B$	Tómbolo (diques múltiples)	Suh y Dalrymple (1987)

**Tabla 4.2. Condición para la formación de saliente.**

<i>Condición</i>	<i>Impacto</i>	<i>Referencia</i>
$L_B/X_B < 1.0$	No se desarrolla tómbolo	Shore Protection Manual (1984)
$L_B/X_B < 0.4$ a $0.5$	Saliente	Gourlay (1981)
$L_B/X_B = 0.5$ a $0.67$	Saliente	Dally y Pope (1986)

$L_B/X_B < 1.0$	No se desarrolla tómbolo (dique solitario)	Suh y Dalrymple (1987)
$L_B/X_B < 2 b/LB$	No se desarrolla tómbolo (diques múltiples)	Suh y Dalrymple (1987)
$L_B/X_B < 1.5$	Saliente bien desarrollada	Ahrens y Cox (1990)
$L_B/X_B < 0.8$ a $1.5$	Saliente poco desarrollada	Ahrens y Cox (1990)

Tabla 4.3. Condición de mínima respuesta de la línea de costa.

Condición	Impacto	Referencia
$L_B/X_B \leq 0.17$ a $0.33$	Sin respuesta	Inman y Frautschy (1966)
$L_B/X_B \leq 0.27$	No se desarrolla sinuosidad	Ahrens y Cox (1990)
$L_B/X_B \leq 0.5$	No ocurre depositación	Nir (1982)
$L_B/X_B \leq 0.125$	Protección uniforme	Dally y Pope (1986)
$L_B/X_B \leq 0.17$	Impacto mínimo	Noble (1978)

Además, se destacan las siguientes formulaciones en las que intervienen otras variables a las anteriormente mencionadas y que permiten establecer valores de diseño:

- Nir (1982)

Propuso una fórmula en función de la relación  $X_B/L_B$  para obtener el espesor medio del tómbolo  $dt$  en [m].

$$dt = 1.786 - 0.809 (X_B/L_B)$$

- Seiji et al. (1987)

Ofrecen condiciones de no erosión, posible erosión y erosión sobre la línea de costa opuesta a la zona de espaciamiento entre diques exentos en función de la relación  $G_B/X_B$ .

$G_B/X_B < 0.8$	no hay erosión
$0.8 \leq G_B/X_B \leq 1.3$	posible erosión
$G_B/X_B \geq 1.3$	erosión

- Otras

- Suh y Dalrymple (1987) y Hsu y Silvester (1990) plantean distintas formulaciones para estimar la longitud de la saliente.
- Ahrens y Cox (1990) clasifican la respuesta de la playa utilizando un índice basado en lo propuesto por Pope y Dean (1986).

### 4.3 Propuesta para Las Toninas

El único antecedente en la Argentina respecto de la utilización de diques exentos para la protección costera es el que se localiza en la playa de Los Acantilados, al sur de Mar del Plata. A pesar del desarrollo de estudios preliminares de una obra de mayor envergadura (Gyssels et al., 2013), se materializaron 4 diques exentos cuyas características principales se detallan a continuación (Sciarrone et al., 2012):

- diques exentos
- 110 m de longitud cada uno ( $L_B$ )
- separación de 130 m entre diques
- protección de un frente costero de unos 850 m
- distancia de 225 m a la línea de costa ( $X_B$ )
- relación  $L_B/X_B = 0.49$
- obra en isobata de 4-5 m.
- relleno artificial complementario de 250.000 m<sup>3</sup>

En la Figura 4.3 se presentan distintas imágenes de esta obra, observándose la etapa de construcción, su configuración en planta y su vinculación con el entorno de playa.





Figura 4.3. Diques exentos en playa Los Acantilados, Mar del Plata. Fotografía Pablo Funes (Diario La Capital, 5/10/2017) - Imagen satelital (Maxar Technologies, 4/1/2019; Google Earth) - Fotografía propia (23/2/2018).

Para una mejor comprensión de las particularidades del caso de Las Toninas, se realizó un relevamiento topobatimétrico de la zona de interés (Cura & Jordan, 2021) en donde se relevaron distintos perfiles de playa (Figura 4.4).

