



Output 4 | Actividad 4.3

## **Análisis de alta resolución de impactos y riesgo en zonas piloto de la costa marítima de la provincia de Buenos Aires**

Español

[INFORME 4.3 – 15 Enero 2020 - UNIDO/CTCN Rfx 7000002437](#)

Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina) | Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República (IMFIA-UdelaR, Uruguay)

[Technologies for the design of a regional strategic plan for the coastal management and adaptation to Climate Change in the Province of Buenos Aires](#)

*Proyecto INA 376  
Informe LHA 08-376-19  
Ezeiza, enero de 2020*

## **Equipo de trabajo**

*Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua (LH-INA, Argentina)*

Msc. Ing. Mariano Re | Ing. Pablo E. García | Lucas Bindelli | Ing. Martín Sabarots Gerbec | Msc. Ing. Nicolás J. Tomazin | Lic. Carlos Haspert | Arq. Leonardo S. Peralta | Lic. Federico Haspert

*Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental – Facultad de*

Dr. Ing. Mónica Fossati | Dr. Ing. Sebastián Solari | Dr. Ing. Pablo Santoro | Msc. Ing. Rodrigo Alonso | Ing. Michelle Jackson

## **Informe realizado por:**

Pablo García, Lucas Bindelli, Nicolás Tomazin, Federico Haspert y Mariano Re.

## Resumen

La Actividad 4.3 está asociada a evaluar el riesgo asociado a inundaciones y erosión en algunas zonas piloto de la costa bonaerense (seleccionadas en función de los estudios antecedentes analizados y de las reuniones y talleres llevados a cabo en el transcurso del proyecto con representantes de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) y del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC). La metodología utilizada para la evaluación del riesgo es la denominada SimpleCoast.

En esta Actividad también se incluye la implementación de modelos numéricos para poder estudiar detalladamente el impacto morfológico de diferentes intervenciones en las zonas costeras piloto. Para eso se desarrollaron modelos de diferentes escalas (regionales y locales) y que resuelven diferentes problemas físicos (modelos hidrodinámicos, modelos de oleaje, modelos sedimentológicos y morfológicos), utilizando el sistema de modelación MIKE 21, cuya licencia pertenece a la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) y fue puesta en valor durante esta Asistencia Técnica.

## Índice

1	Introducción .....	6
1.1	Problema .....	6
1.2	Asistencia técnica .....	7
1.3	Actividad 4.3.....	7
2	Vulnerabilidad a la Erosión en Localidades Costeras de la Provincia de Buenos Aires.....	9
2.1	Introducción .....	9
2.2	Antecedentes .....	9
3	Análisis de Detalle de Impactos y Riesgos en Zonas Costeras Piloto. ....	20
3.1	Zonas de Análisis .....	21
3.1.1	Bahía de los Vientos .....	21
3.1.2	Puerto de Mar del Plata .....	25
3.1.3	Las Toninas .....	30
3.2	Metodología SimpleCoast .....	34
3.2.1	Cuantificación de la peligrosidad (amenazas costeras) .....	34
3.2.2	Evaluación de los Impactos .....	34
3.2.3	Evaluación de niveles de inundación de la playa .....	35
3.2.4	Evaluación de la erosión sobre el perfil de playa .....	38
3.2.5	Caracterización del riesgo costero .....	41
3.3	Análisis de zonas pilotos.....	43
3.3.1	Bahía de los Vientos .....	43
3.3.2	Mar del Plata .....	46
3.3.3	Las Toninas .....	48
4	Modelación Numérica Regional y Local de la Hidrodinámica, del Oleaje y la Morfología .	52
4.1	Introducción .....	52
4.2	Sistema MIKE 21.....	52
4.2.1	Módulo hidrodinámico MIKE 21 HD.....	53
4.2.2	Modelo espectral de olas MIKE 21 SW.....	53
4.2.3	Módulo de transporte de sedimentos MIKE 21 ST .....	53
4.2.4	Modelo morfológico acoplado .....	54
4.3	Modelación Hidrodinámica Regional .....	55
4.3.1	Dominio .....	55
4.3.2	Discretización .....	56
4.3.3	Batimetría.....	58
4.3.4	Marea Oceánica .....	61

---

4.3.5	Vientos.....	61
4.3.6	Parámetros físicos .....	61
4.3.7	Paso temporal .....	62
4.3.8	Calibración.....	63
4.3.9	Validación .....	67
4.4	Modelación de oleaje regional.....	67
4.5	Modelación en el entorno de las ciudades de Quequén y Necochea.....	69
4.5.1	Batimetría, discretización, parámetros físicos y forzantes .....	70
4.5.2	Validación del modelo de oleaje .....	74
4.6	Modelación Local en el entorno de la ciudad de Mar del Plata.....	80
4.6.1	Batimetría, discretización, parámetros físicos y forzantes .....	80
4.6.2	Calibración/Validación del modelo morfológico acoplado .....	84
4.7	Modelación Local en el entorno de la ciudad de Las Toninas.....	90
4.7.1	Batimetría, discretización, parámetros físicos y forzantes .....	90
5	Análisis de Impactos de Diferentes Intervenciones en Zonas Costeras Piloto .....	95
5.1	Introducción .....	95
5.2	Bahía de los vientos.....	95
5.3	Puerto de Mar del Plata .....	101
5.4	Las Toninas .....	104
6	Conclusiones.....	110
	Referencias.....	112

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problema

La costa oceánica de la Provincia de Buenos Aires presenta gran diversidad de playas a lo largo de sus 400 km, con diferentes regímenes de oleaje, mareas, y con composiciones granulométricas y morfológicas variables. Entre San Clemente, al NE, y Pehuén-Co, al SO, se concentran más de 30 localidades balnearias que pertenecen a 12 partidos de la provincia (Figura 1.1). Los municipios presentan importantes diferencias en cuanto a cantidad de población y actividades económicas. Principalmente se destacan actividades asociadas al turismo y actividades comerciales vinculadas al movimiento de los puertos.

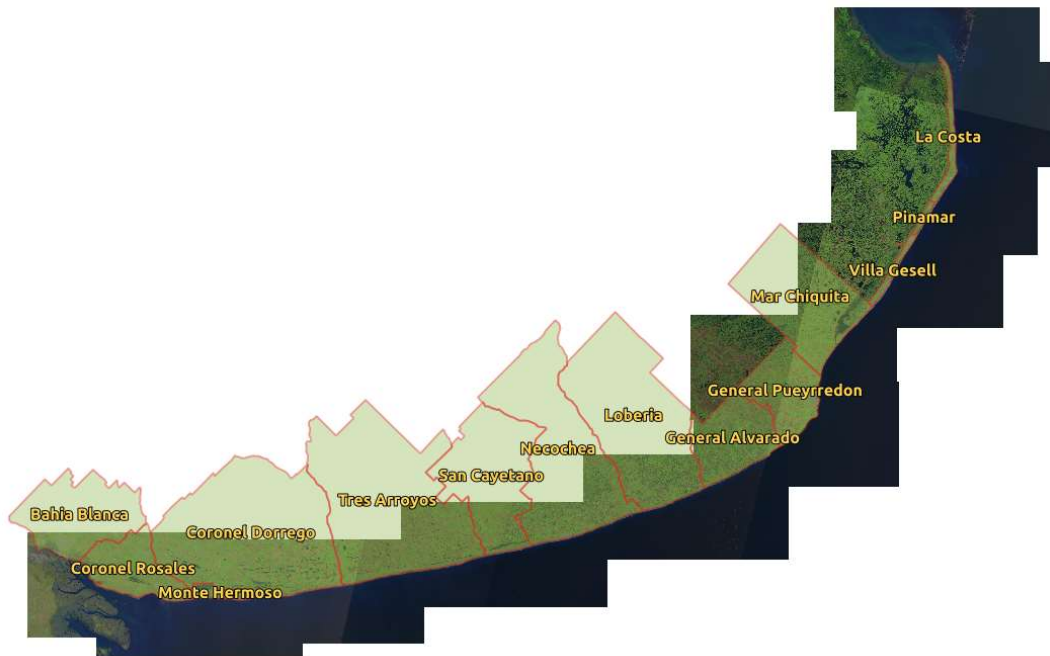


Figura 1.1. Partidos del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires.

Esta región litoral se ve afectada por numerosos problemas ambientales y climáticos, principalmente debidos a la erosión costera. Las actividades antrópicas como la construcción de defensas costeras, el crecimiento urbano sobre estructuras medanosas, la extracción de arena y la explotación de acuíferos sin un apropiado manejo han agravado los procesos erosivos y acrecentado la vulnerabilidad frente al Cambio Climático.

La constante acción del oleaje y el impacto de los eventos de tormenta severos (Sudestadas) son los responsables primarios de la dinámica erosiva de la costa bonaerense. Estudios referidos a obras puntuales como la instalación de rompeolas para prevenir erosión en la zona de acantilados en Mar del Plata, la ejecución de defensas costeras para protección de rutas o los planes de modificación de una de las escolleras del Puerto de Mar del Plata refuerzan la necesidad de contar con un manejo costero integral y planificado. Resulta en este contexto que se plantea la preocupación de la provincia de Buenos Aires respecto de la vulnerabilidad de la costa ante las distintas amenazas que afectarían su dinámica en el marco del Cambio Climático.

## **1.2 Asistencia técnica**

El análisis de los procesos costeros naturales (meteorología, climatología, hidrodinámica y morfología) en relación a los cambios en las actividades humanas y del uso/cobertura del suelo, resulta un insumo necesario para el estudio del riesgo a la erosión costera de manera integral y la generación de información necesaria para la concreción de un plan integral de manejo costero bonaerense.

En este marco, el Departamento de Costa Marítima de la Provincia de Buenos Aires solicitó la Asistencia Técnica a CTCN (Climate Technology Center & Network) que plantea dos objetivos generales: i) diagnosticar el estado actual de la dinámica en la costa oceánica de la provincia, e ii) implementar un mapa de riesgo frente al Cambio Climático y delinear recomendaciones de manejo costero, para utilizar como insumo en la ejecución de un Plan de Manejo Integral Estratégico de la costa bonaerense a desarrollarse a futuro.

Entre los objetivos específicos a alcanzar por esta Asistencia Técnica se destacan: i) determinar los cambios acontecidos en la dinámica costera durante las últimas décadas (nivel del mar, oleaje, viento, cambios morfológicos), ii) estimar a partir de proyecciones de Cambio Climático los posibles escenarios costeros futuros, y iii) desarrollar labores de transferencia tecnológica, capacitación y formación asociadas al proyecto. Entre los principales productos de esta asistencia se destacan la puesta en valor de las herramientas de modelación numérica del solicitante, la capacitación y entrenamiento en el manejo de las mismas y la elaboración de un manual de recomendaciones de manejo costero para la costa oceánica de Buenos Aires.

Esta Asistencia Técnica se lleva a cabo con los equipos profesionales del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina y el Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) de Uruguay.

## **1.3 Actividad 4.3**

La Actividad 4.3 de esta Asistencia Técnica se enmarca dentro del Entregable 4, y está asociada a evaluar el riesgo asociado a inundaciones y erosión en algunas zonas piloto de la costa bonaerense (seleccionadas en función de los estudios antecedentes analizados y de las

reuniones y talleres llevados a cabo en el transcurso del proyecto con representantes de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) y del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC), tal como se puede ver en los Capítulos 2 y 3. La metodología utilizada para la evaluación del riesgo es la denominada SimpleCoast, cuya formulación y aplicación en las zonas pilotos se encuentra en el Capítulo 3.

En esta Actividad también se incluye la implementación de modelos numéricos para poder estudiar detalladamente el impacto morfológico de diferentes intervenciones en las zonas costeras piloto. Para eso se desarrollaron modelos de diferentes escalas (regionales y locales) y que resuelven diferentes problemas físicos (modelos hidrodinámicos, modelos de oleaje, modelos sedimentológicos y morfológicos), utilizando el sistema de modelación MIKE 21, cuya licencia pertenece a la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) y fue puesta en valor durante esta Asistencia Técnica. Todo esto puede verse en los Capítulos 4 y 5.

## 2 VULNERABILIDAD A LA EROSIÓN EN LOCALIDADES COSTERAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

### 2.1 *Introducción*

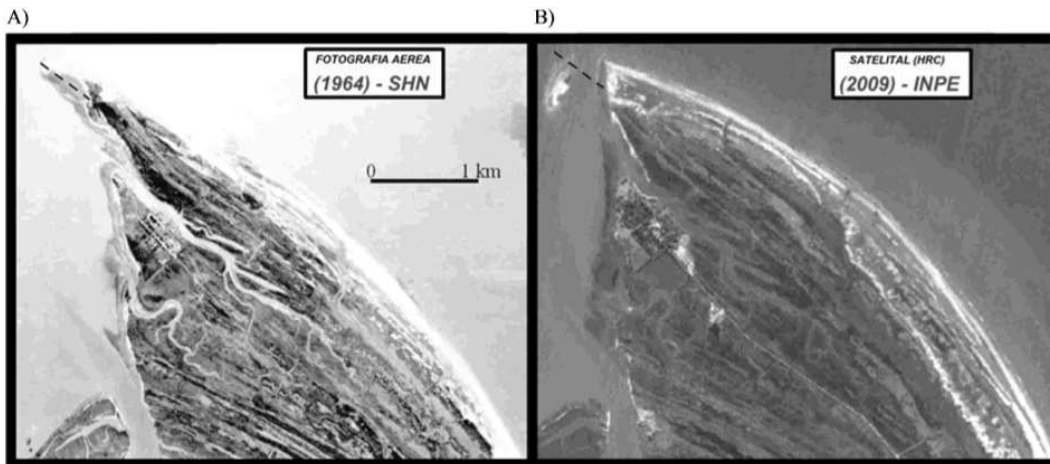
En el presente capítulo se presenta una revisión de estudios de erosión costera a lo largo del frente costero de la provincia de Buenos Aires. Si bien algunos trabajos presentan análisis de vulnerabilidad a escala regional, entre los que se destacan los de Isla et al. (2017) y Merlotto et al. (2017), la mayoría suele enfocarse puntualmente en ciertas localidades (Necochea, Quequén, Camet Norte, Mar Chiquita, Santa Clara del Mar, Villa Gesell, Mar del Plata, entre otras).

### 2.2 *Antecedentes*

La evolución costera de la localidad de Necochea fue estudiada por Merlotto et al. (2014). Para el estudio a mediano plazo, se utilizaron fotografías aéreas (1967 y 1984) e imágenes satelitales (2004), utilizando los acantilados y las dunas como indicadores de la línea de costa. Para el estudio a corto plazo (2006-2009) se hizo una reconstrucción de la morfología de las playas a partir del relevamiento de perfiles estacionales y el muestreo de sedimentos. Los resultados indican que en el mediano plazo la línea de costa de Necochea se ha mantenido estable o ha avanzado (0.42 m/año), mientras que en el corto plazo los análisis arrojan un incipiente proceso de erosión. Por otra parte, en la costa de la ciudad de Quequén, el retroceso de la línea costera (-0.46 m/año) y los balances sedimentarios negativos indican claramente un proceso de erosión acentuado en el mediano y corto plazo, respectivamente. Los diferentes grados de erosión costera están relacionados en parte a la vulnerabilidad de las playas a los temporales de oleaje, pero principalmente a las acciones antrópicas, como la fijación del campo de dunas (para urbanización y forestación) y las escolleras del Puerto de Quequén.

En Codignotto et al. (2011) se analizan una serie de mediciones sistemáticas que se realizan desde 2010 en el frente costero de la bahía Samborombón en tres puntos seleccionados dispuestos a lo largo de la costa. Los valores medidos indicaron un retroceso medio de aproximadamente 1 m/año. Utilizando información catastral, fotografías aéreas, imágenes satelitales y mediciones expeditivas, se obtuvo que la línea de costa retrocedió unos 50 metros en los últimos 49 años (Figura 2.1). Dada la muy baja o nula influencia antropogénica en la bahía Samborombón, el incremento de la erosión podría ser atribuible a la combinación de diversos factores, como ser, un posible aumento en las alturas y un cambio en las direcciones de incidencia del oleaje, un incremento en la frecuencia de las sudestadas y vientos del este y/o un

lento pero sostenido aumento del nivel medio del mar asociados directa o indirectamente al calentamiento global.

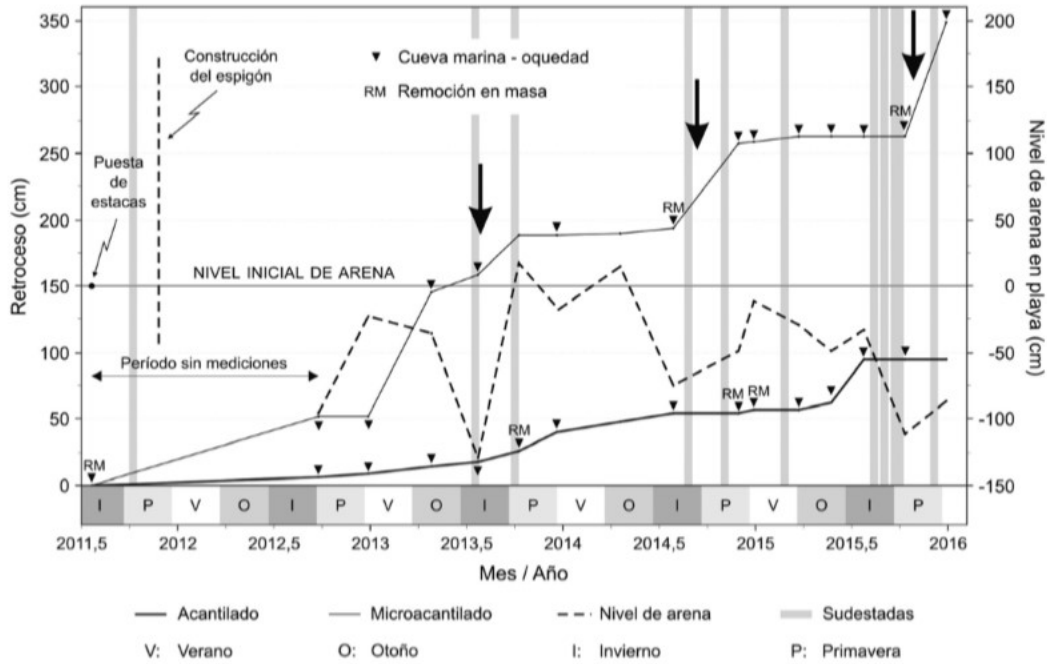


**Figura 2.1.** Punta Rasa. A) Fotografía aérea tomada por el SHN; B) e imagen satelital suministrada por el INPE-Brasil. La línea punteada representa el retroceso del “spit” de Punta Rasa (Codignotto et al., 2011).

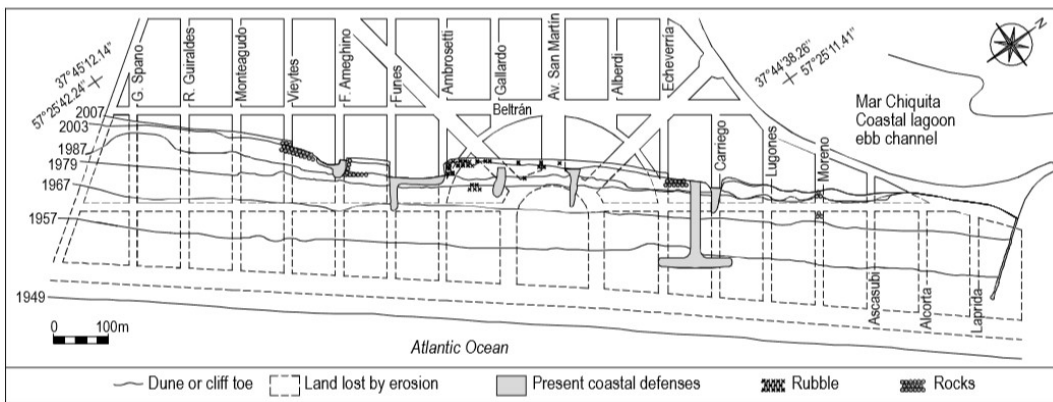
Los cambios morfodinámicos que se observaron en un sector de costa ubicado al norte de un espigón construido en la localidad de Camet Norte a fines de 2011 se presentan en Medina et al. (2016). Entre julio de 2011 y diciembre de 2016 se monitorearon cuatro puntos de control ubicados al norte de la estructura; a 200 m (estaca IV), a 1300 m (estaca III), a 1670 m (estaca II) y a 2650 m (estaca I). En cada uno de ellos se realizaron mediciones que permitieron calcular el retroceso del acantilado y micro acantilado, y el nivel de arena en playa. El nivel de arena en los puntos de control III, II y I (más alejados) rara vez fue inferior al nivel observado en julio de 2011. Lo opuesto se vio en el en el punto más próximo al espigón (IV), donde el nivel de arena casi siempre se mantuvo por debajo del nivel medido inicialmente (Figura 2.2). El menor nivel de arena asociado a una mayor energía de ola fue probablemente la causa de los máximos retrocesos del acantilado (96 cm) y sobre todo del microacantilado (350 cm) registrados a 200 metros del espigón (estaca IV).

El trabajo de Merlotto y Bértola (2009) determina la evolución de la línea de costa y tasa de retroceso del Balneario Parque Mar Chiquita entre 1949 y 2007. A partir de la utilización de mapas históricos, fotografías aéreas, una imagen satelital y mediciones de campo, se obtuvo la posición de la línea de costa para los años 1949, 1957, 1967, 1979, 1987, 2003 y 2007. En el período 1949–1957 se registró el proceso erosivo más importante en el área de estudio, siendo la tasa media de retroceso de 17.71 m/año. En los periodos 1957-1967 y 1967-1979, se observó una disminución importante del proceso erosivo con tasas de 6.77 y 4.1 m/año, respectivamente. A partir de 1979, el proceso se desacelera notablemente hasta llegar a los 1.41 m/año entre 2003 y 2007. En total, se estima que el retroceso fue de 299.01 m en los últimos 58 años. Se señalan como causas principales del deterioro costero la alteración de los médanos costeros, la extracción de arena (actualmente prohibida), y la obstrucción de la deriva litoral causada por las escolleras del Puerto de Mar del Plata y obras de defensa al sur de Mar Chiquita.

Asimismo, las tormentas Sudestadas han influido notoriamente en el retroceso de la línea de costa.



**Figura 2.2.** Relación entre los retrocesos del acantilado y microacantilado y nivel de arena en playa en la estaca IV. Con una flecha se señala la correspondencia entre el mayor retroceso del acantilado y sobre todo del microacantilado, el menor nivel de arena en playa y los eventos de tormentas marítimas (“sudestadas”) registrados en el sector (Medina et al., 2016).

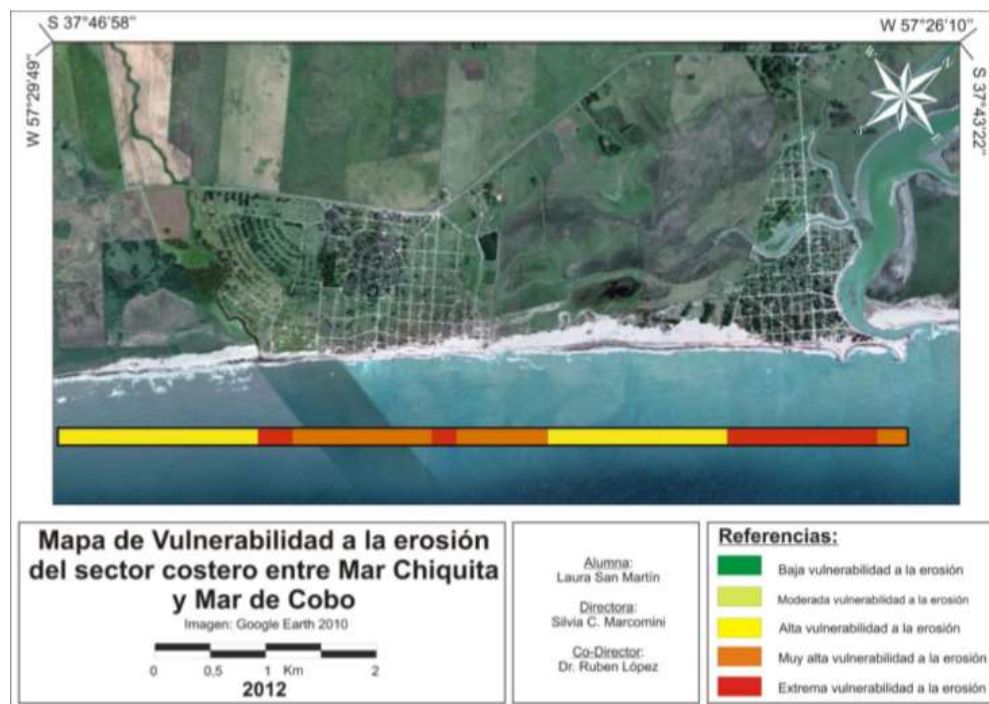


**Figura 2.3.** Mapa de evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita durante el período 1949-2007 (Merlotto y Bértola, 2009).

El riesgo de erosión en las localidades de Villa Gesell, Mar de las Pampas, Las Gaviotas y Mar Azul fue definido por Marcomini y López (2008). Para ello, en junio de 2007 realizaron relevamientos

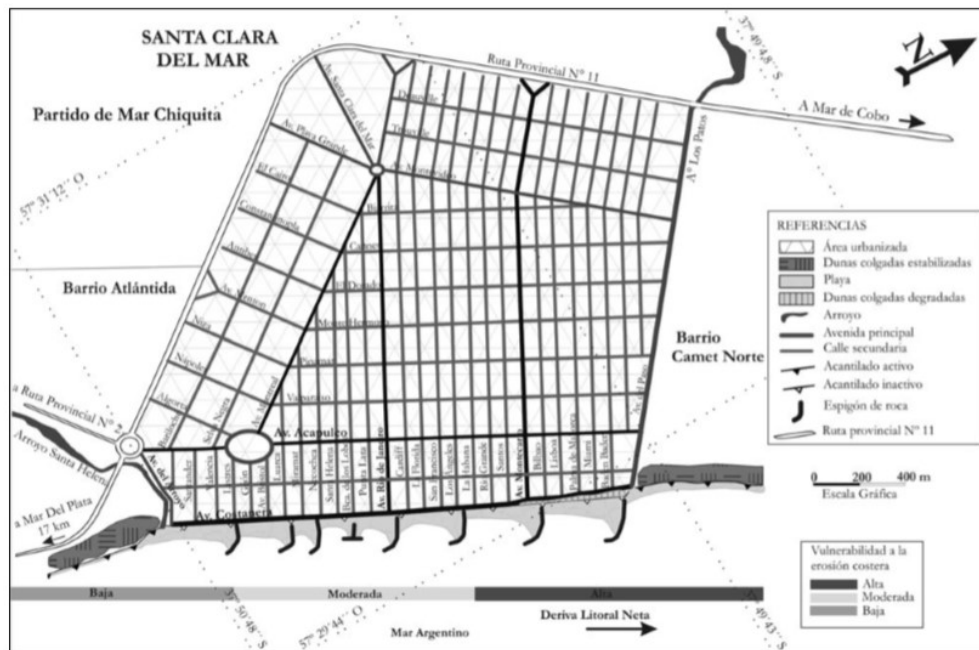
de perfiles de playa con el fin de caracterizar parámetros de playa (ancho y morfología) y duna costera (altura, cota, vegetación y estado); durante el trabajo de campo, se constató también la existencia de desagües pluviales. El análisis de estos datos permitió, junto con la estimación de la velocidad de retroceso de la línea de costa a partir de fotografías aéreas históricas, definir distintos grados de erosión (extremo, muy alto, alto, moderado y bajo). En Villa Gesell, las zonas costeras más céntricas tienen riesgo extremo, muy alto y alto de erosión, mientras que las zonas periféricas tienen riesgo moderado a bajo. En la localidad de Mar de las Pampas el riesgo es alto; en Las Gaviotas es moderado; y en Mar Azul es bajo.

La vulnerabilidad a la erosión costera entre las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita fue evaluada por San Martín et al. (2012). Para el estudio se construyó una matriz de vulnerabilidad con distintos parámetros que se obtuvieron a partir de relevamientos a campo, fotografías aéreas e imágenes satelitales y perfiles de playa perpendiculares a la línea de costa. Dicha matriz relacionó los valores máximos y mínimos de los distintos parámetros morfométricos, granulométricos y de los impactos antrópicos con atributos numéricos. Los valores obtenidos permitieron discriminar el nivel de vulnerabilidad a la erosión costera en cinco categorías: baja, moderada, alta, muy alta y extrema. Los autores llegaron a la conclusión que los sectores con mayor vulnerabilidad se corresponden con las zonas urbanizadas. Las zonas con menor vulnerabilidad son aquellas áreas naturales donde la duna costera aún no ha sido modificada por la acción antrópica. No se determinaron sectores de vulnerabilidad baja ni moderada.



**Figura 2.4.** Mapa de vulnerabilidad a la erosión costera del sector comprendido entre las localidades Mar Chiquita y Mar de Cobo (San Martín et al., 2012).

Bunicontro et al. (2013) estudiaron la localidad de Santa Clara del Mar con el objetivo de analizar la morfodinámica y el retroceso costero cuando la costa mostraba condiciones naturales (1958-1975), y luego de la implementación de estructuras de protección (1975-2009). El análisis se llevó a cabo a través de la observación de fotografías aéreas en escala 1:20.000 de los años 1958, 1975 y 1986 y una imagen satelital de 2009. Para caracterizar la morfología de la playa actual se relevaron 4 perfiles topográficos, 3 de ellos sobre la costa de Santa Clara del Mar (entre los espigones), mientras que el restante se localizó sobre la costa de Camet Norte, inmediatamente al norte de Santa Clara del Mar. Las tasas de retroceso natural obtenidas entre los años 1958 y 1975 variaron desde 1.7 m/año en el sector sur hasta 5.8 m/año en el norte, y permitieron zonificar la erosión costera en tres zonas: baja, moderada y alta erosión. Entre los años 1975 y 2009 las tasas de erosión disminuyeron notablemente (entre 0.09 y 0.97 m/año) producto de la instalación de medidas de defensa. La tasa de acumulación de arena en la playa entre 1958 y 2009 fue de 0.9 m/año promedio para toda la costa.



**Figura 2.5.** Mapa de zonificación de la erosión costera entre los años 1958 y 1975 para la localidad de Santa Clara del Mar y Camet Norte. Se representa la geomorfología y las obras de defensa costera al 2012 aunque debe considerarse que no existía este tipo de infraestructura durante la década de 1950 (Bunicontro et al., 2013).

Un análisis de vulnerabilidad costera en barrios costeros de la localidad de Mar Chiquita: Playa Dorada, Santa Elena, Santa Clara del Mar, Camet Norte, La Caleta, Mar de Cobo y Balneario Parque Mar Chiquita se presenta en Fernández et al. (2017), mediante la aplicación del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI). Se valieron de fotografías aéreas, imágenes satelitales, información bibliográfica y salidas al campo para caracterizar las variables determinantes de la geomorfología, la antropización y los procesos que hacen a la evolución de la línea de costa;

estas variables fueron luego categorizadas y se les asignó un número del 1 al 5 (donde 1 corresponde a muy baja vulnerabilidad y 5 a muy alta). Los valores correspondientes a cada playa se introdujeron en la ecuación del índice CVI, y los resultados se dividieron en categorías de baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad. Se obtuvieron valores muy altos de vulnerabilidad en las localidades Parque Mar Chiquita y La Caleta, altos en Camet Norte, intermedios en Mar de Cobo y Playa Dorada, y bajos en Santa Clara del Mar y Santa Elena.