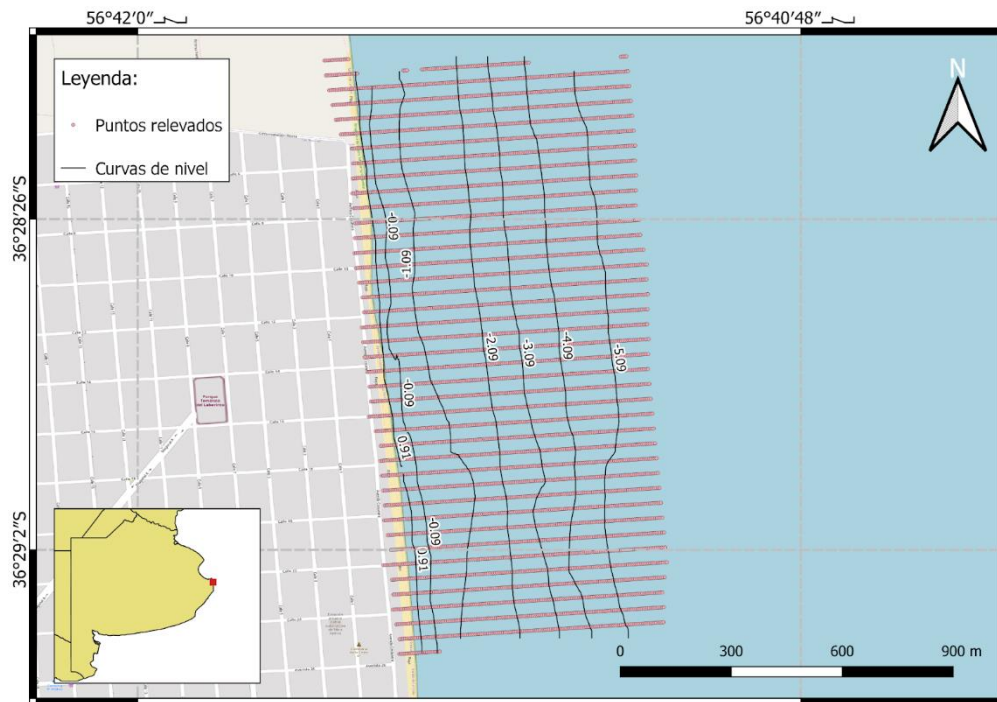


Figura 4.4. Localización de los perfiles de playa relevados (valores referidos al cero MOP; adaptado de Cura & Jordan, 2021).

De acuerdo a las mediciones realizadas, la situación actual de los perfiles de playa en Las Toninas, en el tramo que va desde calle 26 hasta unos 300 m al norte de calle 6, corresponde a una zona con pendientes de entre 6% y 23% (promedio 14%) para la zona de médano y playa distal, con pendientes de entre 13% y 22% (promedio 16%) para la playa frontal, con pendientes de entre 3% y 5% (promedio 4%) para la playa sumergida interior y con pendientes de entre 3% y 9% (promedio 4%) para la playa sumergida exterior, observándose una leve disminución de la pendiente en las cuatro zonas de Sur a Norte, que se pone en evidencia sobretodo para la zona de médano y playa distal. Se destaca también la presencia de una berma en la playa sumergida interior, entre las progresivas de 200 y 300 m respecto de la Avenida Costanera, que desaparece entre las calles 20 y 24. En la Figura 4.5 se presenta uno de los perfiles del relevamiento a modo ilustrativo.

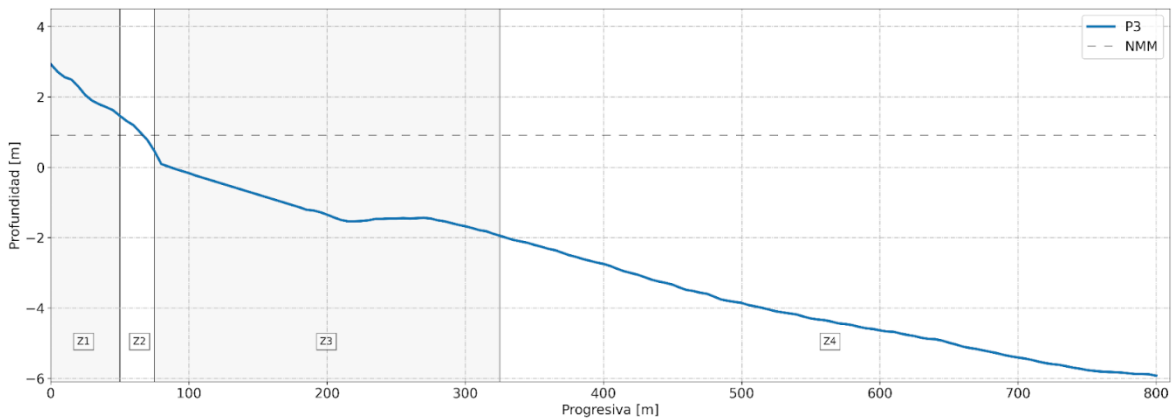


Figura 4.5. Ejemplo de perfil de playa relevado (Cura & Jordan, 2021).

Dadas las características del sector a defender, tanto por la infraestructura existente (cables de fibra óptica) como por las condiciones de un sector que se presenta en estado crítico, se considera que una obra con un sistema múltiple de diques exentos resultaría la adecuada. Esta implantación reduciría el impacto en la zona de las ondas de tormenta y oleaje extremo, reduciendo al mínimo la interferencia sobre la deriva litoral de sedimentos.

#### 4.4 Criterios de predimensionamiento

El criterio general para la determinación de la cantidad y dimensiones de los diques exentos considerará la formación de salientes pero no de tómbolos en su región de sombra. Para este caso de estudio se propone una metodología que contemple las formulaciones empíricas y recomendaciones previamente enunciadas para dar como resultado una serie de alternativas de obra a evaluar mediante las distintas herramientas de modelación numérica disponibles.

El tramo a proteger está definido por dos zonas diferentes:

- un sector de gran vulnerabilidad a la erosión costera, fuertemente impactado por la sudestada de marzo 2021, que abarca desde la calle 6 hasta la calle 16, y
- un tramo que, si bien presenta mayor nivel de protección frente al fenómeno erosivo (presencia de dunas y vegetación, entre otras características), resulta clave para la protección de la infraestructura en telecomunicaciones del país (calles 16 a 24).

Esto determina la necesidad de protección continua del frente costero desde la calle 6 hasta la 24 inclusive (unos 1600 m).

De esta manera, mediante la implementación de diques exentos como mecanismo de protección, el tramo de frente costero a proteger (FCP) se define a partir de la siguiente formulación:

$$FCP = (L_B + G_B) \cdot N$$

donde  $N$  es la cantidad de diques del sistema múltiple,  $L_B$  es la longitud de cada dique y  $G_B$  el espaciamiento o gap entre ellos.

De acuerdo a los antecedentes (Mar del Plata y otros de la bibliografía), se proponen tres tipos de diques con tamaños asociados a configuraciones, en principio, dentro del rango de cinco a diez unidades. Por lo tanto, se proponen tres longitudes tipo:  $L_{B1} = 130$  m,  $L_{B2} = 110$  m y  $L_{B3} = 90$  m.

En la definición de la distancia a la costa original ( $X_B$ ) interviene el limitante constructivo, además de la consideración de lograr una obra semisumergida. De acuerdo a las sugerencias de Rosati (1990), la opción óptima de implementación del sistema de defensa es en la isobata de 2 m.

Por lo tanto, en una primera instancia, se obtuvieron las distancias entre la isobata cero e isobatas en las que se podrían ubicar los diques exentos (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4. Distancias respecto de la isobata 0 m (cero IGN).**

<i>Calle</i>	<i>Distancia a isobata 1.5 m</i>	<i>Distancia a isobata 2 m</i>	<i>Distancia a isobata 2.5 m</i>	<i>Distancia a isobata 3 m</i>
6	59	95	222	267
8	80	115	226	268
10	71	104	218	260
12	53	98	226	271
14	80	116	217	276
16	80	140	224	271
18	91	167	224	270
20	104	169	222	260
22	86	138	220	258
24	73	119	224	261
<i>Promedio</i>	78	126	222	266

De la Tabla 4.4 resulta que se evaluarán tres opciones de isobata de emplazamiento de la obra: 2 m, 2.5 m y 3 m. Se destaca que el caso de la isobata 1.5 m fue descartada por resultar muy cercana a la línea de costa. En función de la distancia promedio de cada uno de los perfiles considerados se determinaron las variables  $X_{B1} = 126$  m,  $X_{B2} = 222$  m y  $X_{B3} = 266$  m (correspondientes a las isobatas de 2 m, 2.5 m y 3 m, respectivamente). Para cada una de esas distancias, se plantearon las relaciones  $L_B/X_B$ , insumos necesarios para la verificación de las condiciones de diseño según las formulaciones empíricas anteriormente mencionadas (Tabla 4.5).

**Tabla 4.5. Relación distancia a la costa original - longitud del dique, en función de la isobata de implantación.**

$L_B/X_B$	$X_{B1} = 126$	$X_{B2} = 222$	$X_{B3} = 266$
$L_{B1} = 130$	1.03	0.59	0.49
$L_{B2} = 110$	0.87	0.50	0.41
$L_{B3} = 90$	0.71	0.41	0.34

El paso siguiente consiste en determinar la separación entre espigones, cuyo valor está determinado por razones ambientales. Seiji et al. (1987) determinaron que para una relación de  $G_B/X_B < 0.8$  (siendo  $G_B$  la distancia entre espigones) se evita la presencia de erosión en el tramo de playa situado en frente a la separación. A modo de ejemplo podemos citar el ya mencionado antecedente de la playa Los Acantilados en Mar del Plata, en donde se adoptó una relación de  $G_B/X_B \approx 0.6$ .