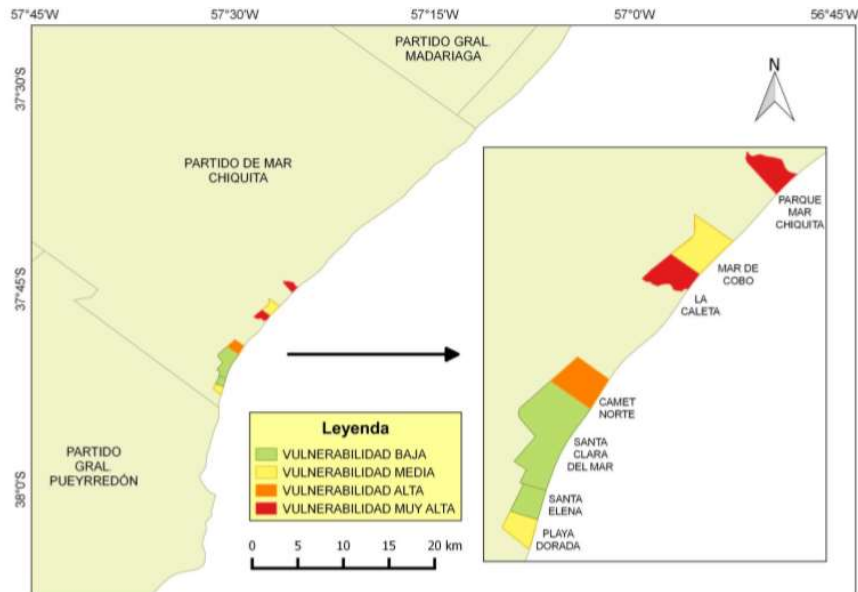
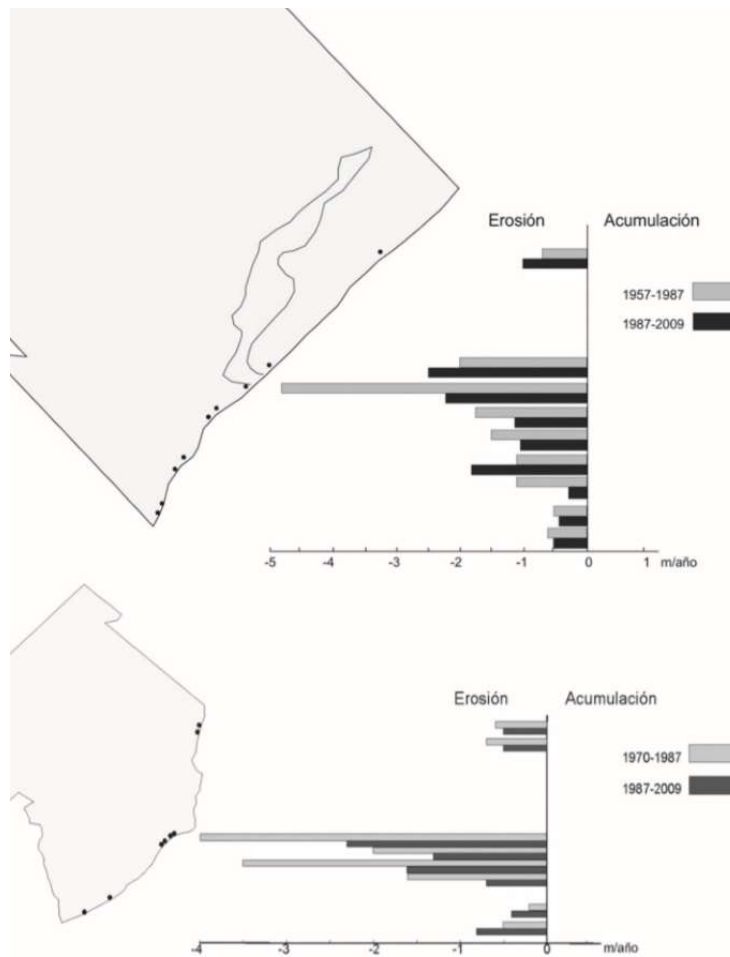


Figura 2.6. Mapa de vulnerabilidad (Fernández et al., 2017).

Fernández y Bértola (2011) analizaron la evolución de la línea de costa y de la estructura urbana en el área de Quequén (Barrio Pinocho), Bahía de los Vientos y Costa Bonita, entre los años 1960 y 2007. Valiéndose de fotografías aéreas de los años 1960 (IGM), 1984 y 1994 (GEODESIA) e imágenes Landsat TM (2004 y 2007), los autores caracterizaron fisonómicamente las playas estudiadas, evaluaron el grado de avance de las construcciones urbanas y cuantificaron las obras de ingeniería hidráulica realizadas. Los resultados indican que, excepto en Bahía de los Vientos, no existe retroceso significativo de la línea de costa. En esta localidad el período de mayor erosión fue el comprendido entre los años 2004 y 2007, con una tasa promedio de 0,6 m/año; en el resto de las playas analizadas, los acantilados permanecen relativamente estables. Con relación a la influencia antrópica, se concluye que la urbanización no tiene injerencia significativa en la dinámica medanosa y por lo tanto, tampoco en los valores de erosión. De esta manera, la principal causa de erosión queda circunscripta a la obstrucción de deriva litoral originada por la escollera Sur.

Bértola et al. (2013) investigaron la dinámica de playas de bolsillo (costa norte de General Pueyrredón y sur de Mar Chiquita) en relación a fenómenos naturales episódicos (tormentas sudestadas) y a acciones antrópicas (obstrucciones de la deriva litoral). Se midieron los ritmos

de retroceso de acantilados (Camet a Mar de Cobo) y del pie del médano litoral (Mar de Cobo a la Estancia Mar Chiquita) a través de fotografías aéreas antiguas (1957), fotografías obtenidas del satélite espía Corona KH4 (1965), y fotografías áreas modernas en los intervalos 1957-1987 y 1987-2000. También se hicieron relevamientos topográficos en las playas para calcular balances sedimentarios. Los resultados muestran que las obras de defensa han logrado disminuir los ritmos de retroceso de acantilados en General Pueyrredón y sur de Mar Chiquita. Sin embargo, hacia el norte, los ritmos de erosión se han incrementado. Santa Clara, Camet Norte y Parque Mar Chiquita presentan balances sedimentarios negativos; Playa La Manada, Barrio Playa Dorada y Mar de Cobo presentan balances positivos.



**Figura 2.7.** Rangos de erosión en los partidos de Mar Chiquita y General Pueyrredón (Bértola et al., 2013).

Utilizando diferentes técnicas de teledetección, Isla et al. (2017) estimaron las tasas de erosión para una gran parte de la costa bonaerense en el periodo 1957-2009. Sobre la base de estas estimaciones, posiciones previstas de la línea de costa se simularon para los últimos 20 o 30

años mediante la aplicación del modelo OIKOS – Leonardo Da Vinci. Ello permitió evaluar la efectividad de las defensas costeras para controlar la erosión de los acantilados de acuerdo a la comparación de dos periodos de tiempo: 1960-1980 y 1980-2008. Si bien las estructuras de defensa han contribuido a la disminución de las tasas de erosión en algunas áreas; en otras, las tasas han aumentado debido a la obstrucción por deriva.

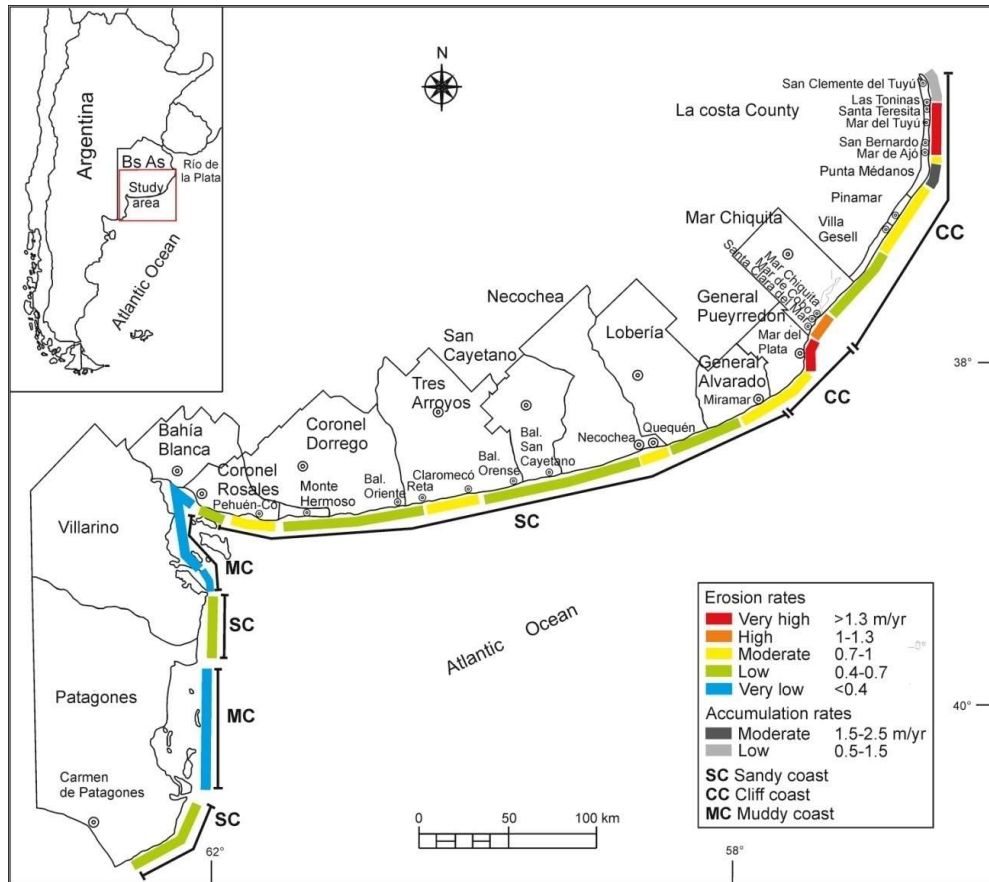
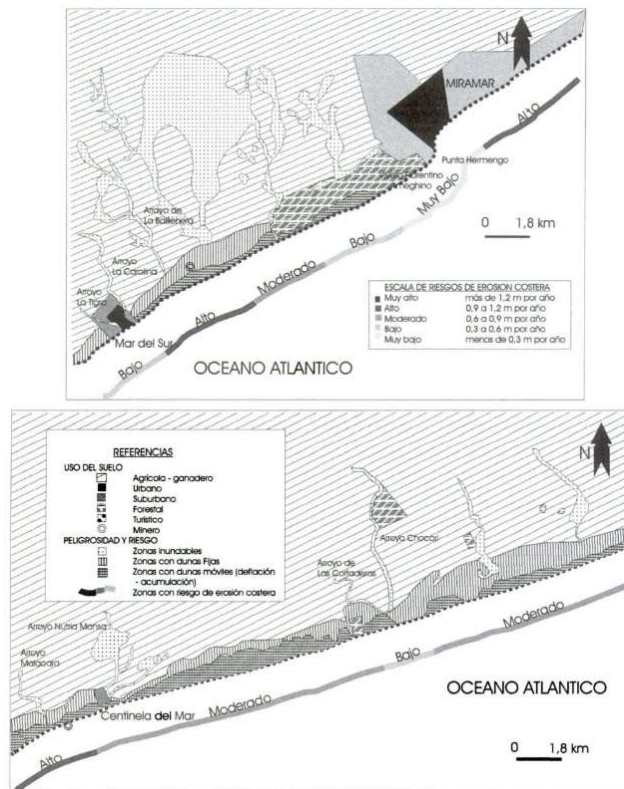


Figura 2.8. Tasas de erosión costera en Buenos Aires (Isla et al., 2017).

Marcomini y López (2010) estimaron la vulnerabilidad a la erosión costera en la localidad de Las Toninas. La tarea requirió de la construcción de una matriz ambiental en la que se consideraron parámetros tales como conservación de la duna costera, erosión costera y de playa, la erosión por drenajes pluviales y los ciclos naturales de la playa. Los datos para completar la matriz se obtuvieron del análisis de fotografías aéreas de los años 1964, 1991 e imágenes satelitales del 2005, y relevamientos de perfiles topográficos realizados desde el año 1998 al 2009. Los resultados muestran que el sector norte de la localidad de Las Toninas, entre las calles 4 y 10, es el de mayor vulnerabilidad a la erosión. Entre las calles 10 y 18 la vulnerabilidad es moderada, y entre las calles 18 y 50 es baja. La mayor vulnerabilidad a la erosión registrada en la zona norte se debió a la explotación minera durante las décadas del 70 y el 80, sumado a la depredación de

la duna costera y la existencia de encauzamientos pluviales de descarga. La mayor erosión vertical (socavamiento) registrada fue de 1.33 m en la playa frontal y de 1.2 m en la playa distal.

Con el objeto de ayudar a planear y regular el uso del territorio en la zona costera comprendida entre la ciudad de Miramar y el arroyo Nutria Mansa (partido de General Alvarado), López y Marcomini (2000) caracterizaron los recursos naturales, las formas de uso del suelo y los riesgos costeros naturales (inundación, erosión costera, deflación - acumulación y contaminación de acuíferos) de ese sector. Sobre la base del uso de información de campo, fotografías aéreas y mosaicos, se caracterizó la morfología costera del sitio de estudio y su evolución, y se determinaron las velocidades de retroceso de los acantilados. Se reconocieron tres sectores altamente erosivos (0.9 a 1.2 m/año): uno localizado en la desembocadura del arroyo Nutria Mansa, otro al nordeste de Mar del Sur y otro al nordeste de la ciudad de Miramar; en todos los casos la acción antrópica directa o inducida fue la principal causa. Se obtuvo también que el espacio libre que debería respetarse para que las construcciones costeras tengan una vida media de 100 años varía de 40 m a más de 180 m para las costas de muy bajo a muy alto riesgo de erosión, respectivamente.



**Figura 2.9.** Esquema de uso del suelo, mapa de peligrosidad y mapa de riesgos. A) Miramar - Mar del Sur. B) Mar del Sur - Centinela del Mar (López y Marcomini, 2000).

Isla et al. (1998) estudiaron el comportamiento de los médanos y la línea de ribera de Villa Gesell en relación a la fijación de dunas para la construcción de la ciudad. Se utilizaron fotografías

aéreas verticales de 1957 y 1981 para analizar los cambios morfológicos reconocibles en los médanos y la evolución de la línea de costa; se realizaron perfiles topográficos (1994-1997) para obtener variaciones volumétricas de sedimento; y se colectaron muestras superficiales de arena para realizar una clasificación granulométrica de las playas. Los resultados indican que las fijaciones de médanos practicadas alteraron la distribución de arena, originando que médanos transversales sean transformados en formas de disponibilidad de sedimento más restringida (médanos parabólicos). La fijación de los médanos indujo así, indirectamente, la erosión de la línea de costa al sur de Villa Gesell, y la canibalización de playas muy modernas emplazadas al sur del Faro Querandí.

Una evaluación del riesgo de erosión costera en gran parte de la provincia de Buenos Aires fue realizada por Merlotto et al. (2017). Dicha evaluación se basó en la combinación de la peligrosidad y la vulnerabilidad; para cada componente se desarrolló un índice compuesto por indicadores considerados determinantes para analizar las particularidades de la amenaza y de las características sociales y económicas de la sociedad expuesta a la misma. Para la caracterización de cada indicador, se utilizó información de relevamientos efectuados durante trabajos de campo ya publicada en numerosos trabajos, cartas topográficas del IGN, fotografías aéreas del INTA, imágenes satelitales, y datos estadísticos poblacionales del INDEC, entre otros. La evaluación de la peligrosidad y la vulnerabilidad ha dado como resultado un riesgo de erosión costera para la provincia de Buenos Aires predominantemente muy bajo, con un solo sector de riesgo alto, pequeños sectores con riesgo moderado y de forma más extendida que estos últimos, se encuentran sectores con riesgo bajo.

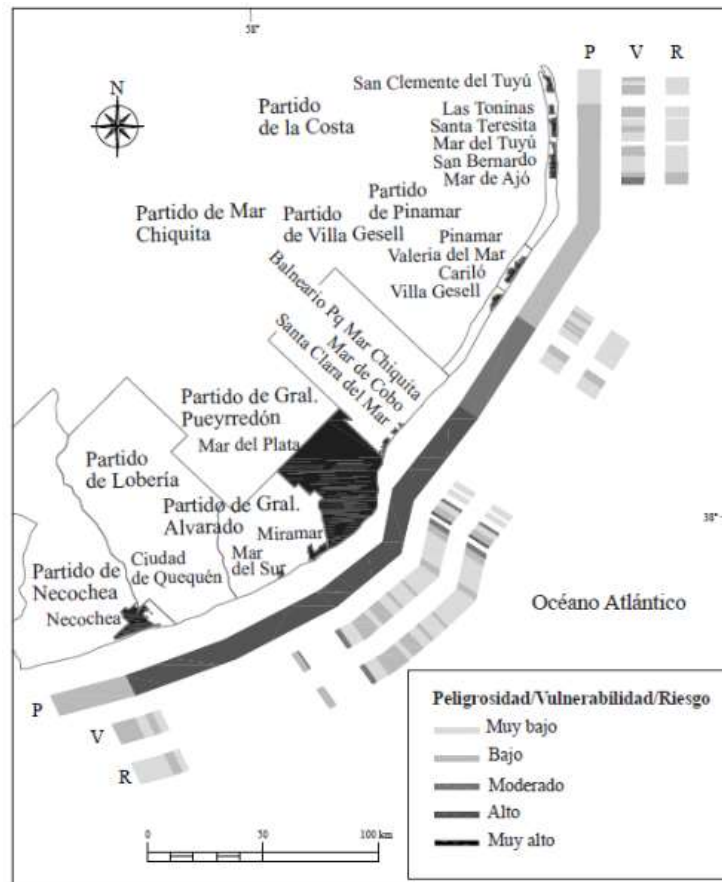


Figura 2.10. Peligrosidad (P), vulnerabilidad (V) y riesgo (R) de erosión costera del sector este y sudeste del área de estudio (Merlotto et al., 2017).

### **3 ANÁLISIS DE DETALLE DE IMPACTOS Y RIESGOS EN ZONAS COSTERAS PILOTO.**

Las evidencias recopiladas sobre el impacto de la acción del mar y la vulnerabilidad de diferentes sectores de la costa bonaerense motiva el desarrollo de una evaluación integral orientada a la cuantificación del riesgo al que se encuentran expuestos distintos sectores del área de estudio. El aporte sustancial de este trabajo consiste en la utilización de la amplia base de datos generada en esta Asistencia Técnica, lo cual permite la implementación de herramientas de cálculo especialmente apropiadas para el análisis de los procesos físicos intervinientes.

Las evaluaciones de riesgo resultan instrumentos útiles para identificar las áreas más vulnerables de una región con el propósito de analizar la posibilidad de reducción de esos riesgos.

El riesgo es, por definición, el producto entre la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. La peligrosidad consiste en la probabilidad de que un evento de cierta magnitud y con un impacto negativo ocurra (por ejemplo: inundación, o erosión costera). Mientras la peligrosidad está relacionada con los aspectos físicos del sistema, la exposición y vulnerabilidad abarcan características socioeconómicas.

Más específicamente, la exposición se relaciona con la presencia de infraestructura y personas que podrían ser afectadas en el área evaluada. El último factor, la vulnerabilidad, se refiere al daño que puede ser causado por los impactos analizados.

Si bien la evaluación del riesgo generalmente implica la cuantificación de estos tres componentes, resulta factible considerar conjuntamente los conceptos de exposición y vulnerabilidad, tal como se presentan en Merlotto et al. (2017). De esta manera, las evaluaciones del riesgo analizan la peligrosidad y la vulnerabilidad, estudiando por un lado las características físicas y particularidades de la amenaza o peligro, y por otro, las de la población e infraestructura expuesta al mismo.

En este capítulo se hace una descripción de los lugares seleccionados a priori por una apreciable vulnerabilidad frente a procesos costeros en función de la información recolectada, tanto en el capítulo anterior como en las reuniones y talleres llevados a cabo en el transcurso del proyecto con representantes de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) y del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (IGCyC). Luego, a partir de la aplicación de una metodología que permite determinar el riesgo mediante la combinación de peligrosidad y vulnerabilidad se busca caracterizar los sitios de interés frente a posibles problemáticas costeras.

### **3.1 Zonas de Análisis**

#### **3.1.1 Bahía de los Vientos**

Se trata de una playa ubicada en el extremo Este de la Ciudad de Quequén (partido de Necochea), a unos 3 km del Puerto (Figura 3.1). Si bien en esas playas hay una baja densidad poblacional, se trata de un lugar de atractivo turístico, tanto por las visuales paisajísticas naturales (Figura 3.2), como por causas antrópicas (ver Informe 3.2 de esta Asistencia Técnica, INA 2019b). Ahora bien, para comprender la dinámica local, es necesario describir al conjunto urbanístico en su totalidad.

El conglomerado Necochea-Quequén cuenta con unos 84.784 habitantes (INDEC, 2010) y se trata de una ciudad turística emblemática de la costa de Buenos Aires, siendo esta una de sus principales actividades económicas. Sin embargo, el principal ingreso es la actividad agrícola, beneficiada por la presencia del Puerto de Quequén. Dicho puerto está situado en el estuario del río Quequén Grande, que atraviesa al conglomerado por el centro, separando a las ciudades de Necochea y Quequén (Figura 3.1).

En cuanto a las características naturales, el área de estudio se encuentra inmersa en un vasto campo de dunas conocido como Barrera de Dunas del Sur (Merlotto et al., 2016), fijadas por vegetación de origen tanto natural como antrópico, a ambos extremos de la ciudad. Estas dunas, urbanizadas en magnitudes variables, se desarrollaron a partir de sedimentos del Cuaternario, que hoy en día constituyen los acantilados de limo oscuro de altura variable que se observan en la zona. La mayor parte de los acantilados son inactivos, cubiertos parcial o totalmente por dunas y rampas de arena, mientras que una pequeña porción se encuentra todavía activa.



Figura 3.1. Ubicación de Bahía de los Vientos.



Figura 3.2. Playa turística – Bahía de los Vientos.

La marea es del tipo mixta, principalmente semi-diurna, con amplitudes medias de 0,98 m (SHN, 2009a). El oleaje presenta un comportamiento estacional, siendo mayor en invierno ( $H_s = 1,26$  m) y menor en verano ( $H_s = 0,96$  m), con una altura significativa de ola de 1,18 m. La

dirección del oleaje va desde el ESE hasta el SO, con predominancia del SSE en todas las estaciones (Merlotto et al., 2013). Como resultado, la deriva litoral se mueve paralela a la costa, con dirección SO-NE (Perillo et al., 2005).

La velocidad media del viento es de 17,8 km/hr, con vientos predominantes del N y NO (Merlotto et al., 2013). Sin embargo, las mayores velocidades se corresponden con vientos del SO y S, en concordancia con los principales eventos de tormenta, las Sudestadas. Estas tormentas son consideradas como la principal causa de cambios morfológicos en la zona (Merlotto et al., 2013).

En cuanto a las características sedimentológicas, las playas de Necochea están compuestas por arenas finas bien graduadas, mientras que en Quequén el sedimento es de arenas medias a gruesas, pobre a moderadamente graduadas.

Respecto a la morfología, se observaron comportamientos diferentes a ambos lados de las escolleras del puerto, indicando por un lado un acentuado proceso erosivo en las costas de Quequén, y por el otro un progresivo proceso de acreción en las playas de Necochea, con posibles proceso erosivos en el corto plazo (Merlotto et al., 2014).

En resumen, la interacción entre los procesos naturales y la actividad económica de la zona resultó en impactos ambientales negativos, de entre los cuales se destaca la erosión costera, siendo esta una problemática a tratar tanto en el corto como en el largo plazo. Desde la construcción del Puerto de Quequén hacia principios del siglo XX, los aportes de arena se vieron afectados debido a la retención parcial de sedimentos transportados por la deriva litoral a causa de la presencia de las escolleras, provocando tanto bancos de arena en la boca del puerto, como erosión costera en las playas de deriva-abajo (Isla et al., 2009). Tal es el caso de Bahía de los Vientos, la playa más afectada por esta combinación de fenómenos y cuyo retroceso de costas supera tasas promedio de 0,4 m anuales para el período 1967-2004 (Merlotto et al., 2014). Esto afecta tanto a la urbanización de la zona (Figura 3.3) como a la infraestructura que da acceso a estas playas, que requiere de costosas obras de ingeniería y sólo logra atenuar parcialmente el avance de la erosión (Figura 3.4).



**Figura 3.3.** Urbanizaciones próximas a acantilados en retroceso – Bahía de los Vientos.



**Figura 3.4.** Rip-Rap como protección de acceso vehicular – Bahía de los Vientos.

### 3.1.2 Puerto de Mar del Plata

Como su nombre lo indica este puerto pertenece a la ciudad de Mar del Plata, la más importante de la franja costera de la provincia de Buenos Aires (Figura 3.5) tanto por su población estable (560.000 habitantes – INDEC, 2010), como por su atractivo turístico: en los meses de Enero y Febrero la población se duplica y hasta triplica debido al turismo de sol y playa.

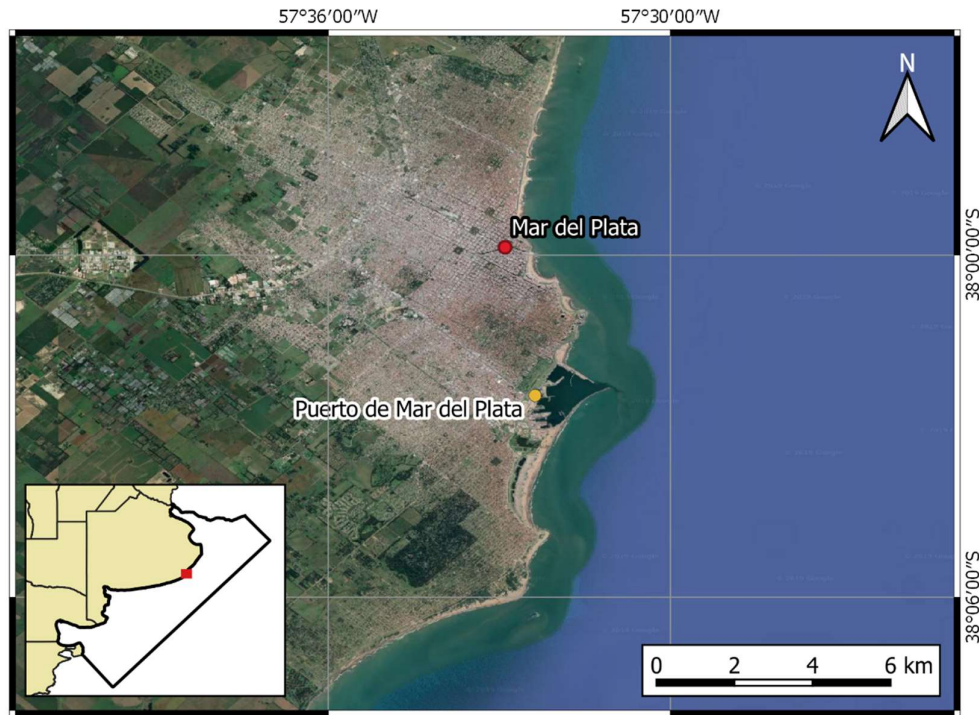


Figura 3.5. Ubicación del Puerto de Mar del Plata.

Hacia la segunda década del siglo XX las playas de Mar del Plata presentaban características naturales en equilibrio, pero el crecimiento de la ciudad y la construcción de numerosas escolleras (Figura 3.6) provocaron una severa degradación de las playas, erosionándose estas deriva-abajo de las obras. Hoy en día, la erosión es un problema generalizado, afectando no sólo a las playas, sino también a infraestructura lindera, como carreteras y complejos hoteleros.

Las tormentas conocidas como Sudestadas son las principales causantes de la erosión costera, en especial en zonas de fuerte intervención humana y se espera que estas causen un daño mayor en el futuro, producto del aumento del nivel del mar. Este último se estima en el orden de 18 – 59 cm para el 2100 (IPCC, 2007), con un una tasa actual de 16 mm/año (D’Onofrio et al., 2006).

A excepción de las escolleras del puerto, todas las obras costeras realizadas tuvieron como objetivo proteger la costa contra la erosión, que oscila entre los 0,5 m/año y los 5 m/año según la zona (Bértola, 2006). Dado que ni el aporte de sedimentos de origen fluvial ni el proveniente

de los acantilados de la zona es suficiente para equilibrar el sistema costero, se recurrió al relleno en diversas ocasiones, siendo estas soluciones efectivas por períodos de tiempo acotados. Tal es el caso del relleno de 1998 en las playas centrales de la ciudad, que modificaron drásticamente la morfodinámica, transformando las playas de carácter reflectivo en disipativas y con perfiles erosivos (Fiore et al., 2009), producto de un inadecuado grano de sedimento (más fino) del material de relleno. Dado que las playas no alcanzaron el equilibrio, mantienen su tendencia erosiva, retornando progresivamente a la morfología original.



**Figura 3.6.** Escolleras como mecanismo de retención de sedimentos – La Perla, Mar del Plata.

La costa de Mar del Plata está expuesta al clima de olas del Atlántico Sur que, sumado a las características geomorfológicas de la zona resultan en una deriva litoral del orden de 1.000.000 m<sup>3</sup>/año (Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica – INA, 2019c; Verón y Bértola, 2014).

En cuanto al puerto, sus principales actividades son la pesca y el movimiento de contenedores (capacidad para 15.000 TEUS), pero también contiene un atractivo turístico ya que en una de las playas internas de la escollera Sur se encuentra la Reserva de Lobos Marinos. Otras actividades que tienen lugar en su interior son las náuticas y deportivas, y la operación de una de las principales bases navales del país. Como obras de protección se destacan las escolleras Sur (principal) y Norte (secundaria), que permiten amortiguar la acción del oleaje para mantener condiciones calmas en el interior del recinto (Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Puerto de Mar del Plata.

Sin embargo, el desarrollo del puerto se ha visto muy limitado por problemas de sedimentación en sus canales de acceso. Previo a su construcción (1913 – 1922), no había signos de cambios morfológicos en sus alrededores. Luego de esta, las costas de la zona comenzaron a modificarse significativamente, produciendo un avance de las playas al Sur de las escolleras y un importante retroceso hacia el Norte, evidenciando el bloqueo parcial de la deriva que estas producen.

Unos 14 años luego de su construcción, comenzó la formación de una barra en la entrada del puerto, y con ella los problemas de acceso. El primer dragado en la zona como medida de mitigación se efectuó en 1950 (Caviglia, Pousa y Lanfredi, 1992). En los 70', un equilibrio local pareciera haberse alcanzado, dadas las pequeñas variaciones de las isobatas 9-11 m a lo largo de la escollera principal (SHN, 1975a, b). Consecuentemente, se podría asumir que la escollera Sur había alcanzado su máxima capacidad de interrupción de la deriva litoral y la mayor parte del sedimento era transportado hacia la entrada del puerto. Asimismo, la orientación de las playas linderas y de las escolleras implica una interrupción casi total de la deriva litoral. Esto resultó en que la retención del sedimento en las playas del Norte sea una prioridad para las autoridades de la zona, lo que derivó en la construcción de una serie de rompeolas. Esto a su vez produjo la propagación del fenómeno erosivo en las playas hacia el Norte, requiriendo la construcción de nuevos rompeolas (Syvitski et al., 2005). No siendo esto suficiente, anualmente y previo al comienzo de la temporada se prepara las playas de la zona con un relleno de arena (Figura 3.8), pero que se va erosionando rápidamente (Figura 3.9).



**Figura 3.8.** Relleno previo al comienzo de la temporada turística – Playa Grande, Mar del Plata.



**Figura 3.9.** Relleno erosionado por ondas de tormenta – Playa Grande, Mar del Plata.

Otro dragado sustancial ocurrió en 1998, con el objetivo de re-establecer las profundidades de diseño del acceso al Puerto y re-utilizar el material dragado para abastecer las playas del Norte. Sin embargo, tanto la entrada al puerto como las playas retornaron rápidamente a las

condiciones previas. Actualmente, la profundidad del canal principal es de unos 10,5 m (SHN, 2019), mientras que las condiciones necesarias para una óptima operación son 11 metros de profundidad y unos 100 metros de ancho. Si bien se trata de un estado casi ideal, ésta es una condición inestable en el corto plazo, que requiere cierta regularidad de dragado. De lo contrario el canal alcanza en pocos años profundidades inferiores, requiriendo la utilización del canal secundario con orientación 217° - 37°, con morfología más estable, pero con peores condiciones para la navegación (SHN, 2016).