En este sentido, se proponen tres relaciones de  $G_B/X_B$  distintas para las nueve relaciones de  $L_B/X_B$  planteadas previamente: 0.5, 0.6 y 0.7, lo que resulta en distintos valores de N (cantidad de espigones) y de FCP (frente costero protegido), obteniendo los valores de la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6. Tablas de variables de la propuesta de obra en función de la relación  $G_B/X_B$ .**

**a) Relación  $G_B/X_B=0.5$**

$G_B/X_B = 0.5$	$L_B$	Isobata	$X_B$	$G_B$	N	FCP
Propuesta 1-A	130	-2	126	60	9	1710
Propuesta 2-A	130	-2.5	222	110	7	1680
Propuesta 3-A	130	-3	266	130	7	1820

Propuesta 4-A	110	-2	126	60	10	1700
Propuesta 5-A	110	-2.5	222	110	8	1760
Propuesta 6-A	110	-3	266	130	7	1680
Propuesta 7-A	90	-2	126	60	11	1650
Propuesta 8-A	90	-2.5	222	110	8	1600
Propuesta 9-A	90	-3	266	130	8	1760

**b) Relación  $G_B/X_B=0.6$**

$G_B/X_B = 0.6$	$L_B$	Isobata	$X_B$	$G_B$	$N$	FCP
Propuesta 1-B	130	-2	126	80	8	1680
Propuesta 2-B	130	-2.5	222	130	7	1820
Propuesta 3-B	130	-3	266	160	6	1740
Propuesta 4-B	110	-2	126	80	9	1710
Propuesta 5-B	110	-2.5	222	130	7	1680
Propuesta 6-B	110	-3	266	160	6	1620
Propuesta 7-B	90	-2	126	80	10	1700
Propuesta 8-B	90	-2.5	222	130	8	1760
Propuesta 9-B	90	-3	266	160	7	1750

**c) Relación  $G_B/X_B=0.7$**

$G_B/X_B = 0.7$	$L_B$	Isobata	$X_B$	$G_B$	$N$	FCP
Propuesta 1-C	130	-2	126	90	8	1760
Propuesta 2-C	130	-2.5	222	160	6	1740

<i>Propuesta 3-C</i>	130	-3	266	190	5	1600
<i>Propuesta 4-C</i>	110	-2	126	90	8	1600
<i>Propuesta 5-C</i>	110	-2.5	222	160	6	1620
<i>Propuesta 6-C</i>	110	-3	266	190	6	1800
<i>Propuesta 7-C</i>	90	-2	126	90	9	1620
<i>Propuesta 8-C</i>	90	-2.5	222	160	7	1750
<i>Propuesta 9-C</i>	90	-3	266	190	6	1680

Luego, para reducir la cantidad de opciones se aplica el siguiente criterio de selección: para las tres variantes dentro de cada propuesta, se selecciona la relación  $G_B/X_B$  que resulte en la menor cantidad de espigones (criterio económico) y a igual número de espigones, se selecciona el caso de menor relación  $G_B/X_B$  evitando así la erosión lo más posible (criterio ambiental). De esta forma, las 9 propuestas preseleccionadas son las que se presentan en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7. Alternativas preseleccionadas.**

<i>Preselección</i>	$L_B$	<i>Isobata</i>	$X_B$	$G_B$	$N$	$FCP$
<i>Propuesta 1-B</i>	130	-2	126	80	8	1680
<i>Propuesta 2-C</i>	130	-2.5	222	160	6	1740
<i>Propuesta 3-C</i>	130	-3	266	190	5	1600
<i>Propuesta 4-C</i>	110	-2	126	90	8	1600
<i>Propuesta 5-C</i>	110	-2.5	222	160	6	1620
<i>Propuesta 6-B</i>	110	-3	266	160	6	1620
<i>Propuesta 7-C</i>	90	-2	126	90	9	1620
<i>Propuesta 8-C</i>	90	-2.5	222	160	7	1750
<i>Propuesta 9-C</i>	90	-3	266	190	6	1680

A continuación, las relaciones  $L_B/X_B$  se contrastan con las distintas formulaciones empíricas ya mencionadas, verificando que no haya formación de tómbolo (Tabla 4.8), pero sí de saliente (Tabla 4.9) y garantizando que al menos haya una mínima respuesta de la playa frente a la obra propuesta (Tabla 4.10).

En cada una de estas tablas, el resultado “C” (“CUMPLE”) hace referencia a la obtención del resultado deseado para esta aplicación particular (que haya una respuesta de la playa, con formación de saliente, pero no de tómbolo) con un margen de al menos 10% respecto del límite establecido por la condición de una determinada formulación empírica. Por otro lado, el resultado “NC” (“NO CUMPLE”) implica que la condición no se verifica por un margen superior al 10% respecto del límite establecido. Las respuestas de “C (lim)” (“CUMPLE - próximo al límite”) y “NC (lim)” (“NO CUMPLE - próximo al límite”) consisten en situaciones que se encuentren dentro del 10% establecido, a un lado y al otro del valor límite definido en cada formulación.

Tabla 4.8. Condición para la formación de tómbolo.

Referencia	Impacto	1-B	2-C	3-C	4-C	5-C	6-B	7-C	8-C	9-C
Shore Protection Manual (1984)	-	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Gourlay (1981)	Doble tómbolo	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Gourlay (1981)	Tómbolo (aguas poco profundas)	NC	C	C	NC	C	C	NC (lím)	C	C
Ahrens y Cox (1990)	Tómbolo periódico	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Dally y Pope (1986)	Tómbolo	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Dally y Pope (1986)	Tómbolo (diques múltiples)	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Suh y Dalrymple (1987)	Tómbolo (dique solitario)	NC (lím)	C	C	C	C	C	C	C	C

Tabla 4.9. Condición para la formación de saliente.

Referencia	Impacto	1-B	2-C	3-C	4-C	5-C	6-B	7-C	8-C	9-C
Shore Protection Manual (1984)	No se desarrolla tómbolo	NC (lím)	C	C	C	C	C	C	C	C
Gourlay (1981)	Saliente	NC	NC	NC	NC	NC	NC (lím)	NC	NC (lím)	C
Dally y Pope (1986)	Saliente	NC	C	NC (lím)	NC	NC (lím)	NC	NC (lím)	NC	NC
Suh y Dalrymple (1987)	No se desarrolla tómbolo (dique solitario)	NC (lím)	C	C	C	C	C	C	C	C
Ahrens y Cox (1990)	Saliente bien desarrollada	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Ahrens y Cox (1990)	Saliente poco desarrollada	NC	C	C	NC (lím)	C	C	C	C	C

Tabla 4.10. Condición de mínima respuesta de la línea de costa.

Referencia	Impacto	1-B	2-C	3-C	4-C	5-C	6-B	7-C	8-C	9-C
Inman y Frautschy (1966)	Sin respuesta	C	C	C	C	C	C	C	C	C (lím)
Ahrens y Cox (1990)	No se desarrolla sinuosidad	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Nir (1982)	No ocurre depositación	C	C	NC (lím)	C	NC (lím)	NC	C	NC	NC
Dally y Pope (1986)	Protección uniforme	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Noble (1978)	Impacto mínimo	C	C	C	C	C	C	C	C	C

En función de las propuestas presentadas, para la selección de las alternativas que serán evaluadas mediante las distintas herramientas de modelación numérica se establecieron los siguientes criterios:

Si una propuesta NO CUMPLE con más de un criterio en las Tablas 4.8, 4.9 y 4.10 (no formación de tómbolo, formación de saliente y mínima respuesta en línea de costa), se descarta por existir la posibilidad de obtener un resultado no deseado.

Si una propuesta NO CUMPLE uno de los criterios de la Tabla 4.10 (mínima respuesta en línea de costa) y además se encuentra próximo al límite para al menos un criterio adicional (CUMPLE - próximo al límite ó NO CUMPLE - próximo al límite), se descarta para garantizar mínima respuesta de la línea de costa ante la implantación de la obra.

De lo anterior se desprende que las propuestas preseleccionadas 1-B y 4-C deben ser descartadas debido al criterio 1, mientras que la propuesta 9-C no debe ser tenida en cuenta debido al criterio 2. Por lo tanto, las seis alternativas seleccionadas para una evaluación de mayor detalle son las que se presentan en la Tabla 4.11.