La marea en la zona es de carácter mixto, predominantemente semi-diurno, con un nivel medio de +0,91 m. La amplitud máxima promedio es de +1,32 m y la mínima promedio es de +0,52 m, lo que da una amplitud media de 0,8 m (valores referidos al cero local del Puerto de Mar del Plata). A su vez, el 95% de los niveles se encuentra por debajo de la cota +1,75 y el mayor valor medido por el Servicio de Hidrografía Naval fue de +3,04 m en 1997, lo que indica la presencia de marea meteorológica superior a 1 m por sobre la marea astronómica (Cáceres, 2016).

Para la caracterización de las corrientes de marea se utilizaron datos medidos por 13 meses cerca de la escollera Sur durante 1970-1971 por Sunrise Technical Consultants (1971), obtenidos para la remodelación del Puerto en esa época. Como resultado, se observa una corriente con dirección predominante hacia el Norte en marea creciente y hacia el Sur con marea bajante, aunque debido a la desigualdad diurna, ocurren ciertos cambios de dirección con las menores amplitudes. Los valores de corriente máximos registrados fueron de 0,6 m/s en la superficie y 0,2 m/s cerca del fondo.

Respecto al oleaje, su dirección se separa de la de las corrientes de marea, predominando la primera con el aumento de la altura significativa. En la zona de rompiente, la marea no tiene influencia sobre las corrientes, que pueden alcanzar 1 m/s por acción del oleaje y son de carácter longitudinal. En aguas más profundas, las corrientes se originan tanto por el oleaje como por la marea astronómica y/o meteorológica (Dean y Dalrymple, 2004).

En cuanto al tipo de sedimentos que se encuentra en la zona, las costas de Mar del Plata consisten en bahías extensas interrumpidas por roca ortocuarcita (Syvitski et al., 2005) y acantilados de loess del Pleistoceno que llegan hasta los 25 metros de altura. Estos últimos son una fuente importante de sedimentos para la deriva litoral. En las cercanías del Puerto, el sedimento puede caracterizarse por las siguientes medidas:  $d_{50} = 0,21$  mm,  $d_{84} = 0,32$  mm,  $d_{16} = 0,13$  mm,  $\sigma_g = \sqrt{(d_{84}/d_{16})} = 1,57$ .

Dado el histórico problema de sedimentación en la entrada al Puerto y la falta de éxito en la resolución del conflicto, este sitio resulta de gran interés para realizar estudios morfológicos y la implementación de posibles soluciones. A esto se suma el hecho de que en el pasado reciente se efectuaron estudios similares, como es el caso del trabajo realizado por Cáceres (2014), que permitirá validar la metodología implementada.

### 3.1.3 Las Toninas

Esta ciudad balneario se encuentra unos 10 km al Sur de San Clemente del Tuyú, que es la primera ciudad costera fuera del estuario del Río de La Plata (Figura 3.10). Ambas ciudades pertenecen al Partido de La Costa, situado en el sector centro-este de la Provincia de Buenos Aires.

Las Toninas abarca una superficie de 7 km<sup>2</sup>, con un frente costero de 4 km y cuenta con una población estable de 5.278 habitantes (INDEC, 2010), triplicando aquélla de unos 20 años antes (1614 habitantes en 1991). La principal actividad económica es el turismo de playa, por lo que la mayor concentración de viviendas se desarrolla en las cercanías de la costa (Figura 3.11), manteniendo un porcentaje de ocupación elevado sólo durante el verano.

Como es común en las localidades balnearias del partido de la Costa, la urbanización se caracteriza por un desarrollo en cuadrícula, perpendicular a la costa. La construcción de casas y avenidas ha modificado la topografía natural de la zona, modificando el drenaje natural de la zona y afectando al campo de dunas existente (Marcomini y López, 2010).

Este último se integra por dos grupos bien diferenciados: un primer grupo de dunas inactivas, compuesto por dunas aisladas sobre cordones, y dunas y mantos de arena en depresiones. Un segundo grupo semi-activo, compuesto por una morfología con actividad eólica (es decir, modifican su morfología en un lapso de algunos años), pero de por sí con muy poca movilidad y con una gran superficie vegetada y urbanizada, lo que a su vez incrementa la tendencia hacia la estaticidad.

El sector de dunas costeras consiste en una zona fuertemente antropizada, con dunas de ancho variable de entre 40 y 200 m que disminuyen en los sectores más urbanizados, en especial entre las calles 4 y 10, zona en la que estas prácticamente desaparecen. Las dunas costeras originarias no presentaban una morfología definida, contaban con un ancho de aproximadamente 150 m y prácticamente no presentaban vegetación. Actualmente, se hallan vegetadas en gran medida con especies arbóreas, las que modifican notoriamente su dinámica, por interrumpir el intercambio natural de arena entre estas y la playa.

Como particularidad de la zona puede mencionarse que por aquí ingresan al país 5 cables de fibra óptica (Atlantis-2, Bicentenario, SAm-1, SAC y Unisur - Figura 3.12) y otros 3 que se proyecta instalar en los próximos años (Tannat, Malbec y ARBR), haciendo de esta ciudad un punto clave para la infraestructura en telecomunicaciones del país.

En cuanto a las variables naturales, los vientos predominantes en la zona presentan gran variabilidad, proviniendo tanto del NE (24,9%), del N (17,1%) como del S (14,1%) y hasta una cantidad importante de momentos de calma (17%). Las velocidades medias son de 14,4 km/hr, alcanzando los mayores valores en primavera y verano (Estación Meteorológica Santa Teresita, 2000).

Las mareas muestran un régimen semi-diurno con desigualdades diurnas cuya amplitud media varía entre 1,49 m (sicigia) y 0,76 m (cuadratura) (SHN, 2009b). El oleaje presenta dos direcciones principales, Sur y Sureste, lo que origina corrientes de deriva litoral neta hacia el noreste.

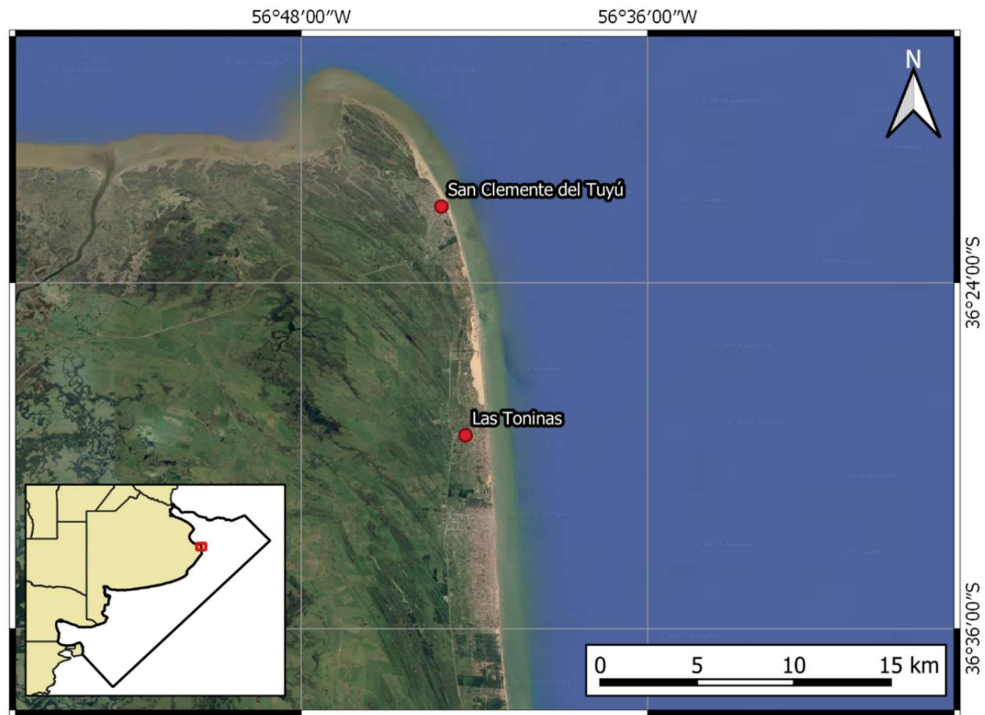
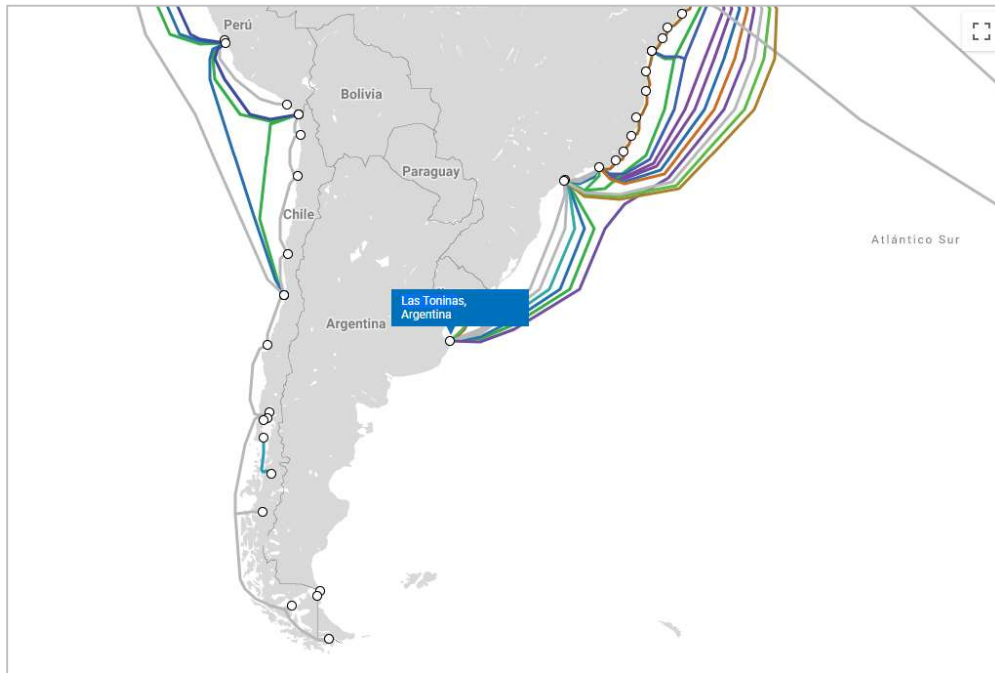


Figura 3.10. Ubicación de la localidad de Las Toninas.



Figura 3.11. Vista panorámica de la playa y la urbanización de la ciudad – Las Toninas.



**Figura 3.12.** Tendido de cables submarinos que ingresan a Argentina a través de Las Toninas<sup>1</sup>.

Las playas presentan un ancho variable de 80 a 100 m, con una pendiente media de 0,015 y están constituidas por arena fina a mediana. El perfil de playa es rectilíneo, no presenta bermas estables ni estacionales en ningún período del año, pero si es frecuente la presencia de barras de lavado de 30 metros de ancho y de 30 a 50 cm de alto, que migran hacia la playa distal.

Hay dos tipos de eventos que producen modificaciones en la morfología costera: uno es el mar de fondo (swell), que se desarrolla bajo condiciones de olas de gran longitud de onda y baja pendiente de playa. Esto provoca la movilización de sedimento de profundidad hacia la playa.

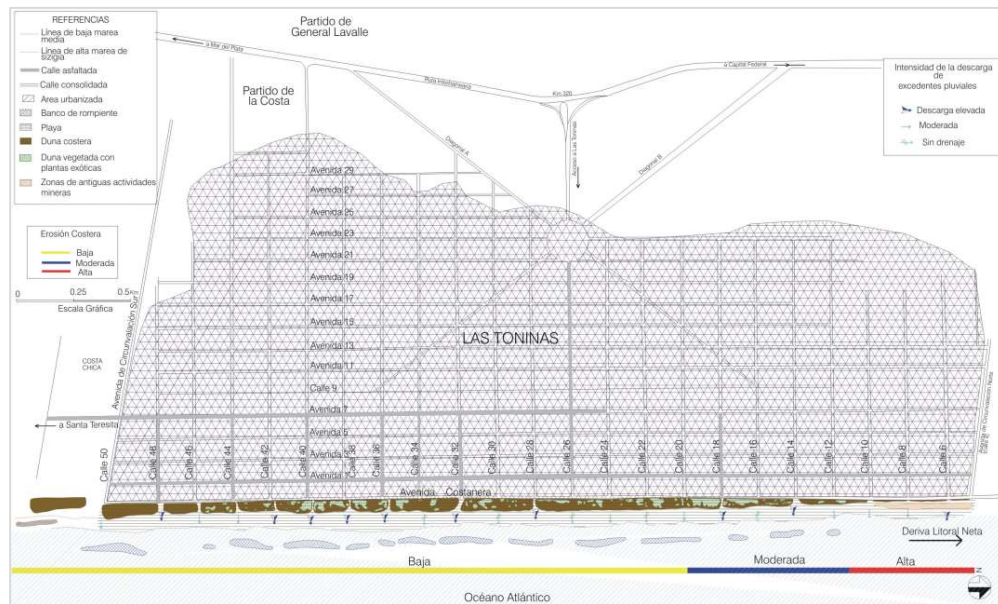
El otro es la acción que ejercen las tormentas (storm surges o en este caso, Sudestadas), asociadas con olas de corta longitud de onda y un aumento del nivel medio del mar, que provoca la erosión de la playa frontal, movilizandolas bermas, disminuyendo la pendiente de la playa frontal y produciendo barras bajo condiciones de gran transporte litoral.

Durante la primavera-verano la acción de las sudestadas es más frecuente e intensa (SHN, 1999), por lo que prevalecen las condiciones erosivas. Durante el otoño-invierno se observa la entrada de material de sur a norte, es decir en el sentido de la deriva, constituyendo barras de lavado que posteriormente forman barras estacionales. Sin embargo, en los sectores alterados el equilibrio no se restablece con esa marcada ciclicidad. La destrucción y/o edificación de la duna costera no permite la recuperación de la playa, que ocurre fundamentalmente por acción eólica (Marcomini y López, 2010).

Marcomini y López (2010) analizaron que el sector norte de Las Toninas, entre las calles 4 y 10, es el de mayor vulnerabilidad a la erosión, entre calles 10 a 18 la vulnerabilidad es moderada y de la 18 a 50 es baja (Figura 3.13). La mayor vulnerabilidad a la erosión registrada en la zona

<sup>1</sup> <https://www.submarinecablemap.com/#/submarine-cable/arbr>

norte se debió a una explotación minera que cesó hace varios años, sumada a la depredación de la duna costera por solicitud de los vecinos frentistas a principios de los 80' y a la presencia de descargas pluviales importantes en las calles 6, 8 y 10. Todo esto produjo un desequilibrio que hasta el momento no fue posible de restablecer. Como resultado, la mayor erosión vertical (socavamiento) registrada fue de 1,33 m en la playa frontal y de 1,2 m en la playa distal, y la erosión horizontal promedio fue de 1 m/año.



**Figura 3.13.** Mapa de vulnerabilidad a la erosión – Las Toninas (Marcomini y López, 2010).

En esta zona se han realizado dos episodios de recarga de playa en 1998 y 2007. El primero con una incorporación de 20.000 m<sup>3</sup> de arena en la zona de dunas y playa distal, sobre una extensión de 540 m. La durabilidad de este emprendimiento se considera baja porque se perdió el 50% del material adicionado en los primeros 18 meses (López 2010).

En 2007 se realizó la segunda recarga artificial en la zona de alta erosión de las Toninas. En enero de 2008 esa intervención se mantenía y en julio de 2009 ya se observaba su pérdida junto con un retroceso del pie de dunas de unos 11 m (Marcomini y López, 2010).

De lo anterior resulta que el sector Norte de la ciudad es el más vulnerable frente a la erosión costera y a su vez es aquel que presenta una mayor importancia a nivel nacional en cuestiones de infraestructura en telecomunicaciones. Es por todo esto que resulta de interés en este proyecto poder estudiar el comportamiento morfológico de la zona y plantear alguna solución, aunque sea a grandes rasgos, que pudieran mitigar los efectos erosivos.

### 3.2 Metodología SimpleCoast

El principal objetivo de este análisis consiste en estimar los impactos del oleaje y niveles extremos de marea evaluando los procesos de erosión e inundación que pueden desarrollarse en cada ubicación de estudio para diferentes escenarios. Sobre la base de esta idea se desarrollan las siguientes etapas:

- Cuantificación de la peligrosidad. Consiste en la identificación de escenarios de análisis definidos a partir de la relación entre las variables Altura significativa del oleaje (Hs) y Niveles de Marea (N) y sus correspondientes períodos de retorno (Tr).
- Evaluación del impacto de los peligros (amenazas) costeros, a fin de cuantificar el sus efectos en términos de altura de inundación de la playa y erosión costera.
- Identificación de un índice de riesgo costero relativo, incluyendo información sobre los efectos de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. Posteriormente, se evalúa el riesgo costero relativo considerando diferentes períodos de retorno que caracterizan el nivel de la amenaza.

A continuación se presenta una breve descripción de la metodología desarrollada para cada una de las etapas de estudio.

#### 3.2.1 Cuantificación de la peligrosidad (amenazas costeras)

Como información de base fueron utilizados los resultados del análisis de valores extremos para alturas del oleaje y niveles de marea correspondientes a distintas boyas virtuales cercanas a la costa, presentados en el Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica.

De esta manera se dispuso de un conjunto de valores, para ambas variables, asociados a distintos períodos de retorno que permitieron definir los escenarios de interés para el análisis.

En el caso de la información referida al oleaje, la misma fue propagada desde la ubicación de las boyas virtuales hasta zonas de baja profundidad cercanas a cada playa utilizando el módulo Litdrift del modelo LITPACK, con el propósito de representar adecuadamente la transformación de las olas contemplando los procesos de refracción, asomeramiento y fricción de fondo. De esta manera se obtuvieron los parámetros del oleaje adecuados para la implementación de las expresiones de cálculo aplicadas para estimar los impactos en términos de erosión e inundación de la playa.

#### 3.2.2 Evaluación de los Impactos

Para esta aplicación se utilizaron las herramientas de cálculo disponibles en el paquete SimpleCoast<sup>2</sup> desarrollado por Deltares.

---

<sup>2</sup> <http://www.simplecoast.com/>

En todos los casos, los cálculos se realizaron sobre perfiles de playa que resultan representativos cada área de estudio, habiendo sido relevados por el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP-CIC).

### 3.2.3 Evaluación de niveles de inundación de la playa

Se utilizó la planilla de cálculo 'Flooding' de SimpleCoast (Giardino et al., 2017). Esta planilla requiere del ingreso de numerosos valores relacionados con las características del perfil de playa, el oleaje y el nivel de la marea. Se detalla a continuación la secuencia ordenada de pasos para la obtención de los valores de los principales parámetros requeridos.

#### a) Profundidad del agua al pie de la duna

Requirió de definir el pie de la duna en cada perfil de playa. Se consideró que el pie de la duna coincide con el fin de la playa frontal; es decir, la línea de bajamar (bajamar media; van der Meer, 2002). Para cada perfil, la bajamar media fue obtenida de las tablas de marea del Servicio de Hidrografía Naval para el Puerto Patrón más cercano.

#### b) Altura de las olas y nivel de la marea

Se utilizó el modelo LitDrift para propagar el oleaje correspondiente a diferentes escenarios de cálculo a los largo de los perfiles de playa; las condiciones de borde establecidas (altura, periodo y dirección de las olas, y niveles de marea) correspondieron a distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 y 100 años). De esta manera, se obtuvieron valores para los siguientes parámetros:

- Altura de ola significativa en aguas costeras (profundidad de referencia  $d=-8$  m).
- Nivel de la marea en aguas costeras ((profundidad de referencia  $d=-8$  m)
- Altura de ola significativa al pie de la duna.

En relación a la dirección de las olas al pie de la duna, se consideró que éstas llegan perpendiculares a la orientación de la línea de costa. Al nivel de la marea (meteorológica + astronómica) debió sumársele la sobre elevación del nivel del mar por rotura del oleaje (wave setup), para obtener el nivel máximo del agua. La expresión utilizada para calcular el set-up es la siguiente:

$$\Delta h_s = 0,2 \cdot \gamma^2 \cdot h_{br}$$

Siendo:

$\Delta h_s$ : Sobre elevación del nivel del mar por rotura del oleaje (m).

$\gamma$ : parámetro de rotura del oleaje (-).

$h_{br}$ : profundidad del agua en la línea de rotura (m).

#### c) Pendiente del perfil de playa

La pendiente del perfil  $\tan\alpha$  se calculó a partir de su geometría y del valor de altura de ola significativa al pie de duna ( $H_{s,toe}$ ; Figura 3.14). Para perfiles con berma:

$$\tan\alpha = \frac{3 \cdot H_{s,toe}}{L - B}$$

Siendo:

$\tan\alpha$ : pendiente del perfil (-).

$H_{s,toe}$ : altura de ola significativa al pie de la duna (m).

L: Longitud del perfil entre SWL -  $1,5H_{s,toe}$  y Berm +  $1,5H_{s,toe}$  (m).

B: longitud de la berma (m).

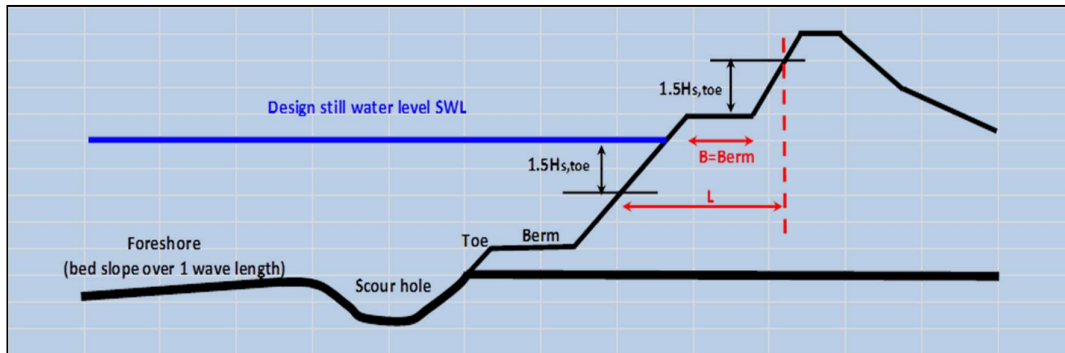


Figura 3.14. Esquema de perfil con berma (SimpleCoast)

Para perfiles que sin berma, se consideró:

$$\tan\alpha = \frac{3 \cdot H_{s,toe}}{L}$$

Siendo:

$\tan\alpha$ : pendiente del perfil (-).

$H_{s,toe}$ ; altura de ola significativa al pie de la duna (m).

L: Longitud del perfil entre SWL -  $1,5H_{s,toe}$  y SWL +  $1,5H_{s,toe}$  (m).

#### d) Cálculo del run up

Son tres las fórmulas disponibles para calcular el run up en la planilla 'Flooding' de SimpleCoast (Giardino et al., 2017). Para esta aplicación se seleccionó la fórmula de Stockdon (2006) debido a que fue diseñada para playas de arena. Dicha expresión de cálculo depende del valor del parámetro de Iribarren  $\xi$ .

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (4)$$

Siendo:

$\xi$ : parámetro de Iribarren (-).

$\tan\alpha$ : pendiente del perfil (-).

H: altura de ola (m).

$L_0$ : longitud de onda en aguas profundas (m).

En consecuencia se utilizan las siguientes expresiones para calcular el run-up:

Para  $\xi < 0.3$ :

$$R_{2\%} = \gamma_s \cdot 0,016 \cdot \sqrt{H_{s,o} \cdot L_0}$$

Para  $\xi \geq 0.3$ :

$$R_{2\%} = \gamma_s \cdot 0,35 \cdot \tan\alpha \cdot \sqrt{H_{s,o} \cdot L_0}$$

Siendo:

$R_{2\%}$ : run-up (m).

$\gamma_s$ : factor de seguridad para el run up (en el rango 1,1 - 1,3) (-).

$\tan\alpha$ : pendiente del perfil (-).

$H_{s,o}$ : altura de ola significativa en aguas profundas (offshore) (m).

$L_0$ : longitud de onda en aguas profundas (m).

e) *Máximo nivel de inundación*

Una vez determinado el valor de run-up se obtiene el máximo nivel de inundación ( $Dh_{total}$ , Figura 3.15) mediante la siguiente expresión:

$$\Delta h_{total} = \Delta h_T + \Delta h_S + \Delta h_W + R_{2\%}$$

Siendo:

$Dh_{total}$ : Nivel máximo de inundación (m).

$Dh_T$ : Marea astronómica (m).

$Dh_S$ : Marea meteorológica (m).

$Dh_W$ : Sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje o wave setup (m).

$R_{2\%}$ : run up (m).

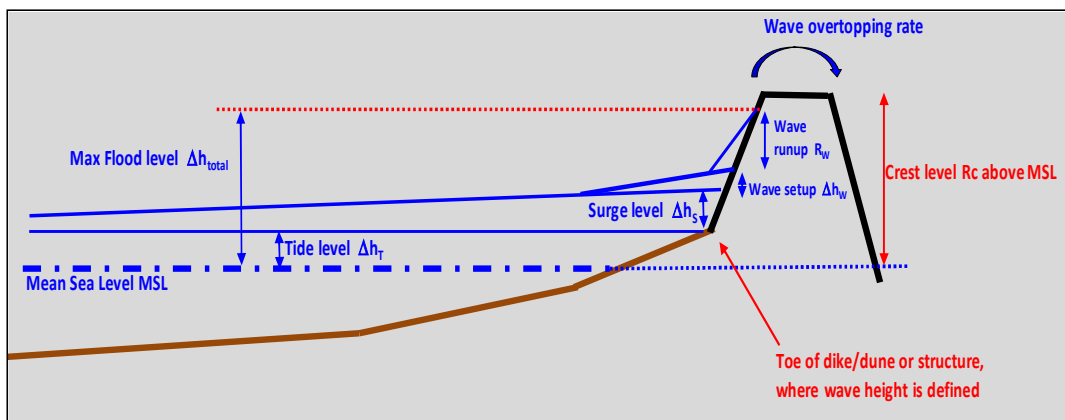


Figura 3.15. Esquema que ilustra el cálculo del máximo nivel de inundación (SimpleCoast)

f) *Cálculo del sobrepaso*

Para los casos en los que fuera necesario, la planilla 'Flooding' permite estimar caudales de sobrepaso mediante las fórmulas del Manual EUROTOP (2007). Este manual propone tres fórmulas distintas en base al valor obtenido del Parámetro de Iribarren  $\xi$ .

Para  $\xi < 1,8$ :

$$Q_{wo} = \gamma_s \cdot \xi \left[ \frac{A_1}{\sqrt{(\tan \alpha)}} \right] \cdot \sqrt{(g \cdot H_{s,toe}^3)} \cdot \exp \left\{ \left( \frac{-A_2 \cdot R_c}{\xi \cdot \gamma_{berm} \cdot \gamma_r \cdot \gamma_{Beta} \cdot H_{s,toe}} \right) \right\}$$

Para  $1,8 < \xi < 7$ :

$$q_{wo} = \gamma_s \cdot A_3 \cdot \sqrt{(g \cdot H_{s,toe}^3)} \cdot \exp \left\{ \left( \frac{-A_4 \cdot R_c}{\gamma_r \cdot \gamma_{berm} \cdot \gamma_{Beta} \cdot H_{s,toe}} \right) \right\}$$

Para  $\xi > 7$ :

$$q_{wo} = \gamma_s \cdot A_5 \cdot \sqrt{(g \cdot H_{s,toe}^3)} \cdot \exp \left\{ \left( \frac{-A_6 \cdot R_c}{\gamma_r \cdot \gamma_{berm} \cdot \gamma_{Beta} \cdot (0,33 + 0,22 \cdot \xi) \cdot H_{s,toe}} \right) \right\}$$

Siendo:

$q_{wo}$ : tasa de sobrepaso (l/m/s)

$H_{s,toe}$ : altura de ola significativa al pie de la duna (m).

$\xi$ : parámetro de Iribarren (-).

$R_c$ : altura de la duna por encima del nivel medio del agua (m).

$\alpha$ : ángulo de la pendiente del perfil de playa (-).

$\gamma_r$ : factor de rugosidad (Figura 3) (-).

$\gamma_{berm}$ : factor de berma ( $\gamma_{berm} = 1$  cuando no hay berma o para bermas  $< 3$  m;  $\gamma_{berm} = 0.6$  para bermas  $> 10$  m) (-).

$\gamma_{Beta}$ : factor de oblicuidad de la ola ( $\gamma_{Beta} = 1$  para olas que llegan perpendiculares a la costa) (-).

$\gamma_s$ : factor de seguridad para el run up (en el rango 1,1 - 1,3) (-).

$A_i$ : coeficientes disponibles en Tablas.

### 3.2.4 Evaluación de la erosión sobre el perfil de playa

Para estimar el retroceso de la línea de costa se utilizó la planilla de cálculo 'Littoral' de SimpleCoast (Giardino et al., 2017). Esta planilla requiere del ingreso de numerosos valores relacionados con las características del perfil de playa, el oleaje y el nivel de la marea. Se detalla a continuación la secuencia ordenada de pasos para la obtención de los valores de los principales parámetros requeridos para el cálculo.

a) *Caracterización del perfil de playa: pendiente, altura de la duna y granulometría*

En la Figura 3.16 se muestra la geometría de un perfil simplificado, las referencias y la fórmula para el cálculo de la pendiente y el criterio para definir la altura de la duna. La granulometría del perfil, definida por el diámetro medio del sedimento D50, se obtuvo a partir de la revisión de

trabajos locales. Para los casos en los que no se contó con información granulométrica, se adoptó el valor de  $D_{50} = 0,2$  mm para el desarrollo del cálculo.

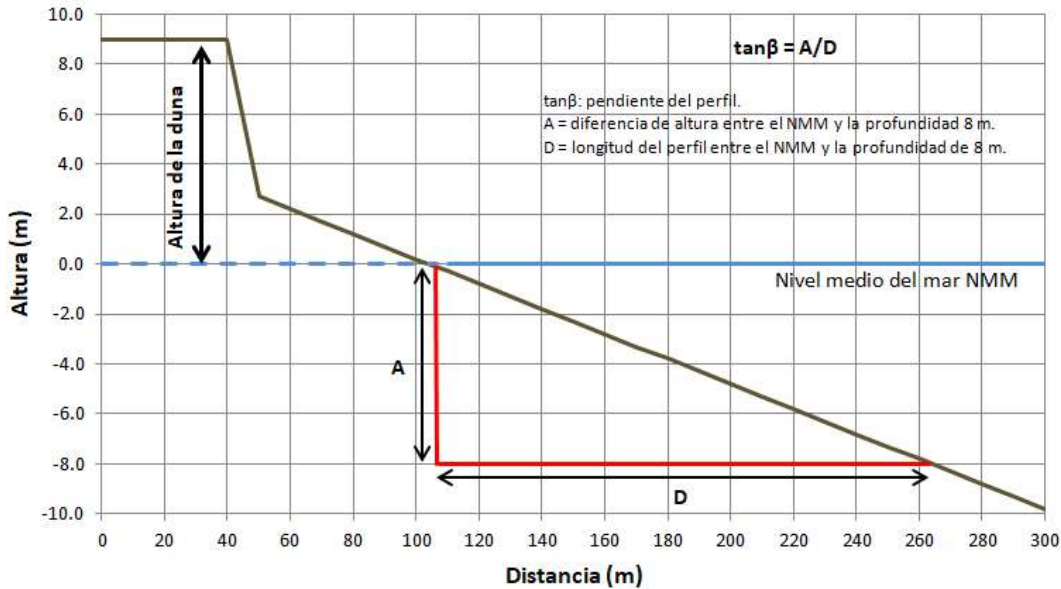


Figura 3.16. Esquema simplificado del perfil de playa utilizado para el cálculo (SimpleCoast)

b) *Altura de las olas y nivel de la marea*

Del mismo modo que para la estimación de los niveles de inundación, se utilizó el modelo LitDrift para propagar el oleaje a los largo de los perfiles de playa; las condiciones de borde establecidas (altura, periodo y dirección de las olas, y niveles de marea) correspondieron a distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 y 100 años). De esta manera, se obtuvieron valores para los siguientes parámetros:

- Altura de ola significativa en aguas profundas (offshore; -8 m).
- Nivel de la marea (offshore; -8 m)
- Dirección de las olas en aguas profundas (offshore; -8 m)

Al nivel de la marea debió sumársele la sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje (wave setup), para así obtener el nivel máximo del agua. La fórmula utilizada para calcular la sobreelevación es la siguiente:

$$\Delta h_s = 0,2 \cdot \gamma^2 \cdot h_{br} \quad (1)$$

Siendo:

$\Delta h_s$ : sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje (m).

$\gamma$ : parámetro de rotura del oleaje (-).

$h_{br}$ : profundidad del agua en la línea de rotura (m).

c) *Cálculo de la erosión de las dunas*

Son dos las fórmulas disponibles para calcular la erosión de las dunas en la planilla 'Littoral' de SimpleCoast (Giardino et al., 2017). Para esta aplicación se seleccionó la fórmula de van Rijn (2006) debido a que permite introducir el tiempo de duración de las condiciones de olas y niveles. La Figura 3.17 muestra el esquema simplificado que se considera para el desarrollo del cálculo.

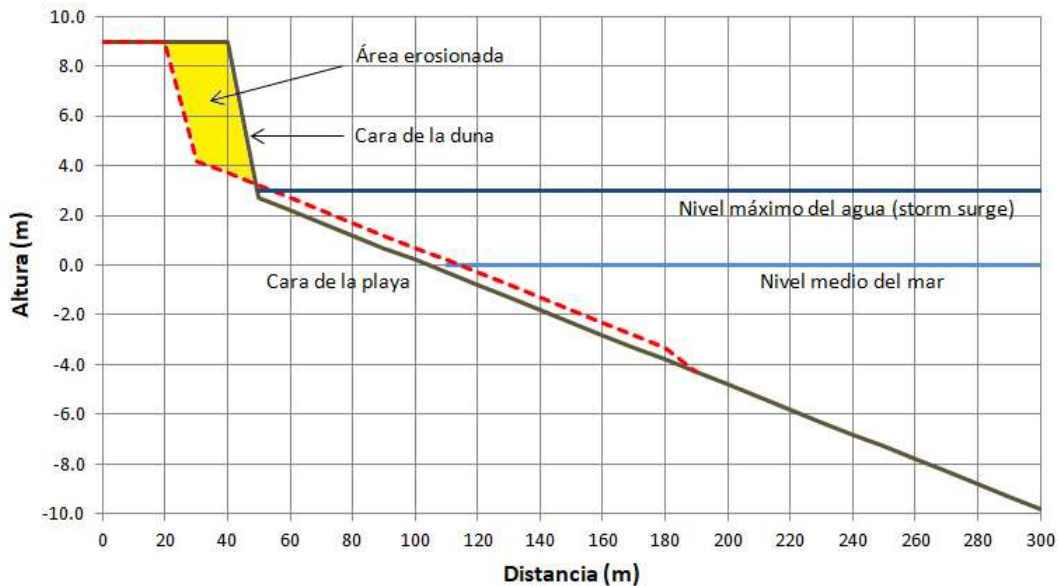


Figura 3.17. Esquema simplificado para el cálculo de la erosión sobre el perfil de playa (SimpleCoast)

#### Cálculo del volumen erosionado (luego de 5 hs)

Si el nivel máximo del agua (storm surge) < 5 m:

$$A_{d,t=5} = 170 \cdot \left(\frac{0,00025}{D_{50}}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{S}{5}\right)^{1,3} \cdot \sqrt{\frac{H_{s,o}}{7,6}} \cdot \sqrt{\frac{T_p}{12}} \cdot (\tan\beta)^{0,3} \cdot \sqrt{\frac{1 + \theta}{100}}$$

Si el nivel máximo del agua (storm surge) ≥ 5 m:

$$A_{d,t=5} = 170 \cdot \left(\frac{0,00025}{D_{50}}\right)^{1,3} \cdot \sqrt{\frac{S}{5}} \cdot \sqrt{\frac{H_{s,o}}{7,6}} \cdot \sqrt{\frac{T_p}{12}} \cdot (\tan\beta)^{0,3} \cdot \sqrt{\frac{1 + \theta}{100}}$$

Siendo:

$A_{d,5}$ : área de erosión de la duna por encima del nivel S luego de 5 horas ( $m^3/m$ ).

$D_{50}$ : diámetro medio del sedimento (m).

S: nivel máximo del agua (storm surge; respecto al nivel medio) (m).

$H_{s,o}$ : altura de ola significativa en aguas profundas (offshore) (m).

$T_p$ : periodo de pico de la ola (s).

$\tan\beta$ : pendiente del perfil de playa (-).

$\theta_0$ : ángulo de incidencia de la ola respecto a la normal a la costa en aguas profundas (o).

#### Cálculo del volumen erosionado (luego de t hs)

Si la duración  $t < 5$  hs:

$$A_{d,t} = A_{d,5} \cdot \sqrt{\frac{t}{5}}$$

Si la duración  $t \geq 5$  hs:

$$A_{d,t} = A_{d,5} \cdot \left(\frac{t}{5}\right)^{0,2}$$

Siendo:

$A_{d,t}$ : área de erosión de la duna por encima del nivel S luego de t horas ( $m^3/m$ ).

T: duración (hs).

$A_{d,5}$ : área de erosión de la duna por encima del nivel S luego de 5 horas ( $m^3/m$ ).

#### Cálculo del retroceso de la duna (luego de t hs)

$$R_d = \frac{A_{d,t}}{D}$$

Siendo:

$A_{d,t}$ : área de erosión de la duna por encima del nivel S luego de t horas ( $m^3/m$ ).

D: altura efectiva de la duna (m).

$$D = B - S \quad \text{si } (B - S) > 1$$

$$D = 1 \quad \text{si } (B - S) \leq 1$$

Siendo:

D: altura efectiva de la duna (m)

B: Altura de la duna respecto al nivel medio del agua (m).

S: nivel máximo del agua (storm surge; respecto al nivel medio) (m).

#### 3.2.5 Caracterización del riesgo costero

La caracterización del riesgo costero se basó en la combinación de la peligrosidad y la vulnerabilidad, la cual incluye el concepto de exposición. Para cada componente se desarrolló un índice compuesto por indicadores considerados determinantes para analizar las particularidades de la amenaza y las características sociales y económicas de la población expuesta a la misma.

El índice de peligrosidad está compuesto por dos indicadores que representan la erosión potencial de la playa frente a una amenaza (temporales) y la cota de inundación asociada a los fenómenos de sobrelevación del nivel de agua por efectos meteorológicos y por la acción de las olas (marea meteorológica, set-up del oleaje, run-up y eventualmente sobrepaso).

El índice de vulnerabilidad fue extraído del trabajo desarrollado por Merlotto et al. (2017), quienes realizaron un estudio detallado de estos aspectos sobre una extensa región de la costa bonaerense. Dicho índice abarca once variables que involucran aspectos demográficos, educativos, sanitarios, de salud, económicos, productivos, laborales y de exposición de la población. Estas variables fueron agrupadas en tres indicadores: demográfico, condiciones de vida y trabajo y consumo.

Cada indicador fue clasificado en cinco categorías valoradas del 1 al 5, establecidas cuantitativamente cuando fue posible. Para las categorías que no fueron cuantificadas se realizó una descripción cualitativa. Los índices de peligrosidad y vulnerabilidad fueron obtenidos a partir de las siguientes fórmulas:

$$\text{Índice de Peligrosidad: } IP = ( i \text{ inundación} + i \text{ erosión} ) / 2$$

$$\text{Índice de Vulnerabilidad: } IV = ( i \text{ demográfico} + i \text{ condiciones de vida} + i \text{ trabajo y consumo} ) / 3$$

donde *i* corresponde al valor del indicador. Para obtener el valor del índice se establecieron intervalos equivalentes asignados a una escala del 1 al 5, yendo de muy baja a muy alta peligrosidad o vulnerabilidad. Siendo: 1: muy baja peligrosidad o vulnerabilidad, 2: baja peligrosidad o vulnerabilidad, 3: moderada peligrosidad o vulnerabilidad, 4: alta peligrosidad o vulnerabilidad y 5: muy alta peligrosidad o vulnerabilidad.

La Tabla 3.1 indica los rangos de magnitud de las variables consideradas para la evaluación de la peligrosidad asociada a los eventos de tormentas, representados por el nivel que puede alcanzar el agua de agua por debajo de la cota máxima del perfil de playa (índice de inundación), y el retroceso de la playa debido a la modificación del perfil (índice de erosión).

**Tabla 3.1.** Categorización de las componentes del índice de peligrosidad

Peligrosidad Categoría	Índice de inundación		Índice de erosión	
	Valor	Altura de agua debajo de Cota max (m)	Valor	Retroceso de línea de costa (m)
Muy bajo	1	> 2	1	0 – 2
Bajo	2	2 - 1	2	2 – 5
Moderado	3	1 – 0.5	3	5 – 10
Alto	4	0.5 – 0	4	10 – 20
Muy Alto	5	< 0	5	> 20

Por otra parte, la Tabla 3.2 muestra el valor de las componentes y el índice promedio de vulnerabilidad correspondiente a las zonas de estudio definidos en el trabajo de Merlotto et al. (2017).

**Tabla 3.2.** Clasificación de las componentes y del índice de Vulnerabilidad (Merlotto et al., 2017)

Localidad / Sector	Componente de vulnerabilidad			Índice de Vulnerabilidad IV
	Dimensión demográfica	Dimensión condiciones de vida	Dimensión trabajo y consumo	
Bahía de los vientos	1	1	3	2
Mar del Plata	4	2	4	3
Las Toninas	1	2	4	2

En base a estas clasificaciones, finalmente, el índice de riesgo costero se computa como:

$$\text{Índice de Riesgo: } IR = \text{Índice de peligrosidad (IP)} \times \text{Índice de vulnerabilidad (IV)}$$

Siendo la escala de riesgo costero: 0-5: muy bajo riesgo, 5-10: bajo riesgo, 10-15: riesgo moderado, 15-20: riesgo alto y 20-25: riesgo muy alto.

### 3.3 Análisis de zonas pilotos

La aplicación de la metodología presentada en el apartado anterior permitió desarrollar una evaluación del riesgo costero en las zonas de Bahía de los vientos, Mar del Plata y Las Toninas frente a la amenaza caracterizada por la acción de los temporales (ondas de tormenta) que azotan la costa marítima de la provincia de Buenos Aires.

#### 3.3.1 Bahía de los Vientos

La caracterización de las amenazas que permiten cuantificar la peligrosidad a la que se encuentra expuesto el tramo costero en evaluación se realiza mediante los parámetros de oleaje y niveles extremos correspondientes a la boya virtual BV26 de la Base de Datos desarrollada para esta Asistencia Técnica. Los diferentes escenarios de análisis seleccionados para la evaluación se encuentran definidos a partir de valores asociados a distintos períodos de retorno, tal como se indica en la Tabla 3.3.

La misma Tabla 3.3 incluye valores de altura de ola para una profundidad costera de  $d=8m$  y ola a pie de duna, necesarios para la implementación de las expresiones de cálculo que permiten evaluar los impactos de la peligrosidad. Estos valores fueron obtenidos mediante la aplicación del módulo Litdrift, el cual permitió caracterizar la propagación del oleaje a lo largo del perfil de playa en estudio.

Utilizando un perfil de playa relevado en la zona de Bahía de los vientos, se aplicaron las expresiones de cálculo presentadas en SimpleCoast para estimar condiciones de erosión e inundación de la playa asociados a los eventos de tormenta caracterizados por el oleaje y niveles extremos presentados en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Identificación de la peligrosidad

Tr (años)	Oleaje Boya Virtual			Nivel Boya virtual	Ola costera (d=-8m)	Ola a pie de duna
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	N (m)	Hs (m)	Hs (m)
<b>2</b>	5.72	11.9	179	1.61	3.64	1.29
<b>5</b>	6.60	12.9	179	1.77	3.81	1.42
<b>10</b>	7.18	13.4	179	1.86	3.91	1.50
<b>20</b>	7.74	13.9	179	1.96	4.00	1.58
<b>50</b>	8.46	14.4	179	2.02	4.09	1.66
<b>100</b>	9.00	14.7	179	2.08	4.16	1.72

Los resultados son expresados en términos de erosión en función de la duración de la tormenta, para lo cual se adoptaron valores de 1, 5, 10, 15 y 20 horas, respectivamente; y cota de inundación máxima asociada a cada evento. Dichos resultados se presentan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Resultados de la estimación de los impactos sobre el área costera

Escenario Tr (años)	Erosión: retroceso de la playa R (m)					Inundación de playa	
	Duración 1 h	Duración 5 hs	Duración 10 hs	Duración 15 hs	Duración 20 hs	Nivel max N (m)	Dist cota max(m)
<b>2</b>	4.1	9.2	10.5	11.4	12.1	4.21	2.79
<b>5</b>	5.0	11.1	12.8	13.9	14.7	4.65	2.35
<b>10</b>	5.5	12.4	14.2	15.4	16.3	4.91	2.09
<b>20</b>	6.1	13.7	15.7	17.0	18.0	5.16	1.84
<b>50</b>	6.7	14.9	17.1	18.6	19.7	5.39	1.61
<b>100</b>	7.1	15.9	18.3	19.8	21.0	5.57	1.43

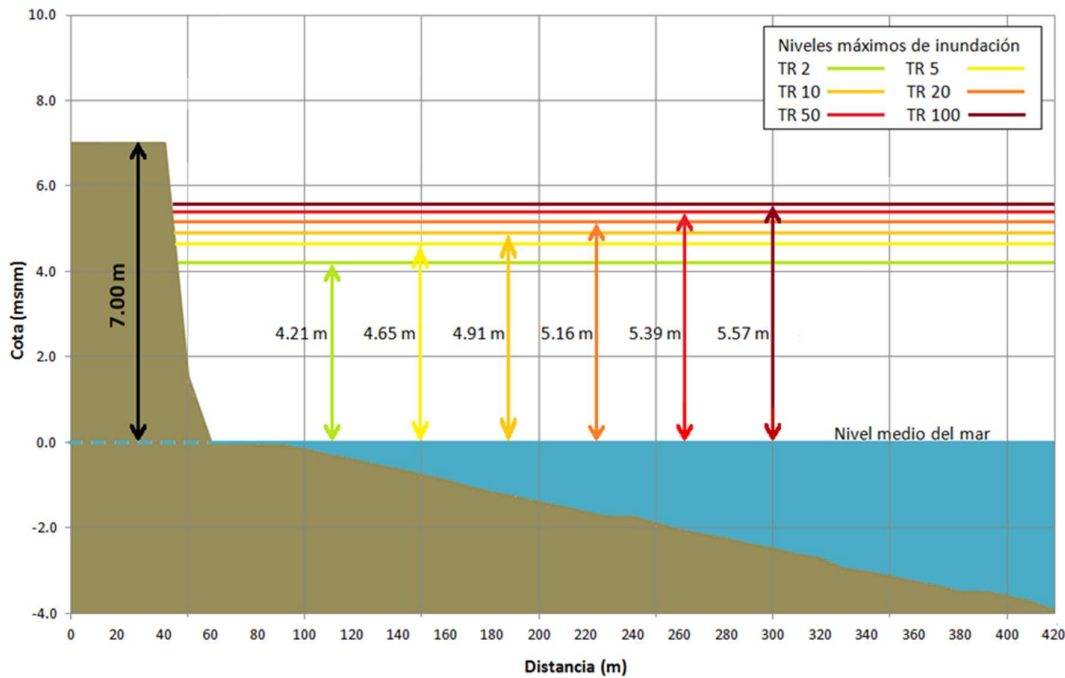
Los niveles de erosión estimados representan distancias de retroceso de la playa o, es decir, extensión de playa de arena emergida que se pierde por acción de los temporales y se traslada sobre el perfil a un sector sumergido del mismo. Esto no indica un retroceso del acantilado de material consolidado que se encuentra detrás de la playa.

Estos resultados evidencian valores de retroceso crecientes con la magnitud y la duración de los temporales, variando entre los 4 m y los 21 m para el conjunto de escenarios analizados.

La Figura 3.18 muestra la altura máxima del nivel de inundación alcanzado para los diferentes períodos de retorno sobre el perfil de playa de Bahía de los Vientos, el cual incluye la marea total (astronómica + meteorológica) más las superposición de los efectos de set-up y run-up. En la

misma figura se indica además la cota máxima del acantilado ubicado detrás de la playa, con lo cual es posible calcular la altura por debajo de esa cota, indicada en la Tabla 3.4.

A partir de este esquema resulta evidente que, si bien los niveles máximos de inundación resultan muy elevados respecto del nivel medio del mar, las posibilidades de sobrepaso son nulas debido a la elevada cota del acantilado.



**Figura 3.18** Niveles de inundación de la playa para el perfil de Bahía de los Vientos

Para evaluar los niveles de erosión y cuantificar posteriormente los índices de riesgo se decidió tomar como referencia una duración de tormenta de 10 horas.

De acuerdo a los rangos definidos en la Tabla 3.1 para la valoración de los índices de erosión e inundación, dichos impactos resultan caracterizados como alto (I Erosión=4) y muy bajo a moderado (I Inundación=1-3), respectivamente. Para el caso de Bahía de los Vientos esta clasificación se mantiene constante para todos los períodos de retorno analizados, tal como se indica en la Tabla 3.5.

De esta manera, se obtiene un índice de peligrosidad que varía entre  $IP=2.5-3,5$  (moderado/alto), el cual combinado con el índice de vulnerabilidad  $IV=2$  (bajo) señalado por Merlotto et al. (2017) (Tabla 3.2), dan como resultado una valoración de riesgo costero bajo ( $IR=5-7$ ) para la zona de estudio.

En función de los escenarios analizados podría obtenerse un índice de riesgo levemente superior sólo si se considerara una duración de tormenta de 20 horas para un período de retorno de 100 años. En ese caso se tendría un I Erosión = 5 y, en consecuencia, un valor de IR=8, el cual seguiría siendo clasificado como Riesgo bajo.

**Tabla 3.5.** Cuantificación del riesgo costero

Tr (años)	Peligrosidad			Vulnerabilidad	Riesgo	
	I Erosion	I Inund	Valor IP	Valor IV	Valor IR	Clasificación
2	4	1	2.5	2	5	Bajo
5	4	1	2.5	2	5	Bajo
10	4	1	2.5	2	5	Bajo
20	4	2	3	2	6	Bajo
50	4	2	3	2	6	Bajo
100	4	3	3.5	2	7	Bajo

### 3.3.2 Mar del Plata

La caracterización de las amenazas que permiten cuantificar la peligrosidad se realiza mediante los parámetros de oleaje y niveles extremos correspondientes a la boya virtual BV37 de la Base de Datos desarrollada para esta Asistencia Técnica. Los diferentes escenarios de análisis seleccionados para la evaluación se encuentran indicados en la Tabla 3.6.

La misma Tabla 3.6 incluye valores de altura de ola para una profundidad costera de  $d=-8m$  y ola a pie de duna, necesarios para la implementación de las expresiones de cálculo que permiten evaluar los impactos de la peligrosidad.

**Tabla 3.6.** Identificación de la peligrosidad

Tr (años)	Oleaje Boya Virtual			Nivel Boya virtual	Ola costera ( $d=-8m$ )	Ola a pie de duna
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	N (m)	Hs (m)	Hs (m)
2	5.31	12.3	168	1.58	4.56	1.10
5	6.20	13.3	168	1.73	4.94	1.21
10	6.79	13.7	168	1.81	5.13	1.27
20	7.36	14.0	168	1.90	5.30	1.34
50	8.09	14.3	168	1.96	5.50	1.40
100	8.64	14.5	168	2.02	5.57	1.45

Utilizando un perfil de playa relevado en la zona de Playa Grande (Mar del Plata) se estimaron los impactos de erosión e inundación de la playa, asociados a los eventos de tormenta caracterizados por el oleaje y niveles extremos presentados en la Tabla 3.6.

Los resultados son expresados en términos de erosión en función de la duración de la tormenta, para lo cual se adoptaron valores de 1, 5, 10, 15 y 20 horas, respectivamente; y cota de inundación máxima asociada a cada evento. Dichos resultados se presentan en la Tabla 3.7.

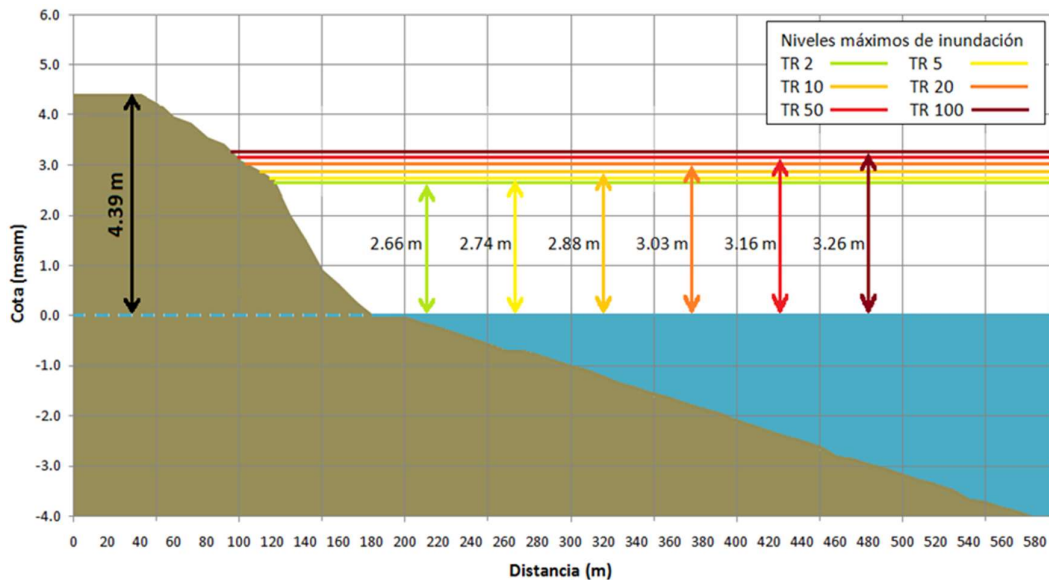
**Tabla 3.7.** Resultados de la estimación de los impactos sobre el área costera

Escenario Tr (años)	Erosión: retroceso de la playa R (m)					Inundación de playa	
	Duración 1 h	Duración 5 hs	Duración 10 hs	Duración 15 hs	Duración 20 hs	Nivel max N (m)	Dist cota max(m)
2	3.8	8.6	9.9	10.7	11.3	2.66	1.73
5	5.0	11.3	12.9	14.0	14.9	2.74	1.65
10	5.9	13.1	15.0	16.3	17.3	2.88	1.51
20	6.9	15.4	17.7	19.1	20.3	3.03	1.36
50	7.9	17.6	20.2	21.9	23.2	3.16	1.23
100	8.8	19.8	22.7	24.6	26.1	3.26	1.13

Estos resultados evidencian valores de retroceso crecientes con la magnitud y la duración de los temporales, variando entre los 3.8 m y los 26.1 m para el conjunto de escenarios analizados.

La Figura 3.19 muestra la altura máxima del nivel de inundación alcanzado para los diferentes períodos de retorno sobre el perfil Playa Grande. En la misma figura se indica además la cota máxima de dicho perfil, con lo cual es posible calcular la altura por debajo de esa cota, indicada en la Tabla 3.7

Este esquema señala que, si bien los niveles máximos de inundación resultan muy elevados respecto del nivel medio del mar, las posibilidades de sobrepaso son nulas debido a la elevada cota del perfil.



**Figura 3.19.** Niveles de inundación de la playa para el perfil de Playa Grande (Mar del Plata)

Tomando como referencia una duración de tormenta de 10 horas y los rangos definidos en la Tabla 3.1 para la valoración de los índices de erosión e inundación, se estimaron los impactos sobre el perfil de playa. Dichos impactos resultan crecientes con el período de retorno considerado, tal como se indica en la Tabla 3.8.

En efecto, los valores de I Erosión se encuentran entre 3 (moderado) y 5 (muy alto), mientras que los valores de I Inundación varían entre 2 (bajo) y 3 (moderado), para períodos de retorno variando entre 2 y 100 años, respectivamente.

**Tabla 3.8.** Cuantificación del riesgo costero

Tr (años)	Peligrosidad			Vulnerabilidad	Riesgo	
	I Erosion	I Inund	Valor IP	Valor IV	Valor IR	Clasificación
2	3	2	2.5	3	7.5	Bajo
5	4	2	3	3	9	Bajo
10	4	2	3	3	9	Bajo
20	4	3	3.5	3	10.5	Moderado
50	5	3	4	3	12	Moderado
100	5	3	4	3	12	Moderado

Estos valores dan como resultado una peligrosidad que aumenta con el período de retorno, desde IP=2.5 para TR=2 años, hasta IP=4 para TR=100 años.

La combinación de los valores de peligrosidad con el índice de vulnerabilidad IV=3 (moderado) señalado por Merlotto et al. (2017) para esta zona, dan en consecuencia una valoración de riesgo costero bajo (IR=5 a 9) para períodos de retorno de hasta 10 años y un riesgo costero moderado (IR=10.5 a 12) para períodos de retorno superiores (TR=20, 50 y 100 años).

### 3.3.3 Las Toninas

La caracterización de las amenazas que permiten cuantificar la peligrosidad se realiza mediante los parámetros de oleaje y niveles extremos correspondientes a la boya virtual BV53 de la Base de Datos desarrollada para esta Asistencia Técnica. Los diferentes escenarios de análisis seleccionados para la evaluación se encuentran indicados en la Tabla 3.9.

La misma Tabla 3.9 incluye valores de altura de ola para una profundidad costera de  $d=-8\text{m}$  y ola a pie de duna, necesarios para la implementación de las expresiones de cálculo que permiten evaluar los impactos de la peligrosidad.

Utilizando un perfil de playa relevado en la zona de Las Toninas se estimaron los impactos de erosión e inundación de la playa, asociados a los eventos de tormenta caracterizados por el oleaje y niveles extremos presentados en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9.** Identificación de la peligrosidad

Tr (años)	Oleaje Boya Virtual			Nivel Boya virtual	Ola costera (d=-8m)	Ola a pie de duna
	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	N (m)	Hs (m)	Hs (m)
<b>2</b>	3.24	9.0	118	1.62	2.71	1.09
<b>5</b>	3.67	10.3	118	1.73	2.85	1.16
<b>10</b>	3.92	11.0	118	1.79	2.90	1.21
<b>20</b>	4.16	11.7	118	1.85	2.94	1.24
<b>50</b>	4.43	12.4	118	1.89	2.97	1.28
<b>100</b>	4.63	12.8	118	1.92	2.99	1.30

Los resultados son expresados en términos de erosión en función de la duración de la tormenta, para lo cual se adoptaron valores de 1, 5, 10, 15 y 20 horas, respectivamente; y cota de inundación máxima asociada a cada evento. Dichos resultados se presentan en la Tabla 3.10.

**Tabla 3.10.** Resultados de la estimación de los impactos sobre el área costera

Escenario Tr (años)	Erosión: retroceso de la playa R (m)					Inundación de playa	
	Duración 1 h	Duración 5 hs	Duración 10 hs	Duración 15 hs	Duración 20 hs	Nivel max N (m)	Dist cota max(m)
<b>2</b>	5.1	11.4	13.1	14.2	15.1	2.76	0.90
<b>5</b>	6.7	15.0	17.3	18.7	19.8	3.03	0.63
<b>10</b>	7.8	17.4	20.0	21.7	22.9	3.18	0.48
<b>20</b>	8.9	19.9	22.8	24.8	26.2	3.32	0.34
<b>50</b>	9.9	22.2	25.6	27.7	29.4	3.44	0.22
<b>100</b>	10.8	24.3	27.9	30.2	32.0	3.54	0.12

Los resultados muestran valores de retroceso crecientes con la magnitud y la duración de los temporales, variando entre los 5.0 m y los 32.0 m para el conjunto de escenarios analizados. Esto da cuenta de una alta sensibilidad en la respuesta del perfil de playa frente al incremento de la amenaza.

La Figura 3.20 muestra la altura máxima del nivel de inundación alcanzado para los diferentes períodos de retorno sobre el perfil de Las Toninas. En la misma figura se indica además la cota máxima de dicho perfil, con lo cual es posible calcular la altura por debajo de esa cota, indicada en la.

Este esquema muestra niveles de agua muy próximos a la cota máxima del perfil para los escenarios con períodos de retorno más elevados, siendo la distancia mínima de solo 0.12 m para TR=100 años.

Bajo estas condiciones son esperables eventos de sobrepaso moderados para los escenarios más extremos, pudiéndose estimar volúmenes de 1.1 litros/seg, 2.8 litros/seg y 5.0 litros/seg, por metro lineal de playa para períodos de retorno de TR= 20, 50 y 100 años, respectivamente.

Dicha situación señala la posibilidad de peligrosidad mayor frente a un escenario de elevación del nivel medio del mar y un eventual incremento de la marea meteorológica y el oleaje.

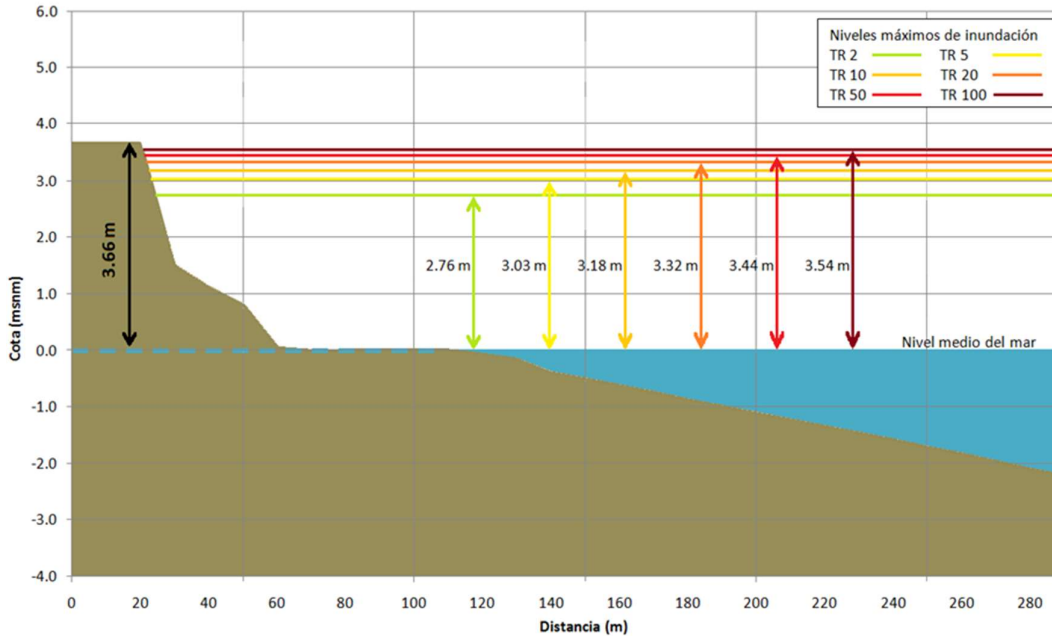


Figura 3.20. Niveles de inundación de la playa para el perfil de Las Toninas

Tomando como referencia una duración de tormenta de 10 horas y los rangos definidos en la Tabla 3.1 para la valoración de los índices de erosión e inundación, se estimaron los impactos sobre el perfil de playa. Dichos impactos resultan crecientes con el período de retorno considerado, tal como se indica en la Tabla 3.11.

En efecto, los valores de I Erosión varían entre 4 (alto) y 5 (muy alto), mientras que los valores de I Inundación varían entre 3 (moderado) y 4 (alto), para períodos de retorno variando entre 2 y 100 años, respectivamente.

Tabla 3.11. Cuantificación del riesgo costero

Tr (años)	Peligrosidad			Vulnerabilidad	Riesgo	
	I Erosion	I Inund	Valor IP	Valor IV	Valor IR	Clasificación
2	4	3	3.5	2	7	Bajo
5	4	3	3.5	2	7	Bajo
10	5	4	4.5	2	9	Bajo
20	5	4	4.5	2	9	Bajo
50	5	4	4.5	2	9	Bajo
100	5	4	4.5	2	9	Bajo

Estos valores dan como resultado una peligrosidad que, de acuerdo con el período de retorno considerado, puede variar entre niveles de moderado/alto (IP=3.5 para TR=2 años), hasta alto/muy alto (IP=4.5 para TR=100 años).