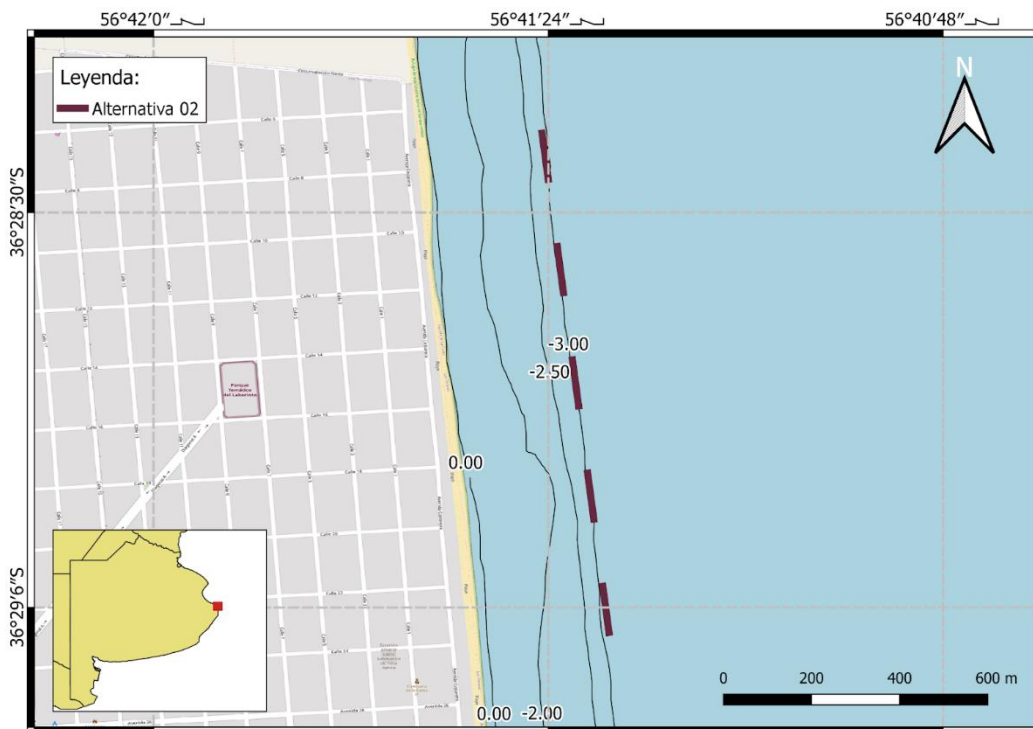
**Tabla 4.11. Alternativas seleccionadas.**

<i>Alternativas seleccionadas</i>	$L_B$	<i>Isobata</i>	$X_B$	$G_B$	$N$	$FCP$
<i>Alternativa 1 / Propuesta 2-C</i>	130	-2.5	222	160	6	1740
<i>Alternativa 2 / Propuesta 3-C</i>	130	-3	266	190	5	1600
<i>Alternativa 3 / Propuesta 5-C</i>	110	-2.5	222	160	6	1620
<i>Alternativa 4 / Propuesta 6-B</i>	110	-3	266	160	6	1620
<i>Alternativa 5 / Propuesta 7-C</i>	90	-2	126	90	9	1620
<i>Alternativa 6 / Propuesta 8-C</i>	90	-2.5	222	160	7	1750

En la Figura 4.6 se presenta la implantación propuesta para cada una de estas alternativas de obra.