De todos modos, combinando estos niveles de peligrosidad con el índice de vulnerabilidad IV=2 (bajo) señalado por Merlotto et al. (2017) para esta zona, se obtiene en consecuencia una valoración de riesgo costero bajo (IR=7 a 9) para todos los escenarios de análisis.

Cabe señalar la importancia de estos resultados, dado que un incremento futuro en los niveles de vulnerabilidad de esta zona costera, que podría estar asociado por ejemplo a un crecimiento urbano sin la planificación adecuada, podría derivar cómo consecuencia en una elevación considerable de los índices de riesgo.

## 4 MODELACIÓN NUMÉRICA REGIONAL Y LOCAL DE LA HIDRODINÁMICA, DEL OLEAJE Y LA MORFOLOGÍA

### 4.1 Introducción

En este capítulo se detalla la implementación, calibración/validación de los diferentes modelos numéricos desarrollados para poder estudiar el impacto de diferentes intervenciones, tal como se verá en el capítulo siguiente.

En primer lugar se describe brevemente el sistema de modelación utilizado (MIKE 21). Luego se detallan los modelos regionales implementados (hidrodinámico y de oleaje) y finalmente se presentan los modelos locales, con los cuales se analizarán diferentes obras en las zonas piloto descriptas en el capítulo anterior.

### 4.2 Sistema MIKE 21

Durante 2013, el Departamento de Costa Marítima de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH) adquirió un conjunto de licencias, actualmente vigentes, del sistema de modelación *MIKE 21* con el objetivo de acompañar la gestión costera con herramientas computacionales. Su utilización fue acotada por lo que se requiere que en el marco de esta Asistencia Técnica estas herramientas sean puestas en valor. El sistema de modelación *MIKE 21* de la empresa Danish Hydraulic Institute (DHI, Dinamarca) está compuesto por un módulo de simulación de flujo o modelo hidrodinámico (*MIKE 21 HD*), un modelo espectral de olas (*MIKE 21 SW*) y módulo de transporte de sedimentos (*MIKE 21 ST*), acoplados para el seguimiento de la evolución morfológica.

Este sistema integrado permite combinar los procesos físicos de las olas, las corrientes y el transporte de sedimentos en un solo modelo morfológico. De esta manera, el modelo puede ser usado para el estudio de la evolución morfológica de zonas costeras debido al impacto de obras de ingeniería, tales como rompeolas sumergidos o emergidos, espigones, rellenos de playas, infraestructura portuaria, entre otros.

En el marco de esta Asistencia Técnica se comenzó a modelar con estas herramientas todo el tramo costero marino que corresponde a la provincia de Buenos Aires localizado sobre la Plataforma Continental. En esta región se tienen profundidades de hasta 100 m por lo que se las considera pequeñas en relación a la longitud de onda de la marea. Por lo tanto, a esa escala no resulta necesario resolver la distribución vertical de los parámetros, lo que significa que es suficiente con utilizar un análisis bidimensional en el plano horizontal para representar la dinámica del sistema. El análisis bidimensional conduce al modelo matemático planteado por las ecuaciones para aguas poco profundas (shallow water equations), que deben ser resueltas numéricamente.

#### 4.2.1 Módulo hidrodinámico MIKE 21 HD

El módulo hidrodinámico calcula las variaciones del nivel del agua y flujo teniendo en cuenta las variaciones de densidad, batimetría y forzamientos externos. Proporciona la base para cálculos realizados por otros módulos, pero también se puede utilizar solo. El modelo está basado en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes con la aproximación de Reynolds (descomposición de las variables de flujo en su valor medio más la fluctuación). Asimismo, se asume la hipótesis Boussinesq y presión hidrostática (DHI, 2012a). Este sistema de ecuaciones se conoce como RANS (Reynolds Average Navier-Stokes).

#### 4.2.2 Modelo espectral de olas MIKE 21 SW

El modelo espectral del oleaje simula el crecimiento, decaimiento y transformación de olas locales generadas por viento y olas oceánicas (DHI, 2012b).

Debido a que utiliza una malla de cálculo en elementos finitos, irregular y flexible, *MIKE 21 SW* es particularmente recomendable para la modelación de olas a escala regional y local simultáneamente; utilizando una malla de resolución espacial gruesa para la representación regional y una malla de mayor resolución para representar el ambiente cercano a la costa y a las estructuras a modelar.

Las olas generadas por viento están representadas mediante el espectro de densidad de acción de ola  $N(\sigma, \beta)$ , donde  $\sigma = 2\pi f$  es la frecuencia relativa y  $\beta$  es la dirección de propagación del oleaje. La densidad de acción del oleaje está relacionada con la densidad de energía  $E(\sigma, \beta)$ , la cual representa energía cinética más potencial por unidad de superficie.

Asimismo, dado que este modelo puede acoplarse con otros módulos de *MIKE 21* hace factible el acoplamiento dinámico de cálculo de flujo y olas, y la evolución completa de cambios en el nivel de fondo en cálculos de flujo y olas.

#### 4.2.3 Módulo de transporte de sedimentos MIKE 21 ST

El módulo no cohesivo *MIKE 21 ST* puede calcular la tasa de transporte de sedimentos y los cambios en la elevación del lecho marino debido a la acción combinada de olas y corrientes.

Dichas tasas se calculan mediante la interpolación lineal de una tabla de transporte de sedimentos elaborada previamente mediante una herramienta de *MIKE 21*. El núcleo de este programa es un modelo de transporte de sedimentos cuasi-3D (*STP Q3D*).

La esencia del modelo cuasi-3D es la solución del equilibrio de fuerzas en toda la columna de agua, para lo cual la velocidad promedio del flujo es determinada por integración. La variación espacial y temporal de la tensión de corte, velocidad de flujo y concentración de sedimentos se resuelve utilizando el modelo de capa límite para olas y corriente de Fredsøe (1984). La simulación mediante *MIKE21 ST* permite evaluar la tasa de cambios de nivel del fondo, así como la tasa de transporte, permitiendo identificar áreas potenciales de erosión o sedimentación.

#### 4.2.4 Modelo morfológico acoplado

Para determinar los cambios morfológicos de la superficie del lecho dentro de un área modelada puede utilizarse el Modelo Acoplado, en el cual intervienen los tres módulos mencionados anteriormente (hidrodinámico, olas, y transporte de sedimentos). En este sistema se tienen en cuenta el acoplamiento olas/corrientes, los efectos del set-up de las olas, y las corrientes litorales que se incorporan a través de las tensiones radiantes.

Los parámetros del oleaje calculados con *MIKE 21 SW*, así como las corrientes y niveles calculados con *MIKE 21 HD* son transferidos internamente al modelo *MIKE 21 ST* para calcular las tasas de transporte de sedimentos. Durante las simulaciones de *MIKE 21 ST*, las tasas de transporte de sedimentos asociados a los efectos de corrientes inducidas por olas y mareas surgen de la interpolación de una tabla de sedimento pre-computada, la cual se realiza previamente con herramientas del sistema de modelación *MIKE 21* (DHI, 2012c). Esta tabla de transporte de sedimentos permite la determinación de un amplio rango de combinaciones de olas/corrientes/sedimentos, de acuerdo al sitio de estudio. Asimismo, la tabla de transporte de sedimentos permite la selección de diferentes formulaciones para determinar las características del oleaje y transporte de sedimentos. El procedimiento de cálculo se sintetiza en el esquema de la Figura 4.1.

Los cálculos de las tasas de transporte de sedimentos se realizan para un determinado paso de tiempo, el cual coincide con un paso de tiempo global del modelo acoplado y que es definido por el usuario. Por su parte, cada módulo de cálculo utiliza pasos de tiempo internos, que se sincronizan con dicho paso global. Estos intervalos de tiempo para los módulos hidrodinámico y espectral de olas son dinámicos y condicionados por los criterios de estabilidad, como por ejemplo condición CFL inferior a 1 para el módulo hidrodinámico debido a su esquema numérico explícito (DHI, 2012b). Finalmente, entre cada llamada al modelo *MIKE 21 ST*, el nivel del lecho en el modelo digital de elevación es actualizado por la extrapolación de las tasas de cambios relativos del paso anterior.

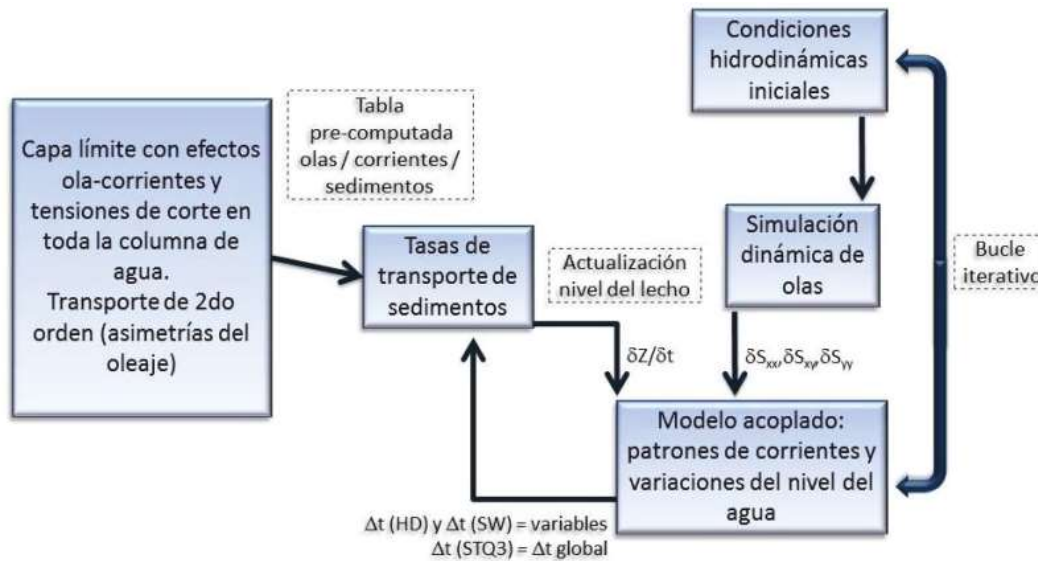


Figura 4.1. Esquema de cálculo para el modelo morfológico acoplado (Cáceres 2016).

### 4.3 Modelación Hidrodinámica Regional

#### 4.3.1 Dominio

El dominio del modelo se desarrolla longitudinalmente a lo largo de la costa bonaerense, abarcando desde la Península de Valdés (Provincia de Chubut) unos 180 km al Sur de la Bahía de San Blas (sur de la provincia de Buenos Aires) hasta la localidad costera de La Paloma en Uruguay (aproximadamente a unos 300 km al Noreste de San Clemente del Tuyú), incluyendo los 600 km de costa a estudiar que van desde Pehuen Co hasta San Clemente del Tuyú. La franja costera de este dominio se extiende hasta aproximadamente la isobata de 100 m dentro de la Plataforma Continental (quedando el dominio con un ancho mínimo de 180 km aproximadamente). Además, sólo incluye la porción exterior de Río de la Plata (Figura 4.2). Esta extensión se consideró necesaria para evitar que la imposición de condiciones de contorno en bordes artificiales (en contornos matemáticos) y/o en bordes cercanos a las zonas de interés produzcan perturbaciones significativas en los resultados.

Este dominio presenta las mismas dimensiones y alcance que el modelo regional utilizado para el reanálisis histórico (hindcast) de las condiciones hidrodinámicas de esta costa presentado en el Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica (INA, 2019c).

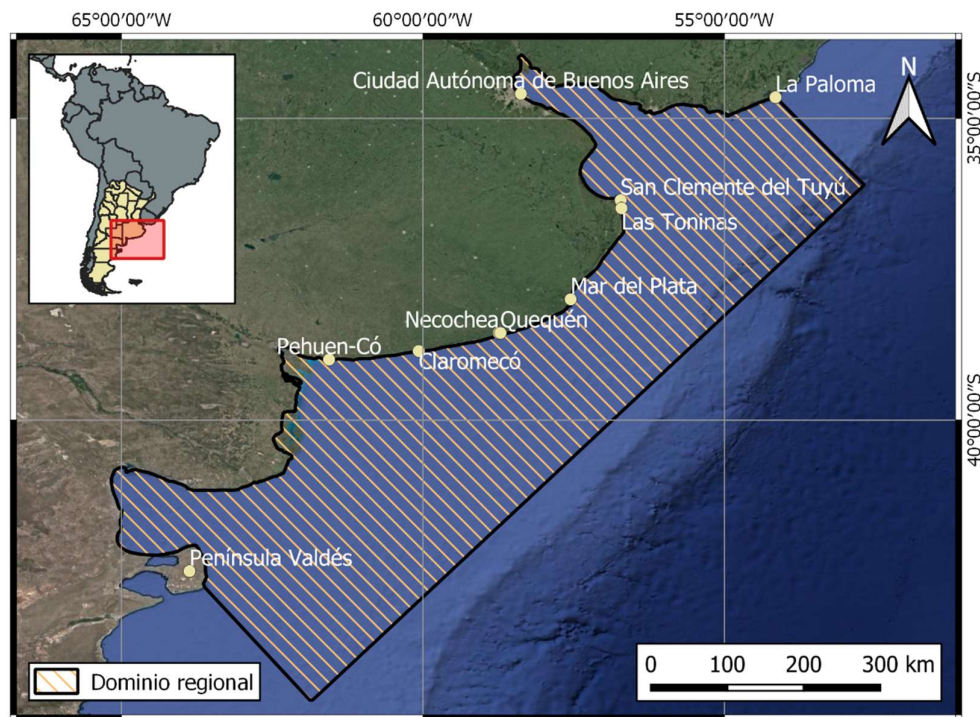


Figura 4.2. Dominio del Modelo Hidrodinámico Regional

#### 4.3.2 Discretización

Se construyó una grilla de discretización constituida por elementos triangulares para cubrir todo el dominio del modelo. Los criterios utilizados para la construcción de la grilla fueron los siguientes:

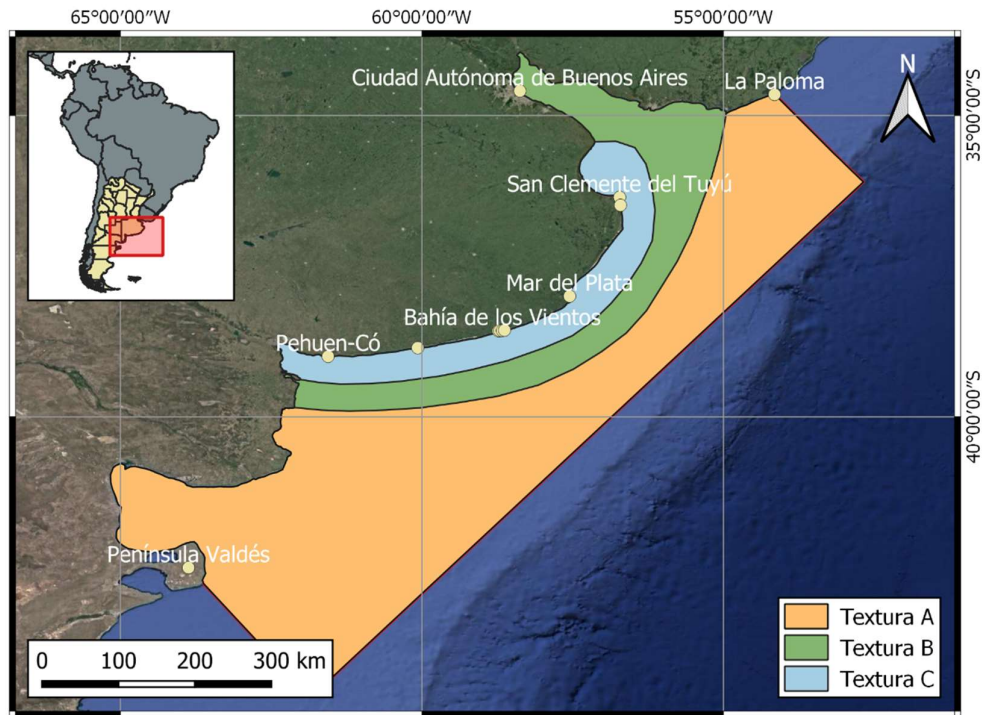
- Texturas lo suficientemente gruesas como para mantener tiempos de corrida aceptables, pero lo suficientemente finas como para obtener precisiones aceptables.
- Triángulos lo más equiláteros posibles, evitando ángulos pronunciados.
- Bordes suaves y rectos.
- Área máxima de los elementos: 110 km<sup>2</sup>
- Disminución del área de los elementos al acercarse a la costa aplicando distintas texturas.
- Tres bordes abiertos y un borde cerrado.
- Bordes abiertos perpendiculares a la costa en caso de intersectar con ella.

Específicamente, se definieron 3 texturas, que se describen en la Tabla 4.1, donde se indica el nombre, la extensión media del paso de malla y el área máxima del elemento.

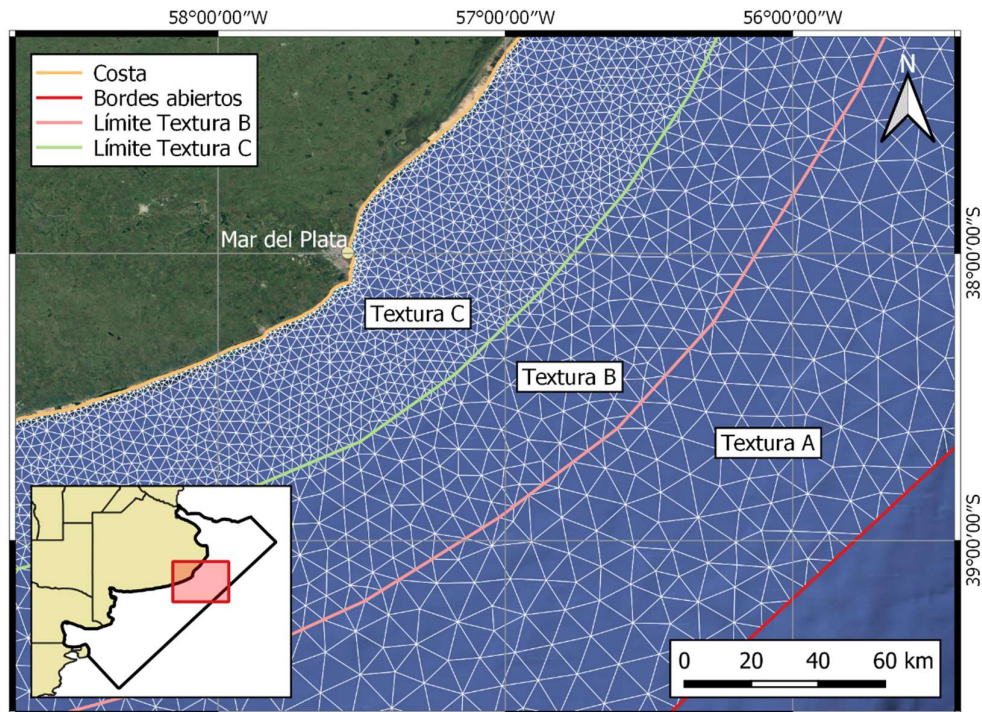
Tal como se muestra en la Figura 4.3, la textura A se aplica en la zona de menor interés. Para las zonas donde se requiere mayor poder de resolución, la costa bonaerense, se utiliza la textura C, siendo la textura B una transición gradual entre las otras dos.

**Tabla 4.1.** Caracterización de la grilla de cálculo

Textura	A	B	C
Paso medio (m)	10400	7000	4000
Área máxima (km <sup>2</sup> )	265900	72000	45100
Cantidad de elementos	6648	3678	96670
Rango de profundidades (m)	0 - 1600	0 - 100	0 - 80



a) Zonificación de las diferentes texturas de la grilla de cálculo.



b) Detalle de las diferentes texturas.  
**Figura 4.3.** Grilla de cálculo.

### 4.3.3 Batimetría

Para la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo del dominio regional se dispusieron como base las siguientes cartas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) con sus respectivas altitudes digitalizadas (Tabla 4.2 y Figura 4.4):

**Tabla 4.2.** Cartas náuticas utilizadas

Código	Nombre	Escala
H1	Acceso al Río de la Plata	1:1.500.000
H-2	El Rincón. Golfos San Matías y Nuevo	1:1.500.000
H-50	Mar Argentino. De Río de la Plata al Paralelo 57° Sur	1:3.500.000
H-101	De Cabo Polonio a Cabo Corrientes.	1:500.000
H-113	Río de la Plata Exterior	1:250.000
H-114	De Faro San Antonio a Faro Miramar	1:250.000
H-115	Bahía Samborombón	1:150.000
H-210	De Faro Punta Mogotes a Faro Claromecó	1:250.000
H-211	El Rincón	1:300.000
H-211A	El Rincón	1:300.000
H-250	Rada Mar del Plata	1:50.000
H-251	Puerto Mar del Plata	1:50.000

Estas cartas representan diferentes escalas de resolución, de modo que incluyen distintas densidades de puntos (Figura 4.5). Adicionalmente se agregó información batimétrica del puerto de Quequén, su canal de acceso y las escolleras, actualizada hasta el 2015 (Figura 4.6). En total, se digitalizaron 144.389 puntos, de los cuales 100.017 fueron utilizados para generar el Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo del dominio regional (Figura 4.7).

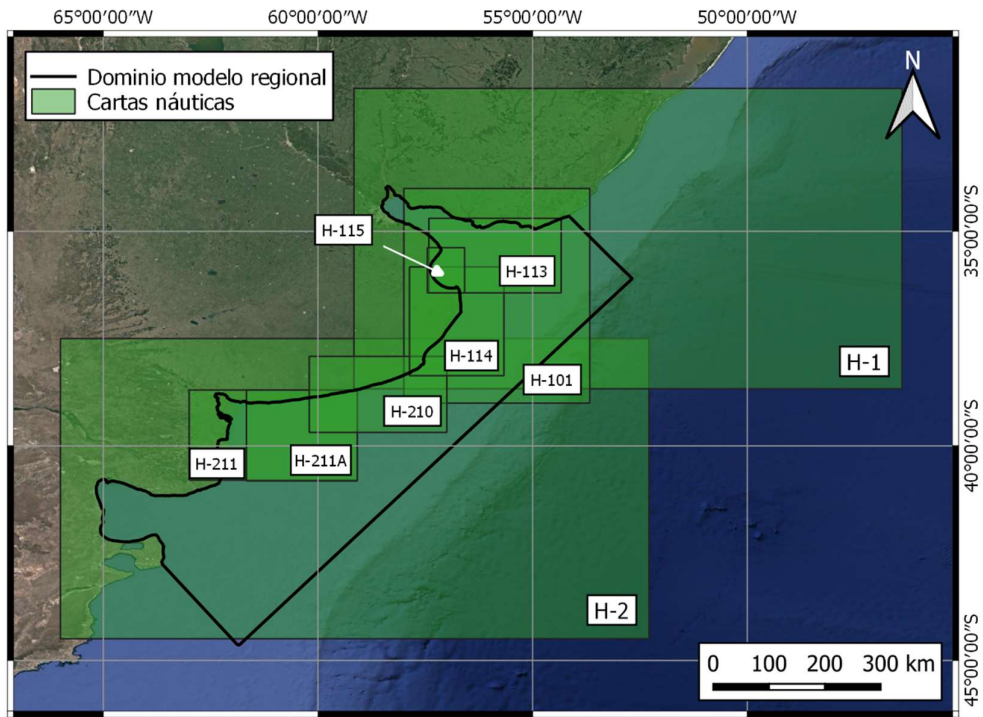


Figura 4.4. Cartas Náuticas utilizadas.

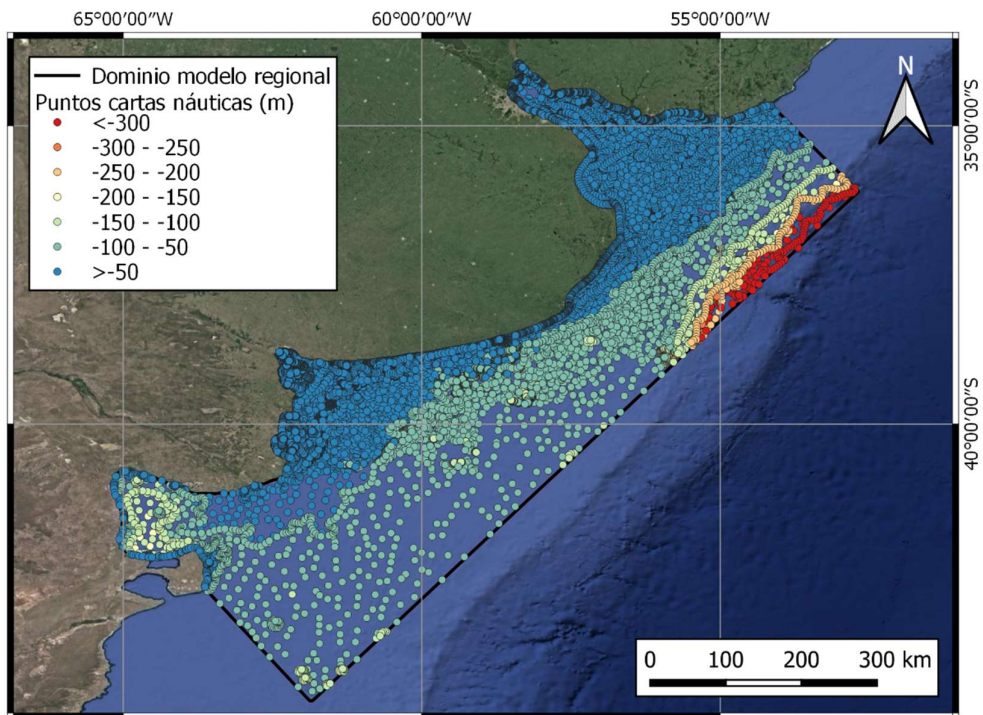


Figura 4.5. Puntos digitalizados de las cartas náuticas del SHN

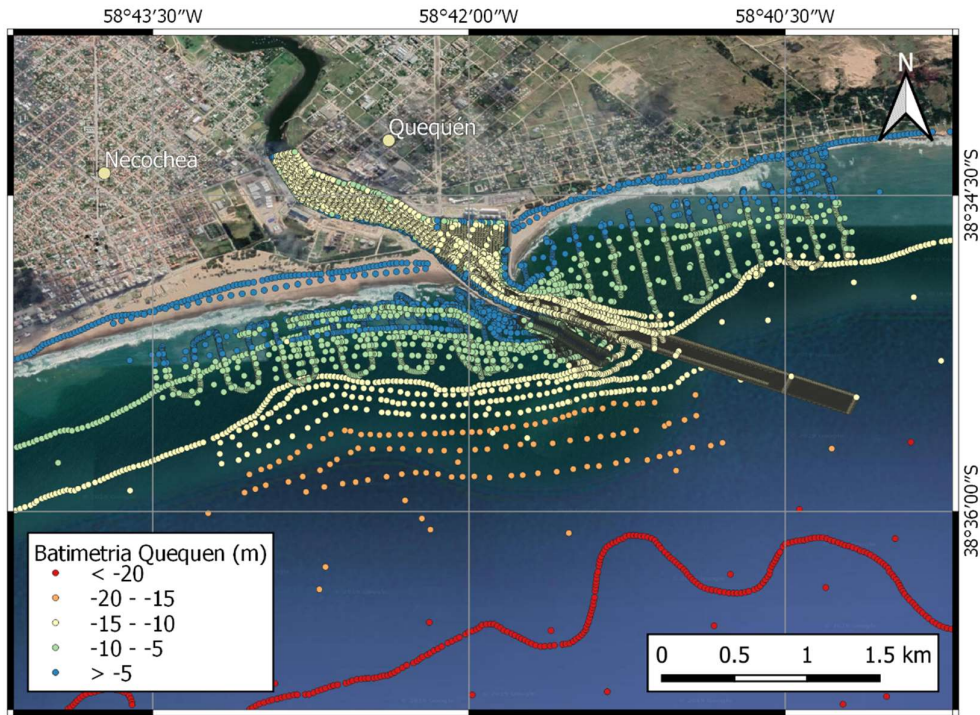


Figura 4.6. Datos batimétricos relevados en la zona del Puerto de Quequén.

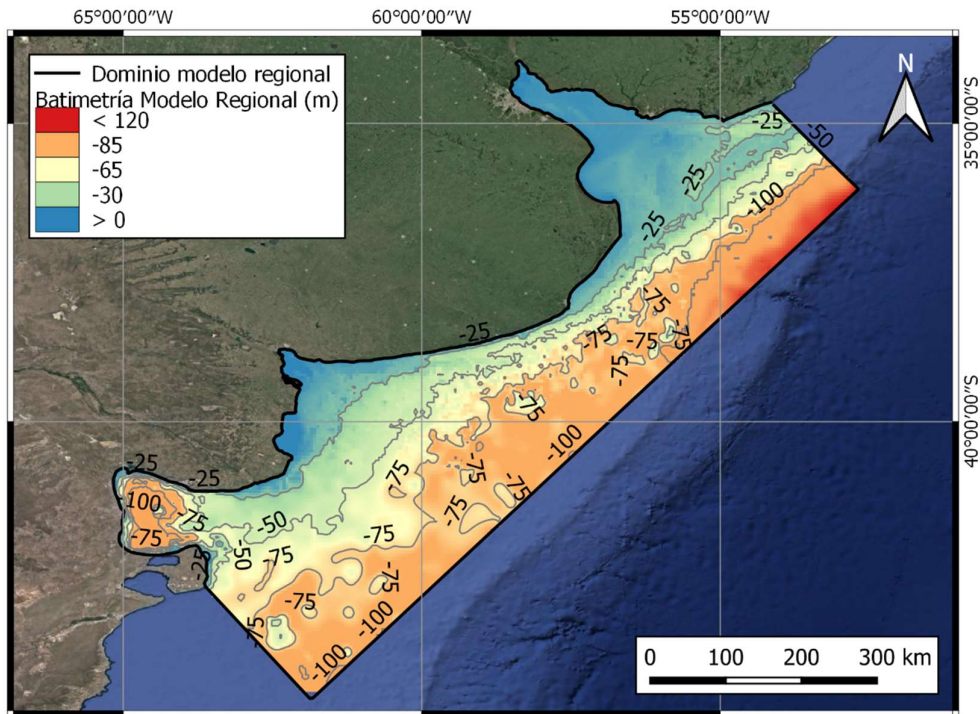


Figura 4.7. Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo del dominio regional

#### 4.3.4 Marea Oceánica

Como forzante hidrodinámico se optó por representar la onda de marea en los bordes abiertos del modelo. Para ello se utilizó el *ASTide*, modelo regional descrito en el Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica (INA, 2019c), en el que se representa la propagación de marea astronómica y la generación de la componente meteorológica de la marea que se propaga desde el Sur y viaja hacia el Norte por la costa argentina del Atlántico Sur (Santoro et al., 2013). Relevando las variaciones de nivel con un paso horario en puntos ubicados a lo largo de los bordes abiertos del modelo regional de la costa de Buenos Aires y separados unos 6.600 metros entre sí, se obtuvieron las condiciones de borde hidrodinámicas que permiten traer la onda de marea desde mar abierto hasta las costas bonaerenses.

#### 4.3.5 Vientos

Respecto al forzante meteorológico, se utilizaron los datos del modelo global ECMWF, que provee valores de presión y velocidad del viento en dos direcciones, a 10 metros sobre el nivel del mar con una discretización espacial de 0.125° a lo largo de todo el dominio de cálculo y un paso temporal de 3 horas (Figura 4.8).

#### 4.3.6 Parámetros físicos

La resistencia hidráulica se parametrizó en términos del coeficiente de rugosidad de Manning. A este se le asignó el valor uniforme 0,025.

Para representar la difusión turbulenta se ha utilizado la formulación de Smagorinsky, en la que la viscosidad de torbellino está relacionada a la tasa de deformación (que depende de los gradientes de velocidad) y a una longitud característica (representativa del tamaño de celda), magnitudes que son calculadas automáticamente por el modelo. En la parametrización interviene el coeficiente de Smagorinsky, cuyo rango sugerido se extiende entre 0,25 y 1. Se utilizó el valor 0,28, que es el sugerido por omisión, habiéndose realizado ensayos de sensibilidad de este valor.

Para el coeficiente de arrastre del viento se utilizó un valor constante en todo el dominio de 0,001255.

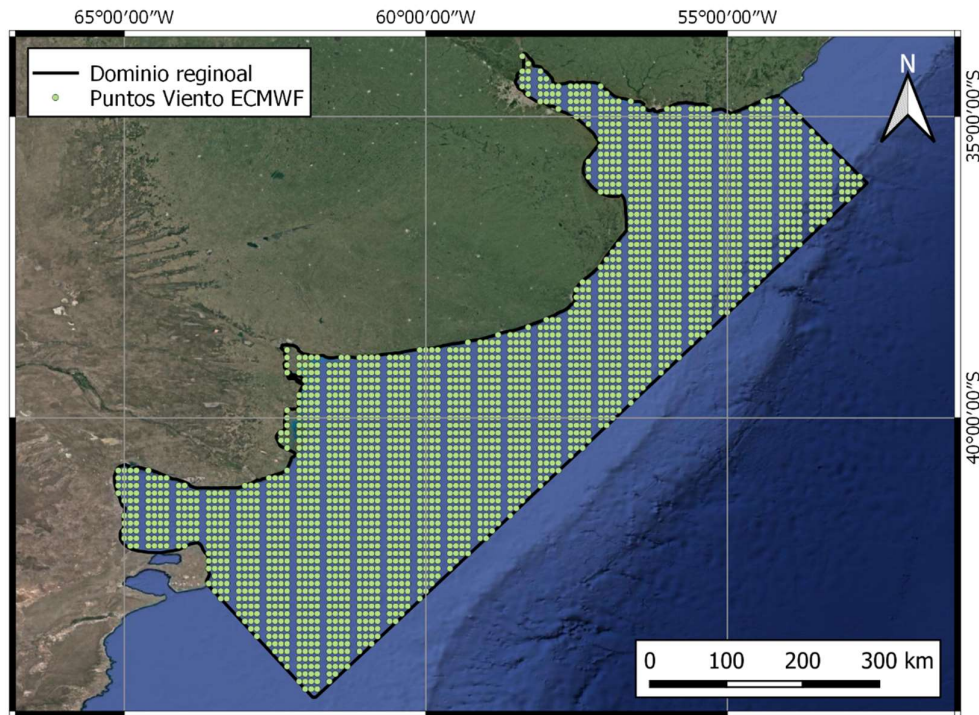


Figura 4.8. Datos de presión y velocidad del viento del modelo global ECMWF

#### 4.3.7 Paso temporal

La menor escala de tiempo a resolver para los forzantes es semi-diurna, de modo que, desde el punto de vista de la representación precisa en el tiempo de la solicitación (onda de marea), el paso temporal de cálculo  $\Delta t$  debe cumplir con la condición  $\Delta t \ll 12$  horas

Por el otro lado, el paso temporal  $\Delta t$  está limitado por la elección del paso espacial. Dado que la onda de marea se desplaza esencialmente con la celeridad de Lagrange  $c$  (en rigor, hay que sumarle la velocidad de flujo, pero esta resulta mucho menor), la segunda condición que debe cumplir el paso temporal es la siguiente:  $\Delta t = L / c$ , donde  $L$  es una escala del paso espacial. La celeridad de Lagrange se calcula a partir de la profundidad de agua  $h$  como  $c = (gh)^{1/2}$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. En la costa de la Provincia de Buenos Aires la profundidad media es alrededor de 60 m, resultando una celeridad de Lagrange de aproximadamente 25 m/s. La máxima limitación la impone el menor elemento de la textura  $C$  con  $L = 400$  m, de lo que resulta  $t = 16$  segundos.

Ahora bien, el *MIKE 21* adopta un paso de tiempo variable cuyo valor es seleccionado de forma tal que cumpla con los parámetros de estabilidad impuestos. En este caso, la forma de materializar las restricciones de inestabilidad es a través del número de Courant-Friedrich-Lévy (CFL), que tiene en cuenta lo antedicho respecto de la relación entre la celeridad de la onda y el tamaño mínimo de celda. En este caso:

$$CFL = \frac{c \cdot \Delta t}{\Delta x} < 0,8$$

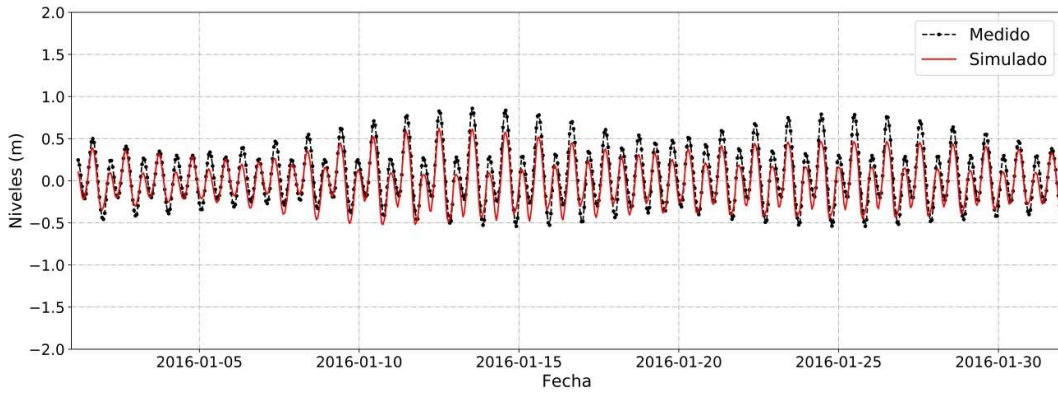
Lo que resulta en un paso temporal de 12 segundos. Al *MIKE 21* se le permitió variar el paso temporal desde 0,01 seg hasta los 600 seg.

#### 4.3.8 Calibración

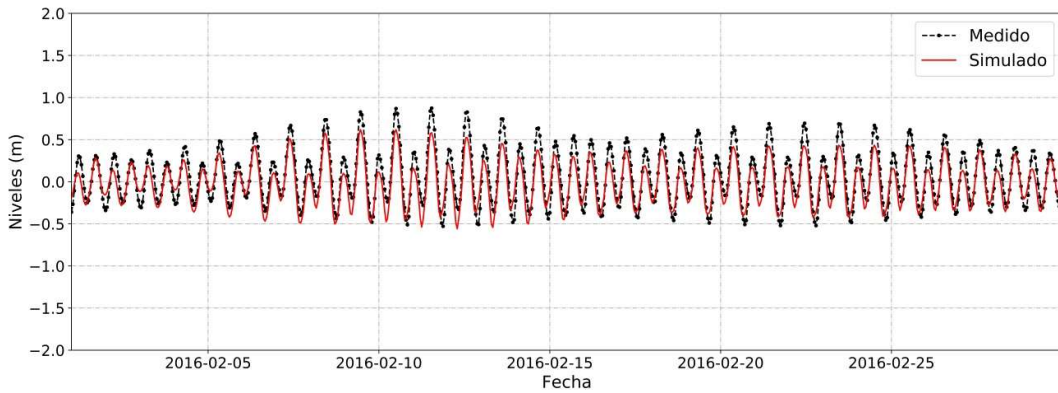
Para validar el modelo se contó con series de niveles registrados y mareas predichas en diferentes puntos de interés de la costa pero con distintas ventanas temporales. Se seleccionó finalmente como ventana de simulación la que va del 01/ene/2016 al 31/dic/2016 pues en dicho período había registros simultáneos en Mar del Plata y San Clemente (Informe 3.1 de esta Asistencia Técnica- INA, 2019a).

En primer lugar se simuló la marea predicha en el puerto de Mar del Plata. Para eso se impuso en los bordes abiertos del modelo niveles de marea predicha obtenidos mediante la aplicación *Tidal Prediction* perteneciente al paquete *MIKE 21 Toolbox* (DHI, 2016) incluida en el sistema *MIKE 21*, y se procedió a verificar la propagación de los mismos. En particular para esta variable solo se tenían datos para el período 01/ene/2016 – 01/abr/2016. La Figura 4.9 muestra la comparación entre los niveles simulados y los predichos, siendo la misma muy satisfactoria. Para cuantificar la performance del modelo se calcularon dos indicadores estadísticos: el  $R^2$ , que dio 0,93, y el Error Cuadrático Medio (RMSE), que fue de 15 cm.

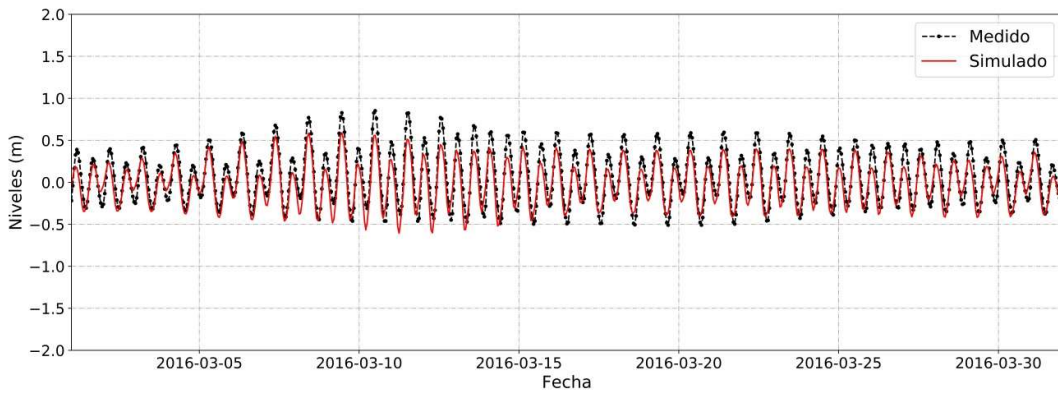
Seguidamente se realizó la comparación entre niveles registrados y simulados. Para esto se simuló todo el año 2016 y el modelo fue forzado en los bordes abiertos con la marea oceánica obtenida para ese año del modelo *AStide* (sección 4.3.4) y los datos de vientos (presión, velocidad y dirección) obtenidos del modelo global ECMWF (sección 4.3.5). La Figura 4.10 y la Figura 4.11 muestran respectivamente para Mar del Plata y San Clemente los niveles registrados y simulados (se presentan a modo de ejemplo tres meses para cada lugar). Se observa en general un buen acuerdo para ambas zonas, capturándose mejor los niveles en Mar del Plata. Esto último se corrobora con los indicadores estadísticos, teniendo Mar del Plata un  $R^2$  de 0,87 y un RMSE de 21 cm, mientras que en San Clemente el  $R^2$  es 0,66 y el RMSE es 35 cm.



a) 01/ene/2016 – 01/feb/2016

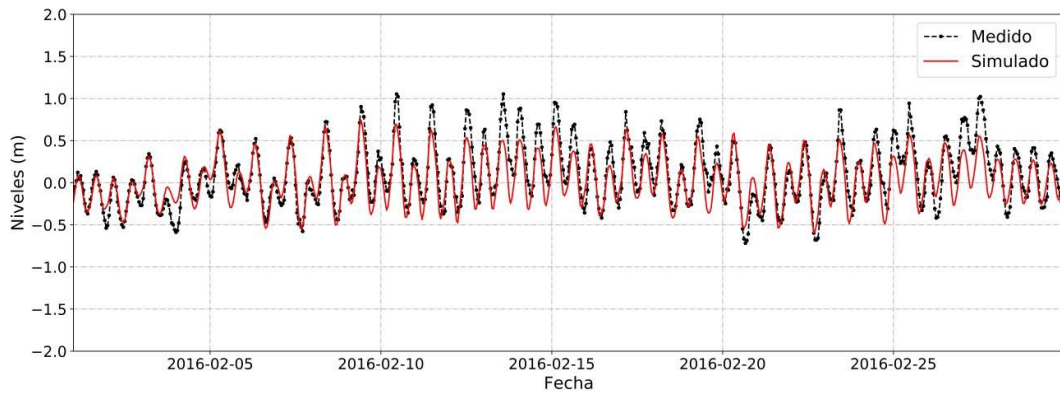


b) 01/feb/2016 – 01/mar/2016

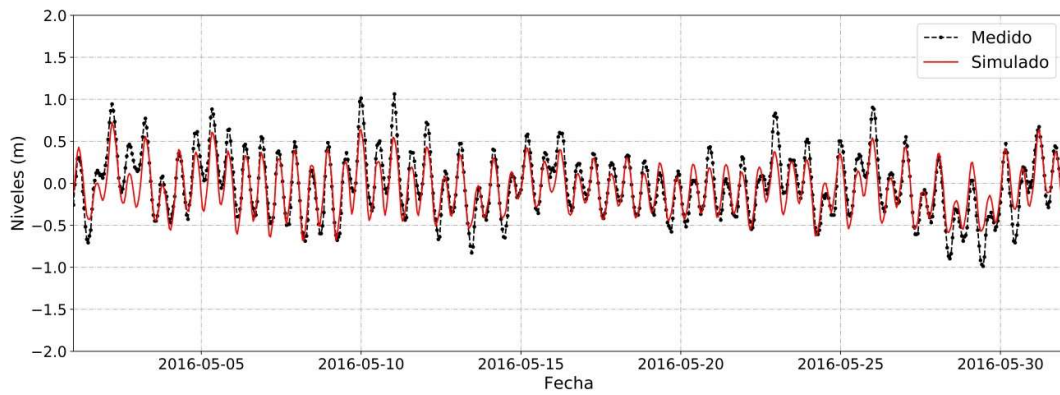


c) 01/mar/2016 – 01/abr/2016

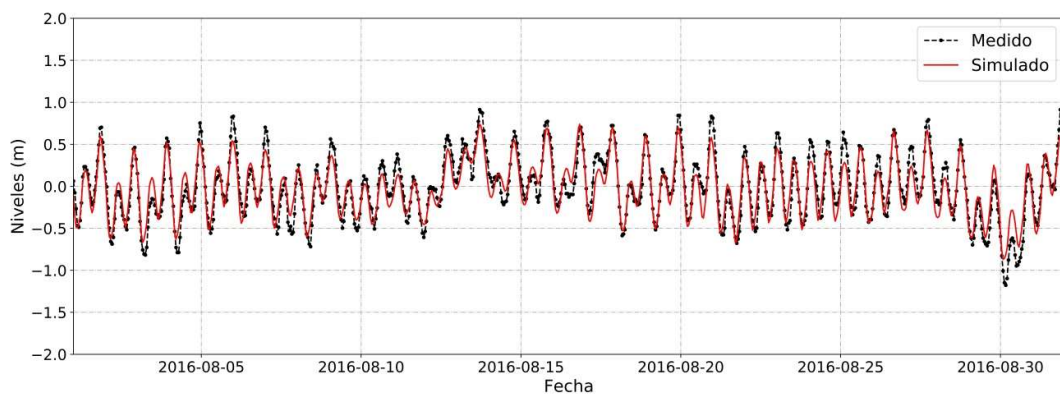
**Figura 4.9.** Marea predicha (línea azul) y simulada (línea naranja) en el Puerto de Mar del Plata.



a) 01/feb/2016 – 01/mar/2016

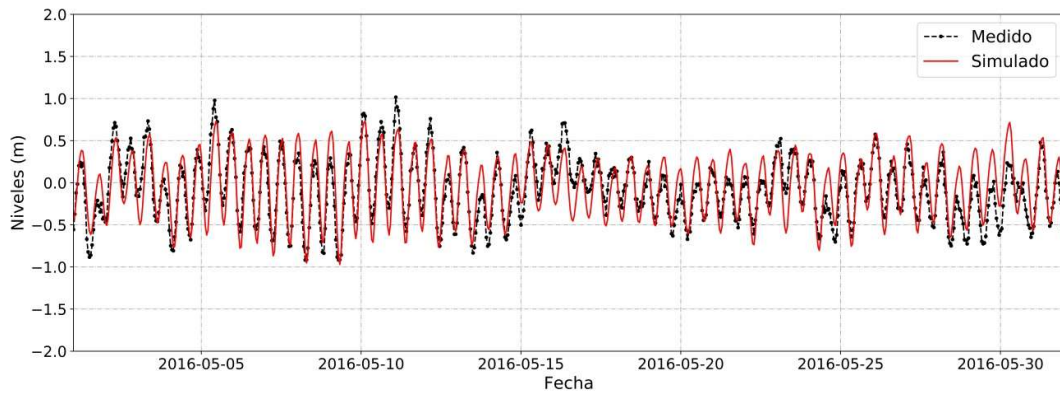


b) 01/may/2016 – 01/jun/2016

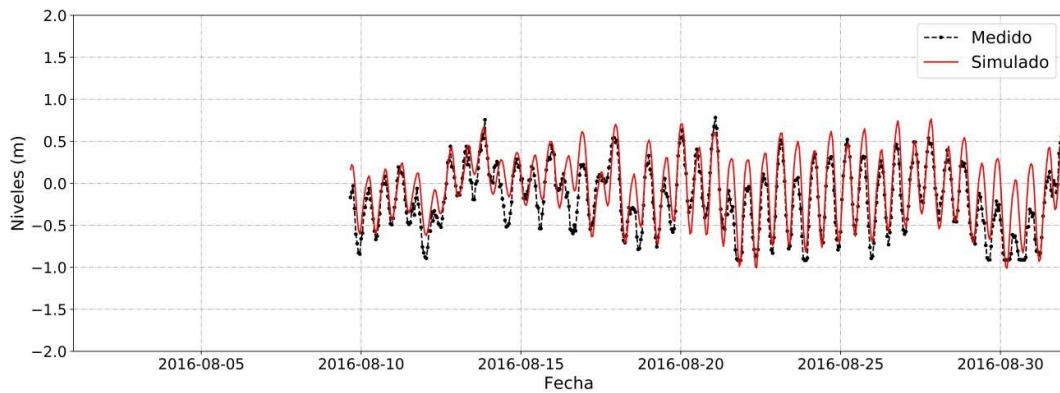


c) 01/ago/2016 – 01/sep/2016

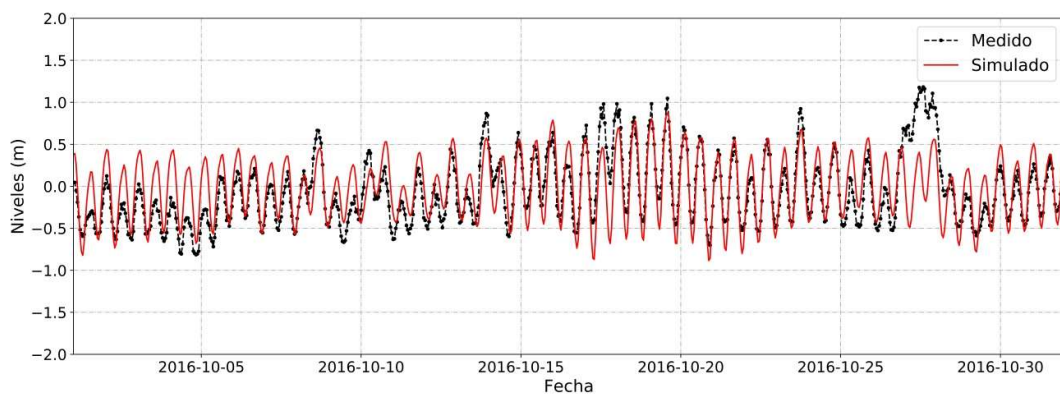
**Figura 4.10.** Niveles registrados en el Puerto de Mar del Plata (línea negra) y simulados (línea roja) durante el año 2016.



a) 01/may/2016 – 01/jun/2016



b) 01/ago/2016 – 01/sep/2016



c) 01/oct/2016 – 01/nov/2016

**Figura 4.11.** Niveles registrados en el San Clemente (línea negra) y simulados (línea roja) durante el año 2016.

#### 4.3.9 Validación

Para validar el modelo se procedió a simular todo el año 2010, donde se contaban con niveles registrados en San Clemente. La Figura 4.12 muestra los resultados del modelo (a modo de ejemplo se presentan solo tres meses), teniendo los mismos un acuerdo satisfactorio con los niveles registrados, obteniéndose los siguientes indicadores estadísticos: R2 de 0,67 y RMSE de 35 cm.

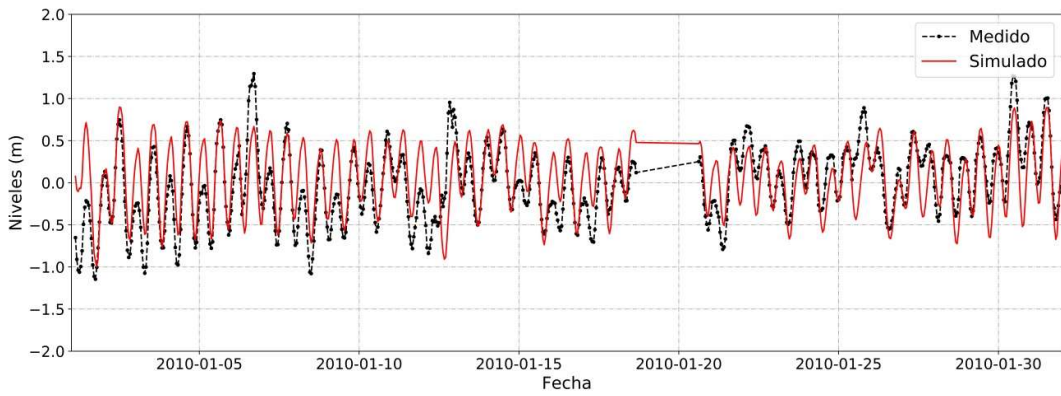
#### 4.4 Modelación de oleaje regional

La representación del oleaje a escala regional se materializó a partir de la generación de dos hileras de boyas virtuales paralelas a la costa (BV-A, ubicada a una distancia de 12 a 15 km de la costa y BV-B a 30 - 35 km de la costa), tal como se muestra en la Figura 4.13 . La discretización espacial de la hilera BV-A es de unos 0,12º, mientras que la de la hilera BV-B es de 0.6º. En ambos casos, la discretización temporal de los valores es horaria y el período cubierto va desde enero de 1979 hasta diciembre de 2018. Las variables que contienen estas boyas virtuales son:

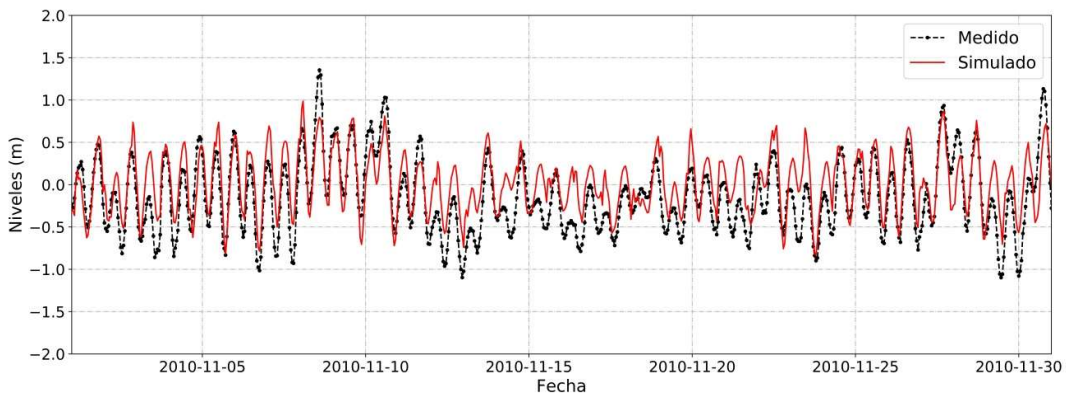
- Altura significativa de ola (Hs)
- Período pico de oleaje (Tp)
- Dirección media de oleaje (MWD)
- Desvío direccional de momentos espectrales (DSD).

Estas boyas virtuales fueron generadas a partir del *ASTide* para esta asistencia técnica. El detalle de esto puede encontrarse en el Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica (INA, 2019c).

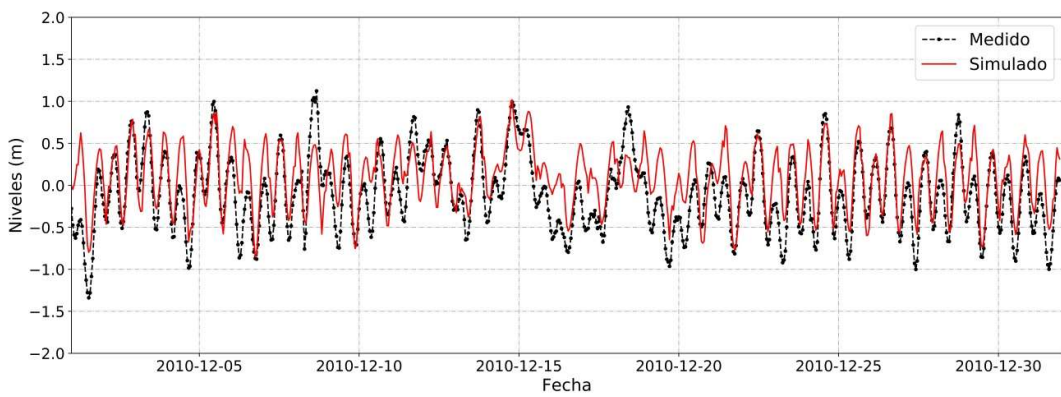
Dado que el interés en la representación del oleaje es a escala local, se seleccionaron las boyas virtuales más cercanas a cada punto de interés y se las utilizó como condiciones de borde para los modelos locales. La calibración/validación de los modelos locales se presenta en la sección 4.5.2.



a) 01/ene/2010 – 01/feb/2010



b) 01/nov/2010 – 01/dic/2010



c) 01/dic/2010 – 31/dic/2010

**Figura 4.12.** Niveles registrados en el San Clemente (línea negra) y simulados (línea roja) durante el año 2010.

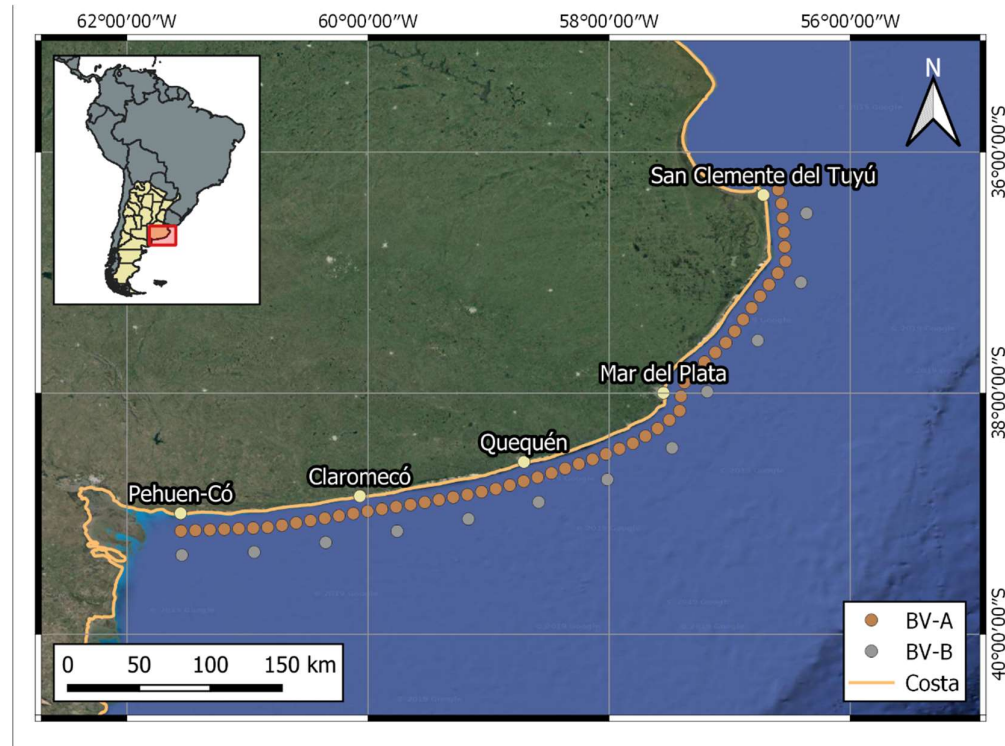


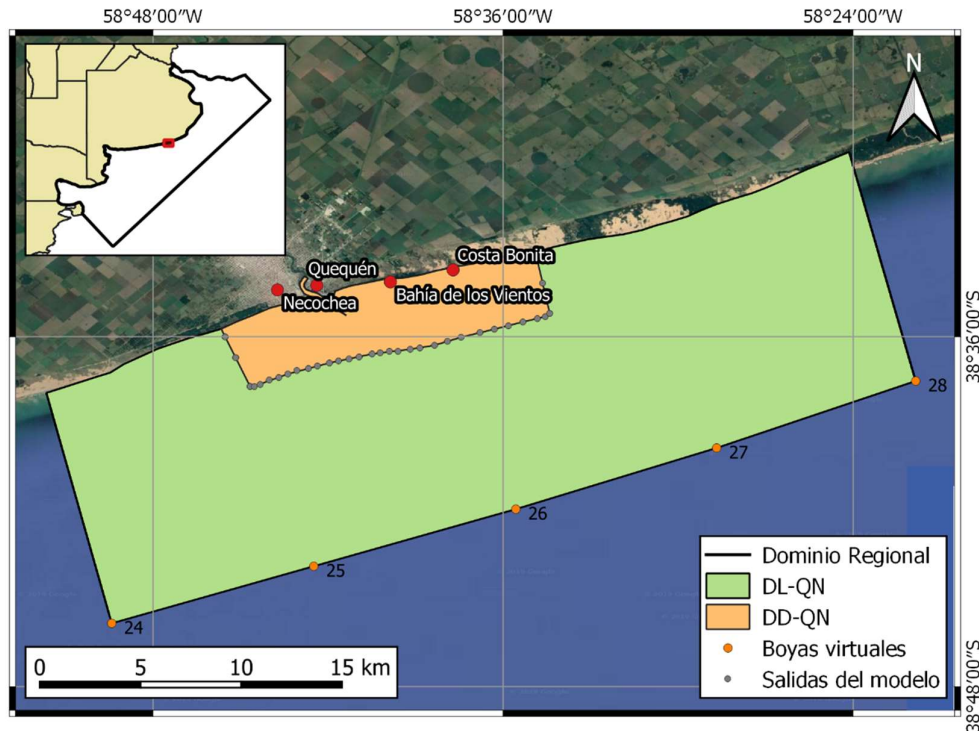
Figura 4.13. Ubicación de las boyas virtuales generadas mediante el modelo *AStide*.

Para estudiar en detalle la morfodinámica y el impacto de diferentes intervenciones, se procedió a implementar modelos de mayor resolución en las cercanías de las zonas de interés descritas en la sección 3.1. Los modelos obtendrán sus condiciones de borde de las boyas virtuales generadas en este proyecto, presentadas en el Informe 4.1 de esta Asistencia Técnica (INA, 2019c) y cuya ubicación se muestra en la Figura 4.13. La implementación y el detalle de los mismos se describen a continuación

#### 4.5 Modelación en el entorno de las ciudades de Quequén y Necochea.

Como se mencionó anteriormente, se implementó un modelo en esta zona de interés, cuyo borde exterior paralelo a la costa coincide con la ubicación de las boyas virtuales. Este modelo (denominado modelo local DL-QN) se desarrolla longitudinalmente 43 km a lo largo de la costa y 15 km en forma perpendicular, abarcando las localidades de Necochea, Quequén, Bahía de los Vientos y Costa Bonita. Dado que para estudiar el impacto morfodinámico se requiere de mayor precisión y para no tener tiempos de simulaciones excesivas con el modelo local, se desarrolló adicionalmente un modelo de detalle (DD-QN) de la zona de análisis que se encuentra anidado al modelo local (esto es, que las condiciones de borde del modelo de detalle salen a partir de los resultados obtenidos con el modelo local). Este modelo se desarrolla longitudinalmente 16 km

a lo largo de la costa y 4 km en forma perpendicular. Los dominios de ambos modelos se presentan en la Figura 4.14.