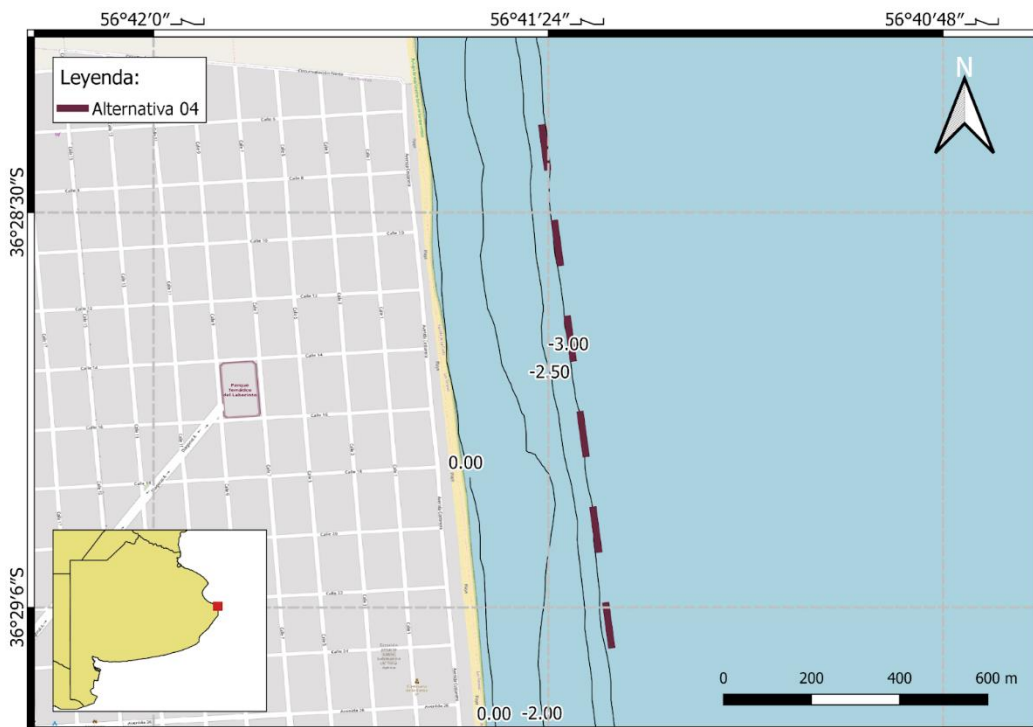
a) Alternativa 1 / Propuesta 2-C



b) Alternativa 2 / Propuesta 3-C



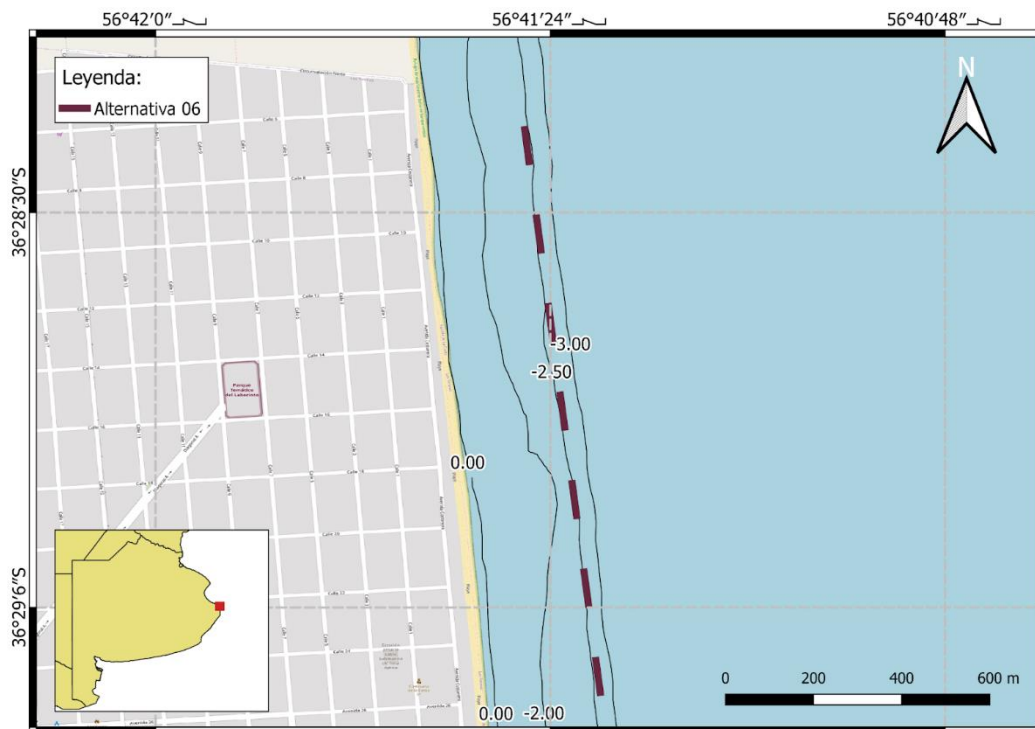
c) Alternativa 3 / Propuesta 5-C



d) Alternativa 4 / Propuesta 6-B



e) Alternativa 5 / Propuesta 7-C



f) Alternativa 6 / Propuesta 8-C

Figura 4.6. Alternativas a evaluar mediante modelación numérica.

## 5 Conclusiones

A continuación, se destacan las principales conclusiones de este informe:

- El frente costero a proteger en Las Toninas se desarrolla entre las calles 6 y 24 con una longitud aproximada de 1600 m. La implantación de un sistema de múltiples diques exentos abarca la totalidad del sector de costa crítico de Las Toninas respecto de su vulnerabilidad a la erosión costera, y el tramo de playa por donde ingresan al país los cables submarinos de fibra óptica.
- En este trabajo se utilizó como información de base la generada para la línea de Boyas Virtuales de la totalidad de la costa bonaerense (Tomazin et *al.*, 2020). Se demostró que realizando una modelación adicional propagando las condiciones de oleaje de las Boyas Virtuales hacia la proximidad de la línea de costa, esa información puede ser utilizada para la evaluación de la performance de una obra de infraestructura. Además, el oleaje resultante en el entorno de la zona de implantación presenta características diferentes al del reanálisis de la Boya Virtual, específicamente se observa que frente a Las Toninas sobre la línea de Boyas Virtuales predomina el oleaje proveniente del sector ESE, mientras que en la zona de implantación de la obra llegan olas predominantemente desde el E.
- Se presentó una estrategia de modelación numérica de ondas de tormenta con el software XBeach que se utilizará para la evaluación de performance de la obra. En principio se reprodujo un caso de la literatura que contempla la evaluación del impacto de un dique exento sobre la línea de costa. Además, se simuló una onda de tormenta de octubre de 2016 con el objetivo de poner a punto el sistema de modelación, ajustando parámetros y advirtiendo sensibilidad de algunas de las variables.
- Se desarrolló un criterio de selección de alternativas de obra basado en el cumplimiento de las condiciones de no formación de tómbolo, formación de saliente y de mínima respuesta de la línea de costa. Se determinaron seis alternativas posibles de obra de acuerdo a criterios empíricos. La performance de cada una de estas implantaciones será evaluada en distintos procesos de modelación numérica.