**Figura 4.14** Dominio del modelo local (DL-QN) y de detalle (DD-QN) de la zona de Quequén y Necochea.

#### 4.5.1 Batimetría, discretización, parámetros físicos y forzantes

Para el armado Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo del modelo local y del modelo de detalle se utilizaron datos batimétricos relevados en la zona del Puerto de Quequén (Figura 4.6) y se complementaron con datos obtenidos de cartas del Servicio de Hidrografía Naval (Tabla 4.2). Los MDE resultantes para el modelo local y de detalle se presentan en la Figura 4.15

Las grillas de discretización se materializaron con elementos triangulares. Para el modelo local se utilizaron dos texturas de elementos en todo el dominio mientras que para el modelo de detalle se definieron 3 texturas (Figura 4.16). En la Tabla 4.3 se describen los detalles de las grillas utilizadas.

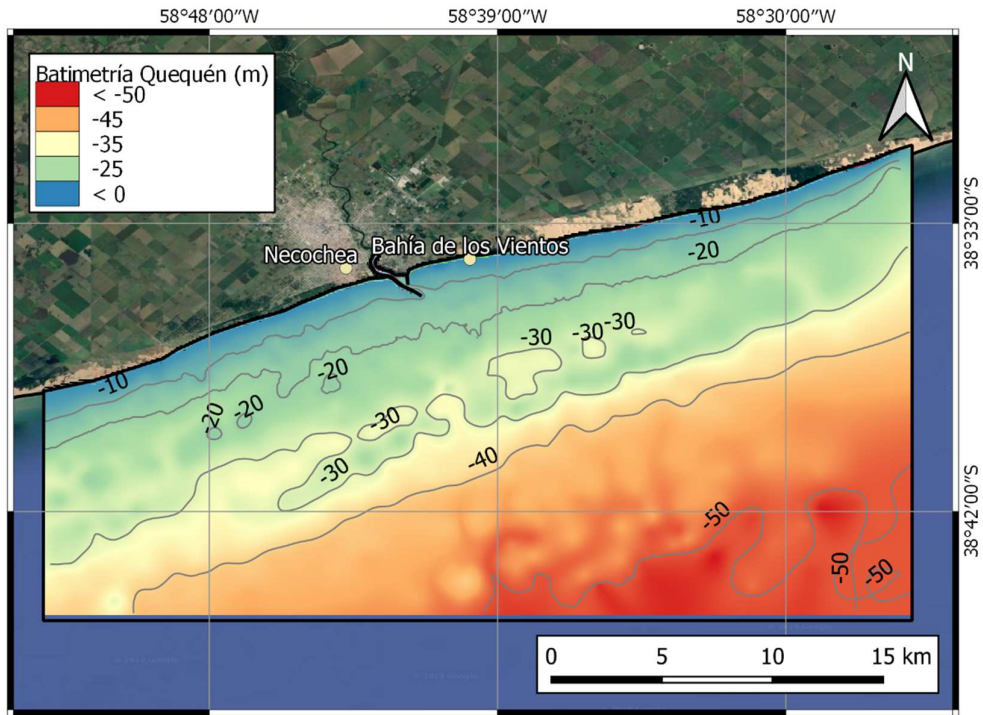
Los parámetros físicos, tanto del modelo local como del modelo de detalle, son similares a los del modelo hidrodinámico regional y pueden verse en la sección 4.3.6.

En lo referido a los forzantes, para disminuir el costo computacional de los modelos locales, dado que la escala de representación así lo permitía, se optó por utilizar una formulación paramétrica de desacoplado direccional en lo que refiere a la formulación espectral del oleaje, y una formulación cuasi estacionaria en la formulación temporal. A su vez, se adoptó una discretización del oleaje en 16 direcciones que cubrieran los 360° y una resolución de la

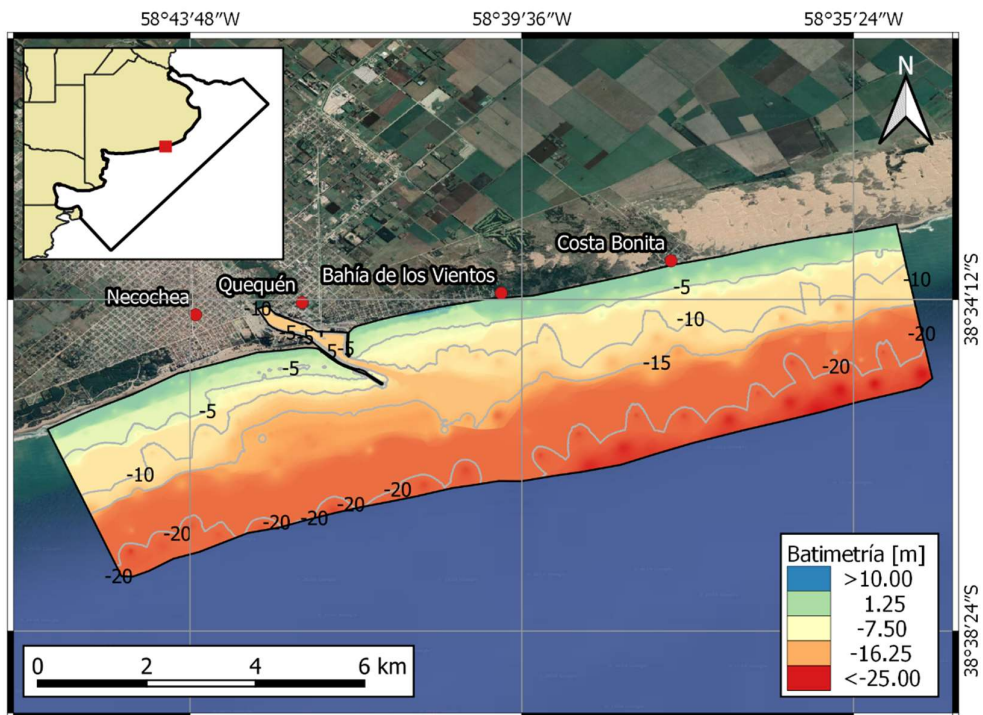
discretización geográfica de bajo orden, que permite una simplificación del algoritmo de cálculo. Para el módulo hidrodinámico se adoptó una condición de marea constante e igual a 0 m.

**Tabla 4.3.** Caracterización de las grillas de cálculo

Textura	Modelo local		Modelo detalle		
	A	B-	A	B	C
Paso medio (m)	400	300	30	80	300
Área máxima (km <sup>2</sup> )	578	69	35	16	14
Cantidad de elementos	9394	2349	3673	8339	23438
Rango de profundidades (m)	3 - -50	8 - -25	-10 - -25	0 - -10	9 - -14-

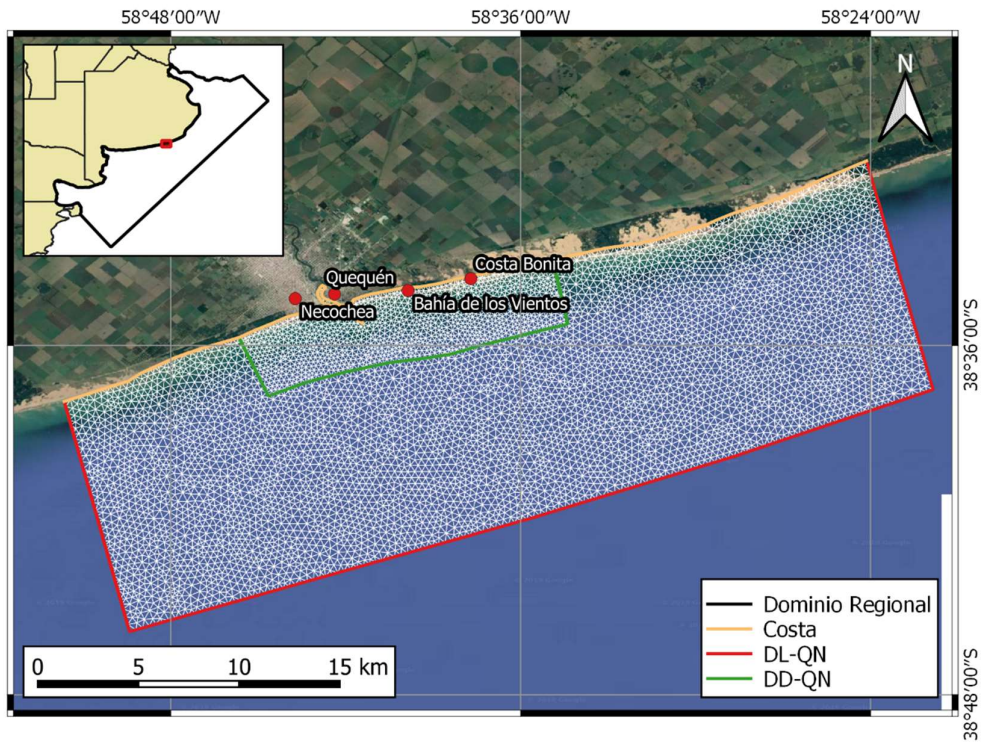


a) Modelo Local

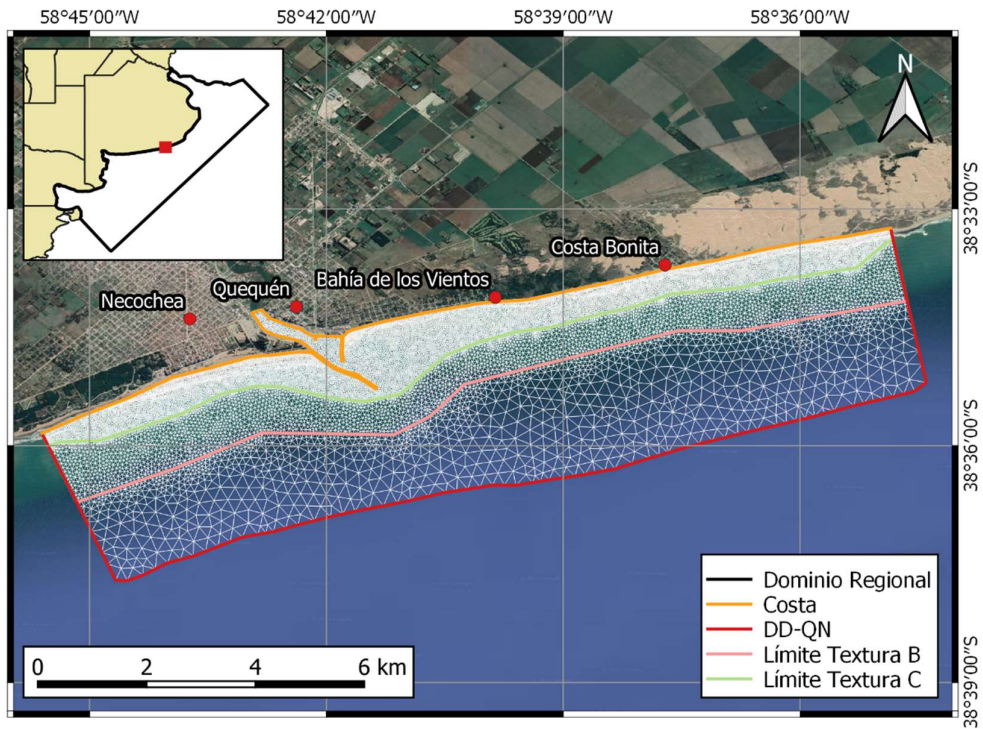


b) Modelo de detalle

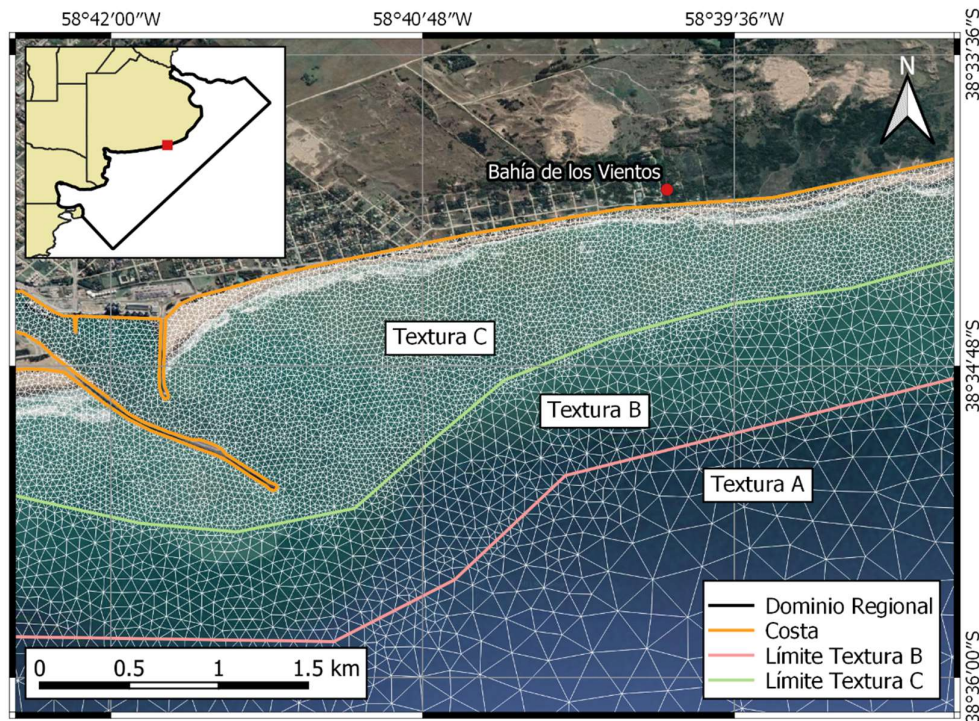
Figura 4.15. Modelos Digitales de Elevación (MDE) del fondo.



a) Modelo local (DL-QN).



b) Modelo detalle (DD-QN)



c) Zoom en el modelo de detalle DD-QN

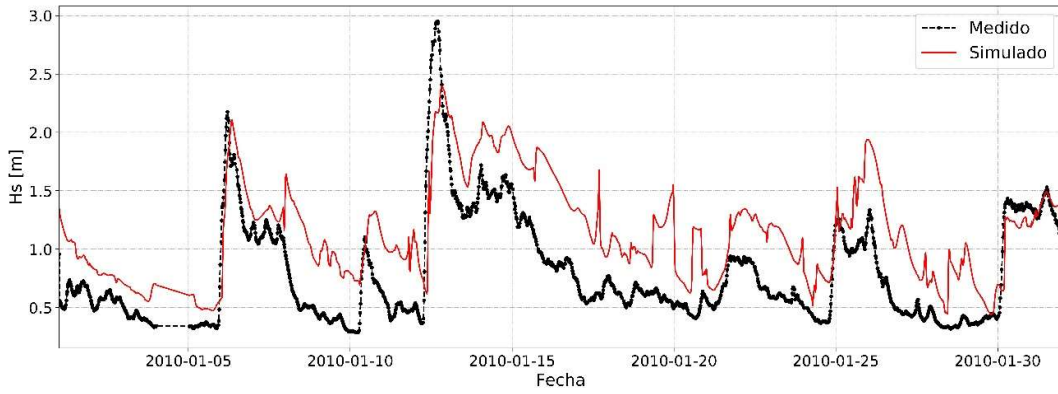
**Figura 4.16.** Grillas de cálculo.

#### 4.5.2 Validación del modelo de oleaje

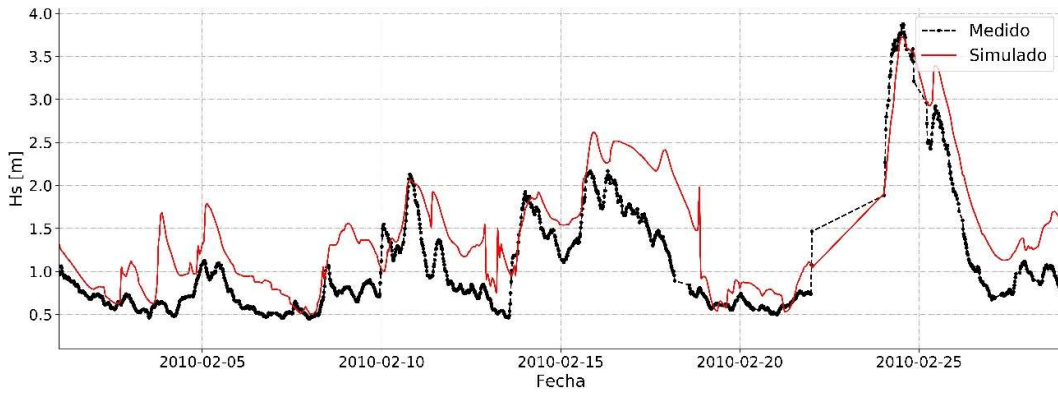
Se procedió a realizar una simulación para el período 01/01/2010 – 01/07/2010 del modelo local DL-NQ, utilizando como forzante los datos de oleaje determinados en las boyas virtuales que coinciden con el borde del citado modelo. Para contrastar los resultados del modelo de oleaje se contó con datos medidos por un olígrafo situado a las afueras del puerto de Quequén, y que cuenta con una serie de datos cada 20 minutos, desde Julio del 2006 hasta Diciembre del 2012 (Ver el Informe 3.2 de esta Asistencia Técnica – INA, 2019b).

La Figura 4.17 muestra la comparación entre los valores simulados y los medidos de la altura significativa de ola (Hs). El acuerdo logrado es razonable. Para cuantificar la performance del modelo se calcularon dos indicadores estadísticos: el  $R^2$ , que dió 0,88, y el Error Cuadrático Medio (RMSE), que fue de 42 cm.

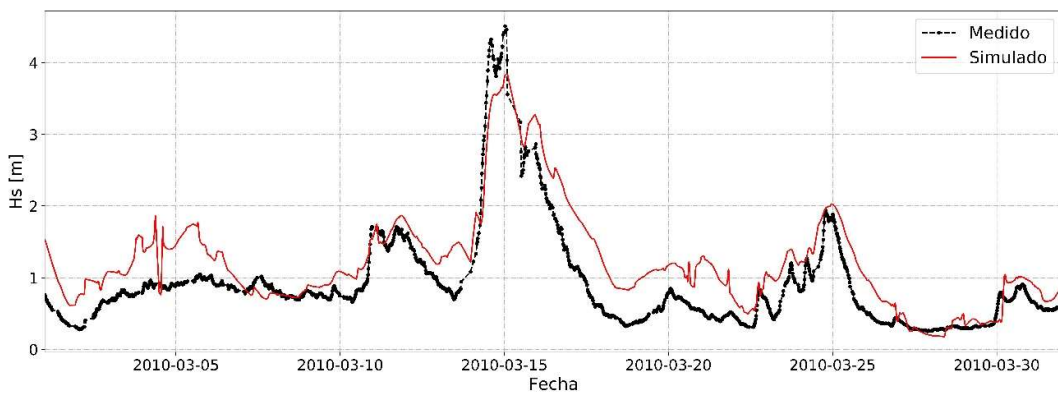
Los resultados obtenidos para el período medio (Ts) y el período pico (Tp) se muestran respectivamente en la Figura 4.18 y en la Figura 4.19. La performance del modelo para reproducir estas dos variables es similar, obteniéndose los siguientes estadísticos: el  $R^2$  de 0,57 para el período medio y de 0,50 para el período pico. El RMSE para el período medio fue de 1,4 segundos mientras que para el período pico fue de 2,1 segundos.



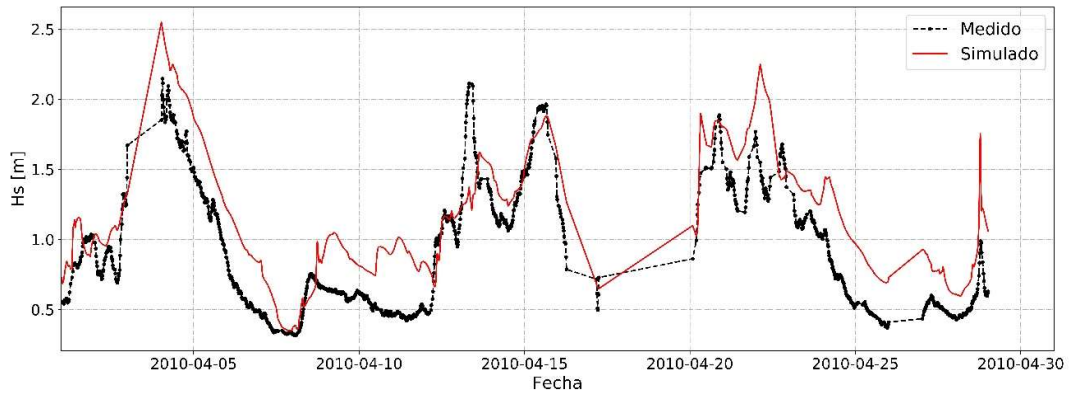
a) Enero de 2010



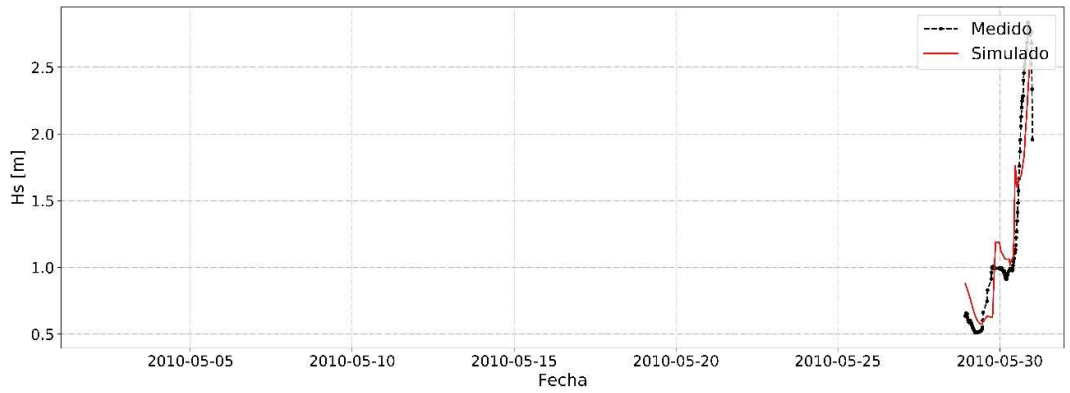
b) Febrero de 2010



c) Marzo de 2010

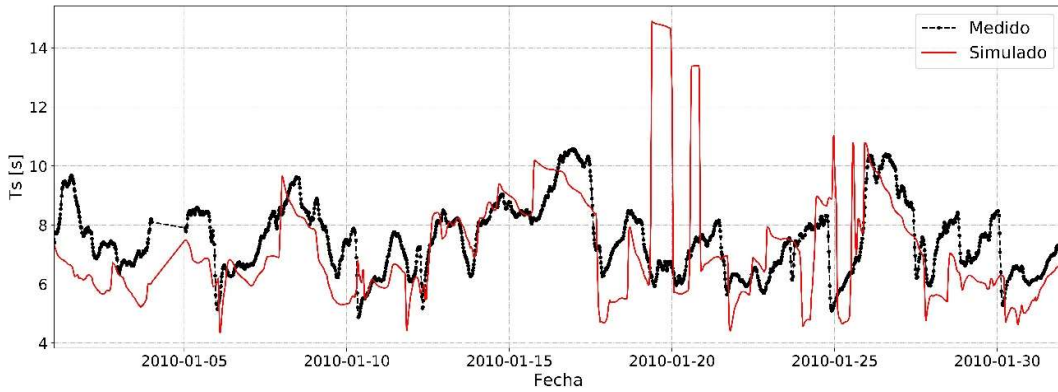


d) Abril de 2010

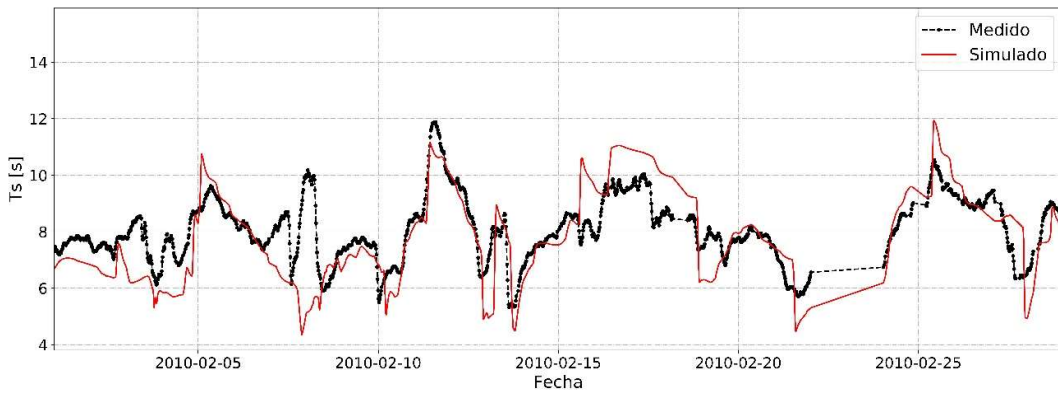


e) Mayo de 2010

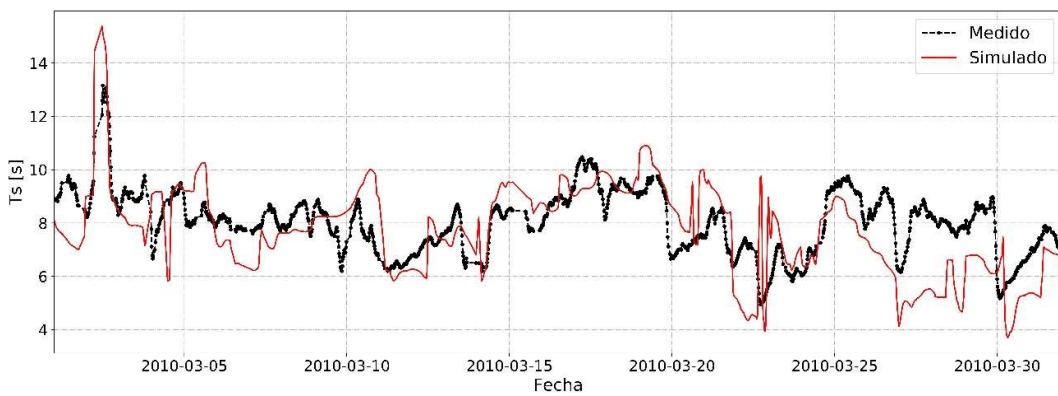
**Figura 4.17.** Altura significativa de ola (Hs) simulada (línea roja) y observada (línea punteada negra) en el olígrafo de Quequén.



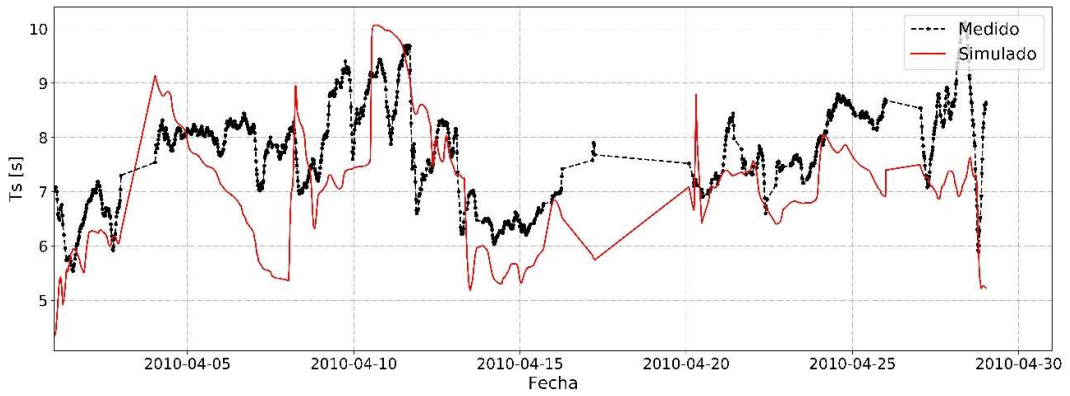
a) Enero de 2010



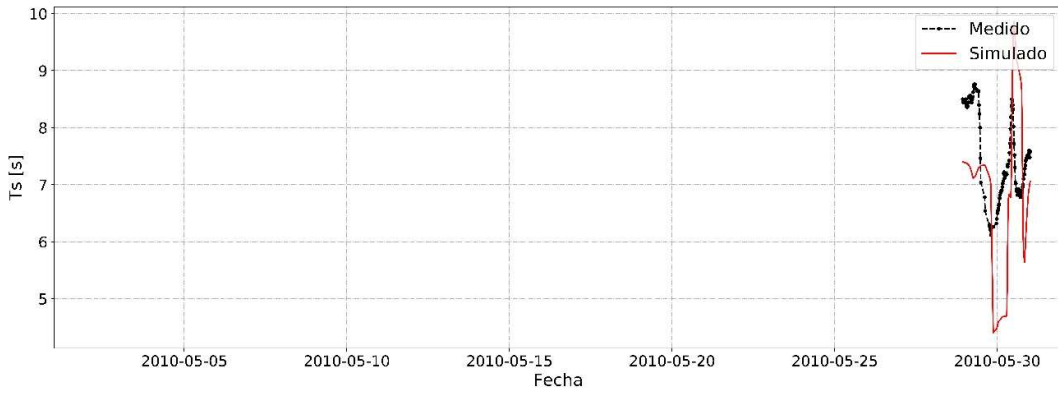
b) Febrero de 2010



c) Marzo de 2010

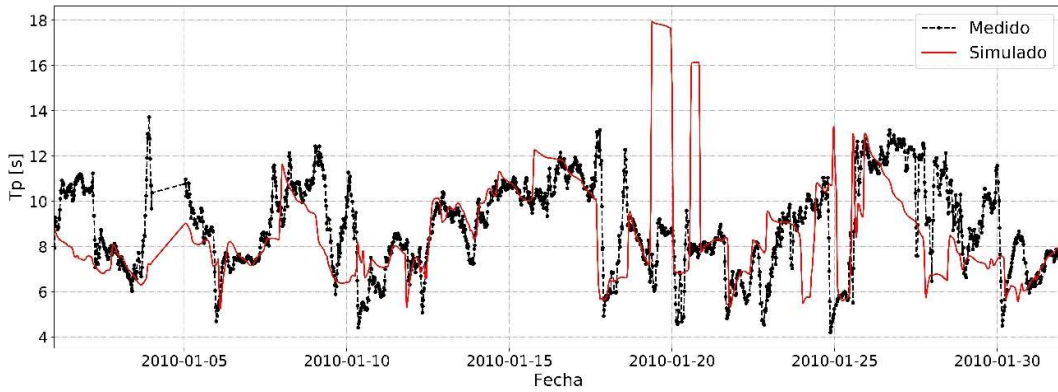


d) Abril de 2010

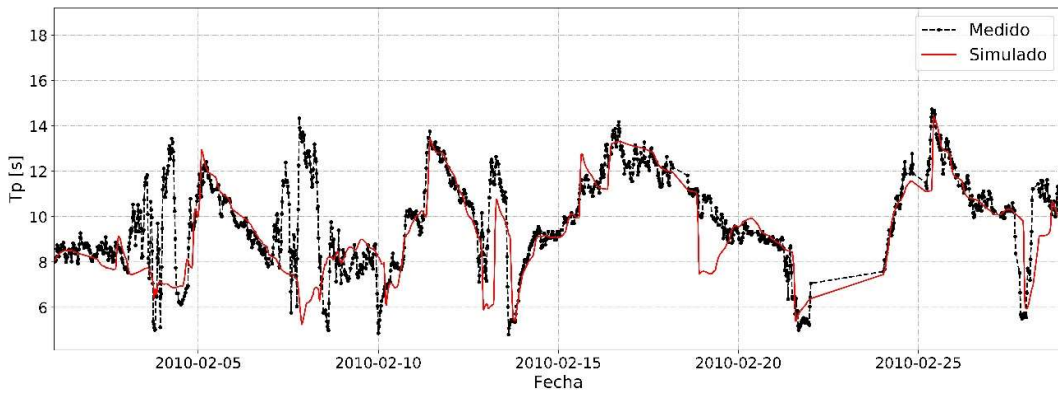


e) Mayo de 2010

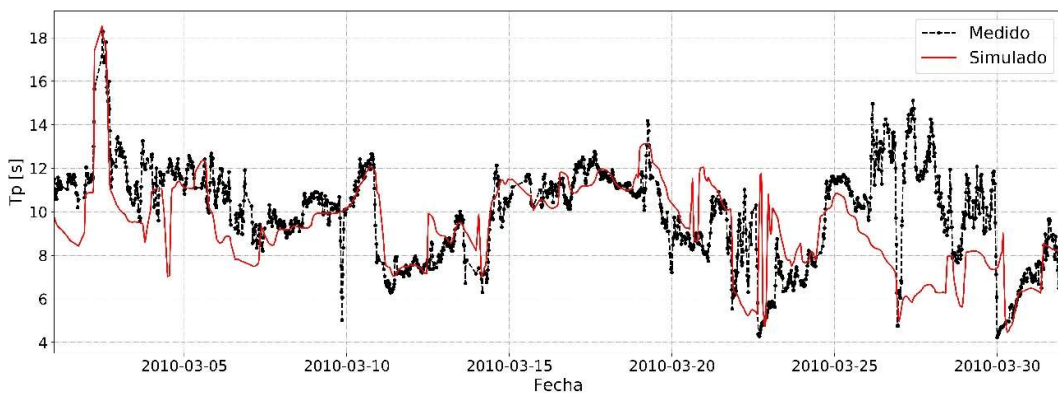
Figura 4.18. Período medio (Ts) simulado (línea roja) y observado (línea punteada negra) en el olígrafo de Quequén.