## Referencias

- Ahrens, J.P., Cox, J., 1990. Design and performance of reef breakwaters. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 7, pp. 61-75.
- Alonso, G., Dragani, W., Pérez, I., 2018. The role of meteorological tsunamis on beach erosion in the buenos aires coast: Some numerical experiments. *Coastal Engineering Journal*. 60(3):299-307.
- Bértola, G.R., 2006. Morfodinámica de playas del sudeste de la provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, vol. 13, núm. 1, pp. 31-57.
- Chasten, M.A., Rosati, J.D., McCormick, J.W., 1993. Engineering design guidance for detached breakwaters as shoreline stabilization structures. Coastal Engineering Research Center, Technical Report CERC-93-19.
- Cura & Jordan, 2021. Informe relevamiento topo-batimétrico. Las Toninas, Municipio de la Costa, Provincia de Buenos Aires. Cura & Jordán Servicios Topográficos. Junio.
- Dally, W.R., Pope, J., 1986. Detached breakwaters for shore protection. Coastal Engineering Research Center, Technical Report CERC-86-1.
- Gourlay, M.R., 1981. Beach processes in the vicinity of offshore breakwaters. *Proceedings, Fifth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering*, Perth, Australia, 129-34.
- Gyssels, P., Ragessi, M., Rodríguez, A., Cardini, J., Campos, M., 2013. Diseño de infraestructura para la protección de la erosión costera en el litoral argentino: caso de Mar del Plata. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 13 (2), 221.
- Hsu, J.R. y Silvester R. 1990. Accretion behind single offshore breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, (16):3 362-380.
- Hsu, T.W., Jan, C.D. y Wen, C.C., 2003. Modified McCormicks model for equilibrium shorelines behind a detached breakwater, *Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 1887-1897.
- Inman, L.D. y Frautschy, J.D., 1966. Littoral processes and the development of shorelines. *Proceedings, Coastal Engineering*. Santa Barbara, CA, 511-36.
- Marcomini, S.C., López, R.A., 2010. Erosión y manejo costero en Las Toninas, partido de La Costa, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 490-498.
- Matsushita, B.; Yang, W.; Muhamad Jaelani, L.; Setiawan, F.; y Fukushima, T. (2016). Monitoring Water Quality with Remote Sensing Image Data. En: Weng, Q. (Editor) *Remote Sensing for Sustainability*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor and Francis, Capítulo 9, pp. 163-184.
- McCormick, M.E., 1993. Equilibrium shoreline response to breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 119, No. 6, pp. 657-670.
- Montecinos Díaz, G.D., 2021. Implementación del modelo XBeach para el pronóstico de oleaje en la Bahía de Cartagena, V Región, Chile. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

- Nir, Y., 1982. Offshore artificial structures and their influence on the Israel and Sinai mediterranean beaches. Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 1837-1856.
- Noble, R.M., 1978. Coastal structures: effects on shorelines. Proceedings of the 17th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Sydney, Australia, pp. 2069-2085.
- Pope, J., Dean, J.L., 1986. Development of Design Criteria for Segmented Breakwaters. Coastal Engineering, Chapter 158, 2144-2158.
- Razak, M.S.A., Nor, N.A.Z, 2018. XBeach Process-Based Modelling of Coastal Morphological Features Near Breakwater. MATEC Web of Conferences 203, 01007.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling Storm Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands. Coastal Engineering 56 (11–12): 1133–1152.
- Rosati, J.D., 1990. Functional design of breakwaters for shore protection: empirical methods. Coastal Engineering Research Center, Technical Report CERC-90-15.
- Sciarrone, R., Melendez, R., Loschacoff, S., 2012. Rompeolas aislados como estructuras de protección costera y recuperación de playas. VII Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria. AADIP.
- Seiji, M., Uda, T., y Tanaka, S., 1987. Statistical study on the effect and stability of detached breakwaters, Coastal Engineering in Japan 30(1), 131-41.
- Suh, K., Dalrymple, R.A., 1987. Offshore breakwaters in laboratory and field. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 2, pp. 105-121.
- Tomazin, N., Re, M., García, P.E., Bindelli, L., 2020. Caracterización de la dinámica litoral en la costa marítima bonaerense: aportes hacia una gestión integrada. Informe SLH-INA, 11-376-20, Ezeiza, Argentina.
- Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. Int. J. Remote Sens. (27): 3025-3033.