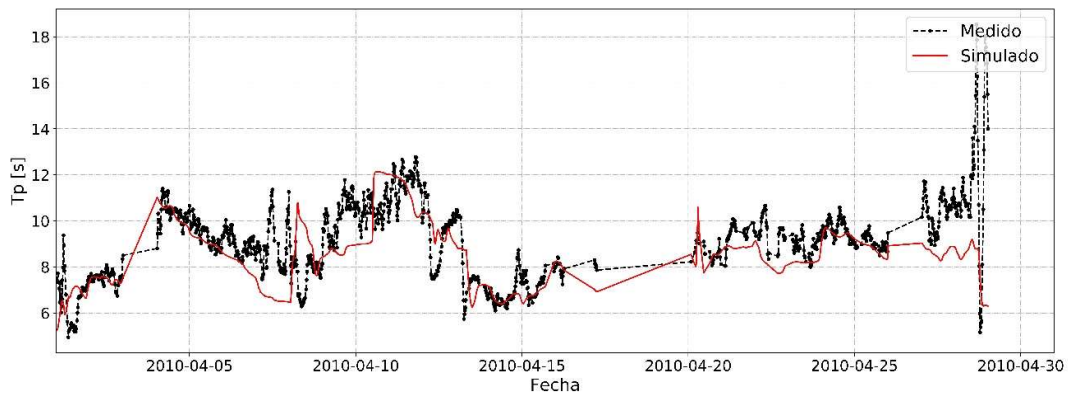
a) Enero de 2010



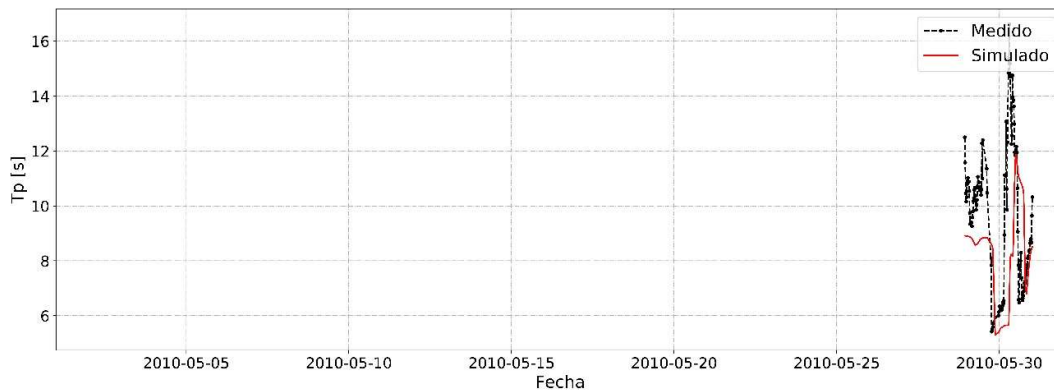
b) Febrero de 2010



c) Marzo de 2010



d) Abril de 2010



e) Mayo de 2010

**Figura 4.19.** Período pico ( $T_p$ ) simulado (línea roja) y observado (línea punteada negra) en el olígrafo de Quequén.

#### 4.6 Modelación Local en el entorno de la ciudad de Mar del Plata

Otra zona de interés para estudiar en detalle, era la ciudad de Mar del Plata, en particular la zona aledaña al Puerto de dicha ciudad. Para esto se implementó un modelo local (DL-MdP), de 50 km de extensión a lo largo de la costa y 13 km de ancho) y un modelo de detalle (DD-MdP), anidado al local y que toma como condiciones de borde los resultados de este último, que se desarrolla 7 km a lo largo de la costa y 5 km en forma perpendicular a la misma. El modelo local incluye las localidades de Mar del Plata y Camet. El dominio de ambos modelos se puede ver en la Figura 4.20.

##### 4.6.1 Batimetría, discretización, parámetros físicos y forzantes

Para el armado Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo del modelo local y del modelo de detalle se utilizaron datos batimétricos obtenidos de cartas del Servicio de Hidrografía Naval (Tabla 4.2). Los MDE resultantes para el modelo local y de detalle se presentan en la Figura 4.21.

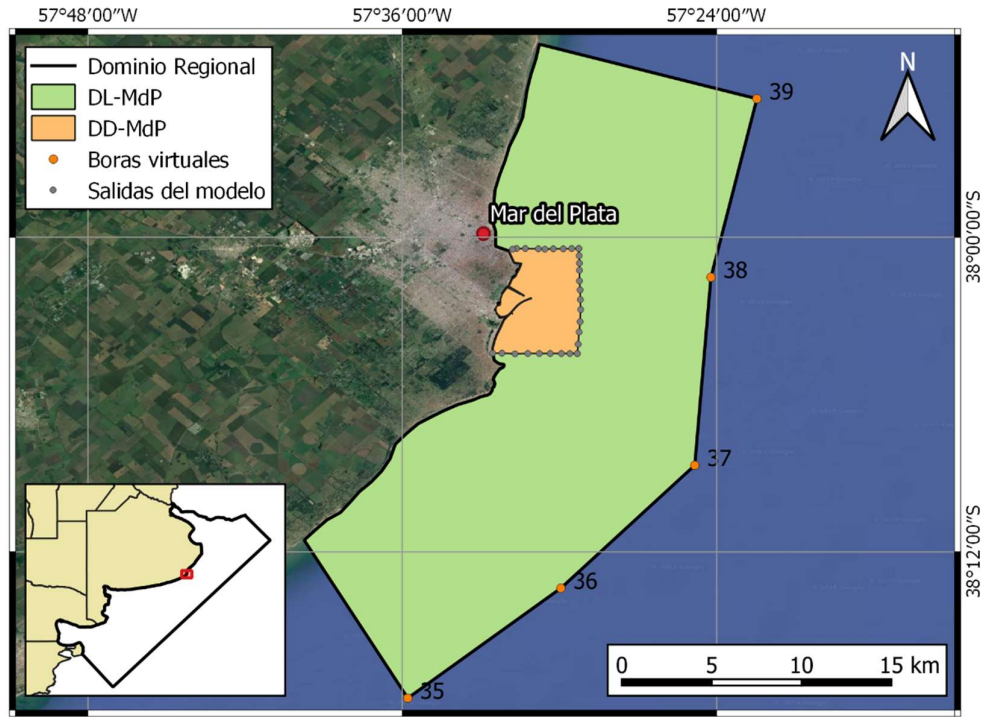


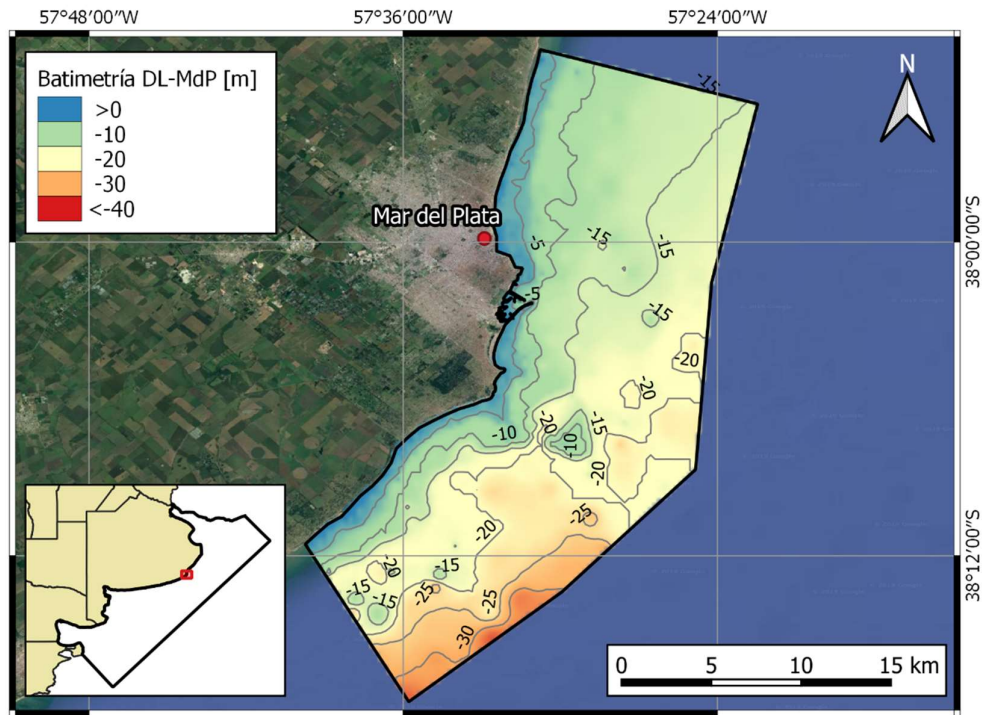
Figura 4.20. Dominio del modelo local y de detalle de la zona de Mar del Plata.

Las grillas de discretización se materializaron con elementos triangulares. Para el modelo local se utilizó un solo paso medio de los elementos en todo el dominio mientras que para el modelo de detalle se definieron 8 texturas (Figura 4.22). En la Tabla 4.4 se describen los detalles de las grillas utilizadas.

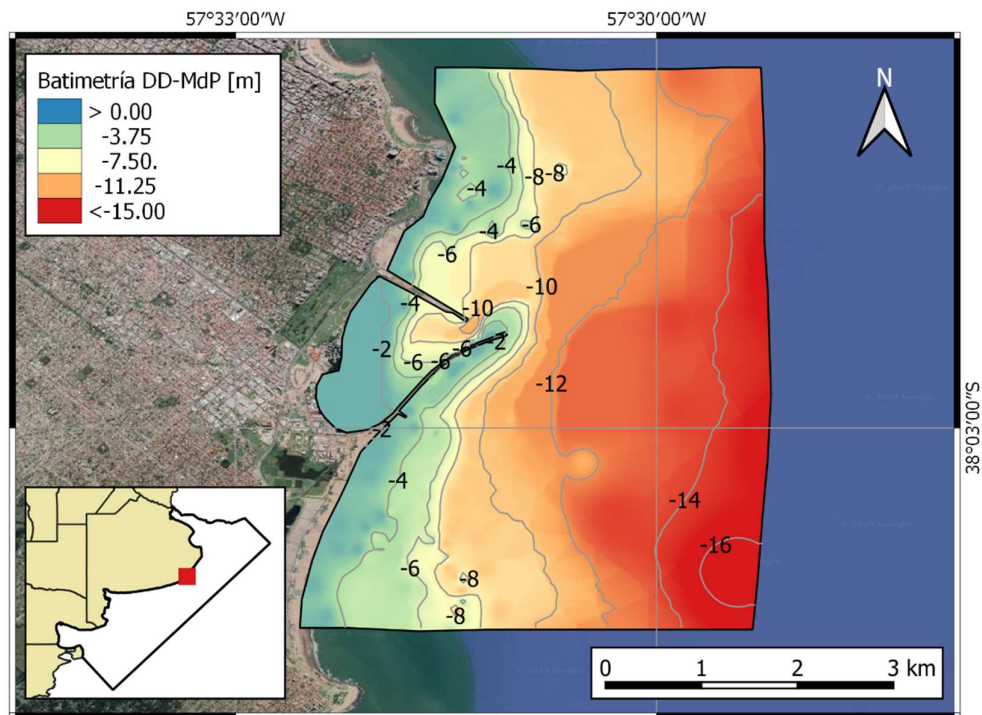
Tabla 4.4. Caracterización de las grillas de cálculo

	M. Local	Modelo Detalle							
Textura	-	1	2	3	4	5	6	7	8
Paso medio (m)	400	220	110	80	70	20	70	60	70
Área máxima (km <sup>2</sup> )	550	5,4	4	13	3	2,3	1	0,4	1,4
Cantidad de elementos	8838	430	989	5924	1676	12627	817	294	595
Rango profundidades (m)	0 - -36	-12 - -17	-11 - -17	-1 - -15	-2 - -10	-2 - -12	-2 - -9	-3 - -10	-2 - -7

Los parámetros físicos, tanto del modelo local como del modelo de detalle, son similares a los del modelo hidrodinámico regional y pueden verse en la sección 4.3.6.

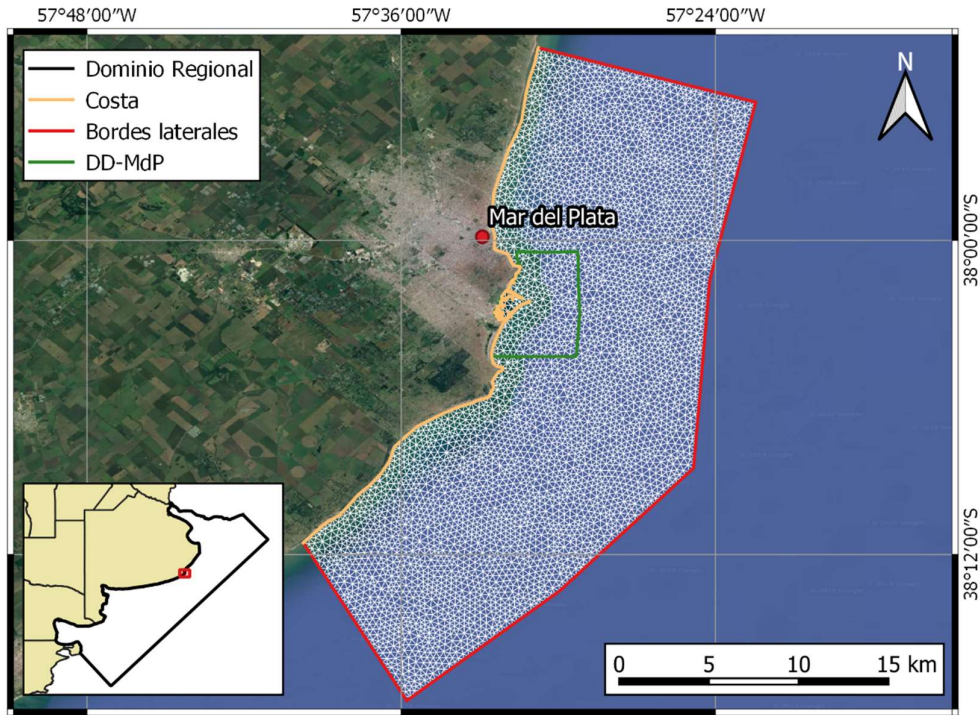


a) Modelo Local (DL-MdP)

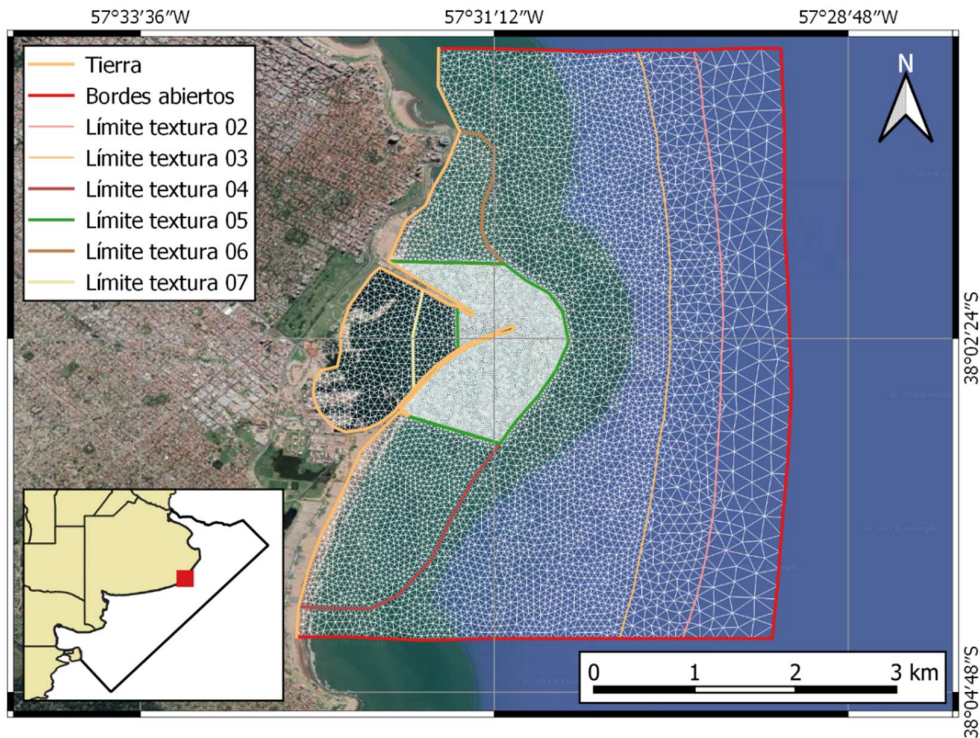


b) Modelo Detalle (DD-MdP)

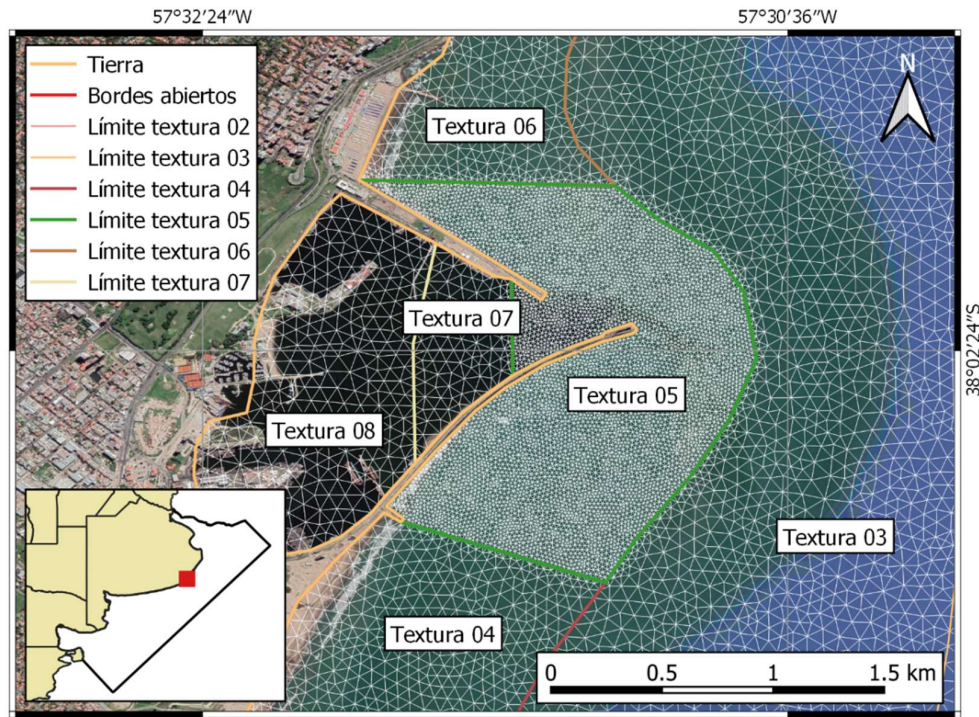
Figura 4.21. Modelos Digitales de Elevación (MDE) del fondo.



a) Modelo Local (DL-MdP).



b) Modelo Detalle (DD-MdP).



c) Zoom Modelo Detalle

**Figura 4.22.** Grillas de cálculo para el modelo de Mar del Plata.

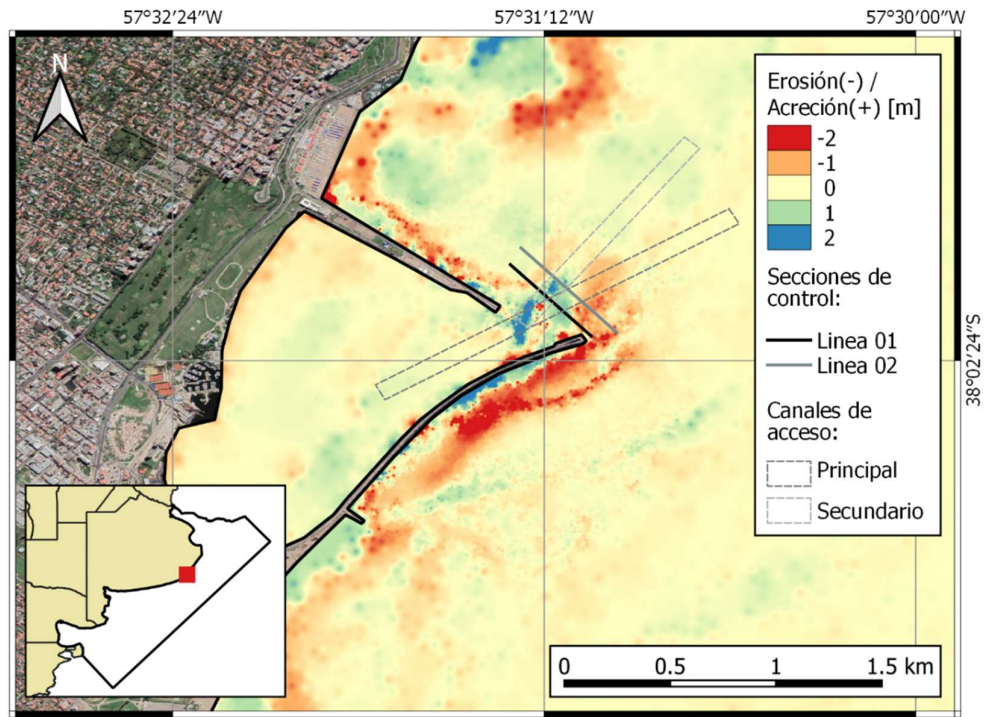
#### 4.6.2 Calibración/Validación del modelo morfológico acoplado

Para validar el modelo morfológico acoplado se procedió a reproducir una serie de perfiles batimétricos ubicados en la boca del puerto de Mar del Plata (Figura 4.23) relevados en diferentes fechas durante el período abril del 2009 – octubre 2009 (Cáceres et al., 2016).

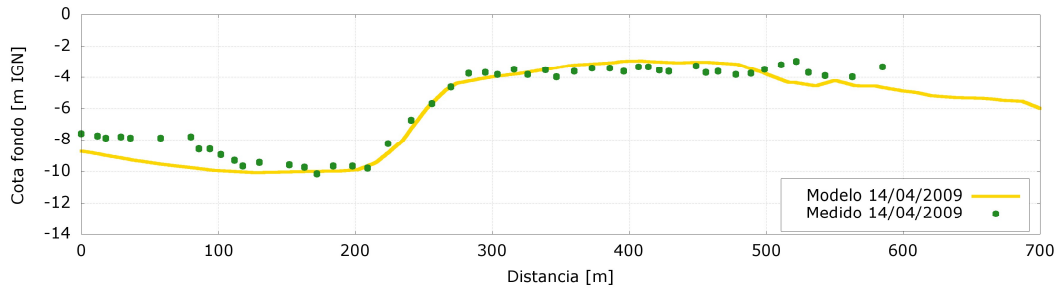
Los parámetros para caracterizar el sedimento fueron los siguientes:  $d_{50}=0,21$  mm, coeficiente de graduación ( $\sqrt{(d_{84}/d_{16})}$ ) de 1,57 y una porosidad de 0,4. Todos estos valores fueron obtenidos del trabajo de Cáceres et al. (2016). El transporte de material no cohesivo como carga de fondo se estimó utilizando la formulación de Engelund y Fredsøe (1976).

La Figura 4.24y la Figura 4.25 muestran respectivamente, para la línea 01 y la línea 02, la comparación entre los perfiles batimétricos relevados y simulados. El acuerdo general es muy bueno, aunque se observa una pequeña sobrestimación del fondo en la zona central del perfil 01 y una subestimación del fondo en el extremo derecho del perfil 02.

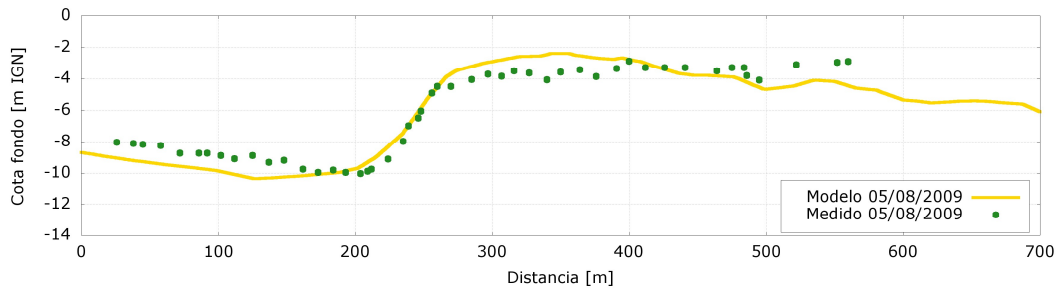
También se compararon las variaciones del nivel de fondo en ambos perfiles (Figura 4.26 y Figura 4.27). Se destaca la capacidad del modelo para poder simular el proceso de sedimentación observado sobre los canales de acceso al puerto, en particular para el canal secundario.



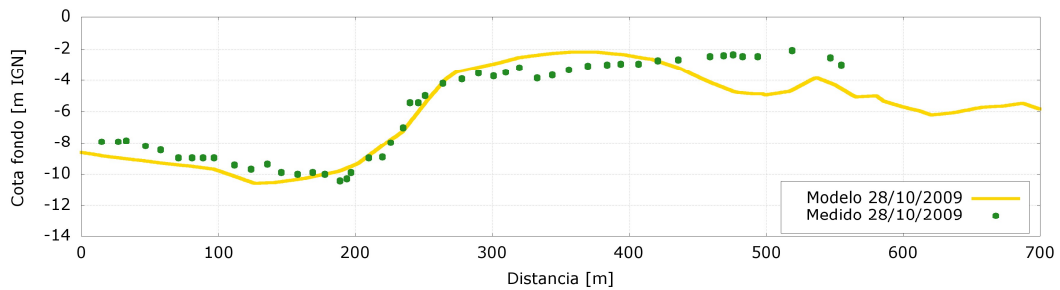
**Figura 4.23.** Variaciones en las cotas del fondo modeladas para el período 14/abr/2009 – 28/oct/2009.



a) 14 de abril de 2009

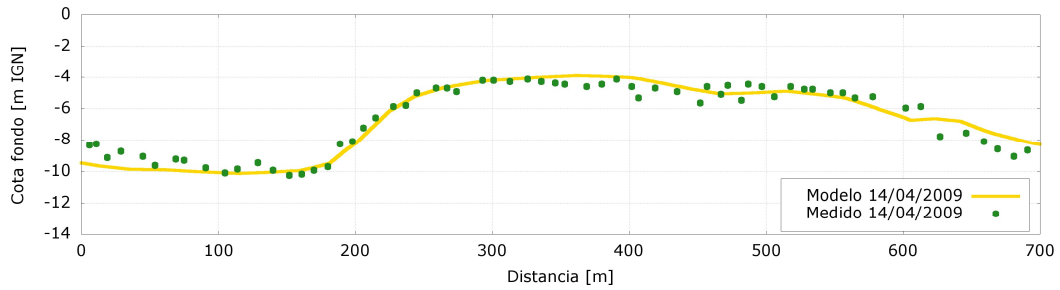


b) 05 de agosto de 2009

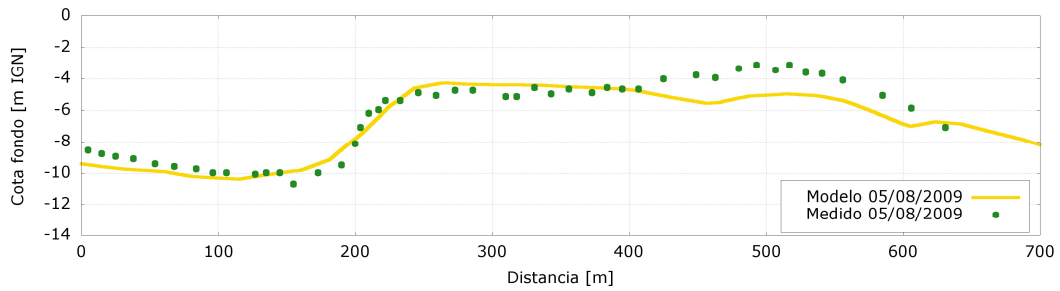


c) 28 de octubre de 2009

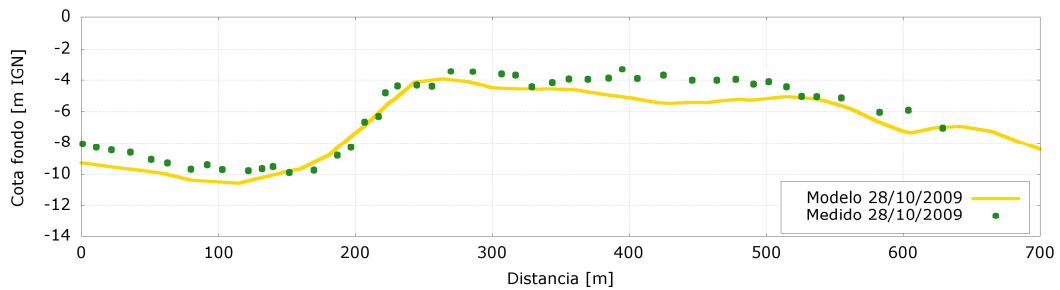
**Figura 4.24.** Perfiles batimétricos simulados (línea amarilla) y medidos (puntos verdes) sobre la línea 01 en diferentes momentos



a) 14 de abril de 2009

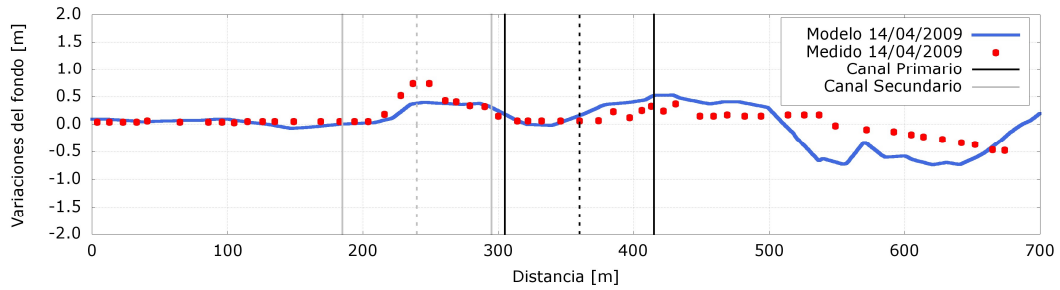


b) 05 de agosto de 2009

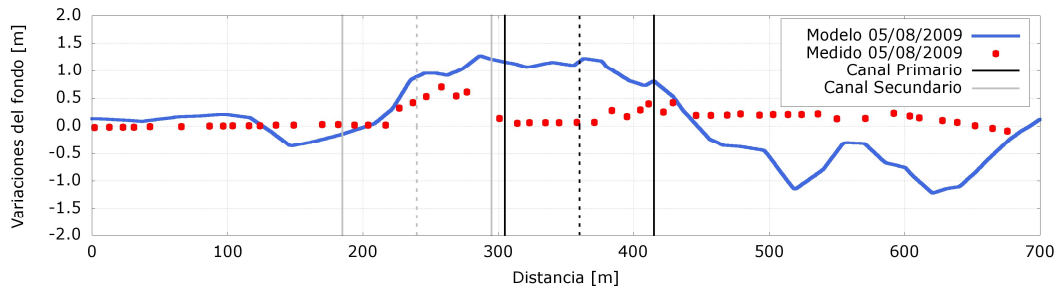


c) 28 de octubre de 2009

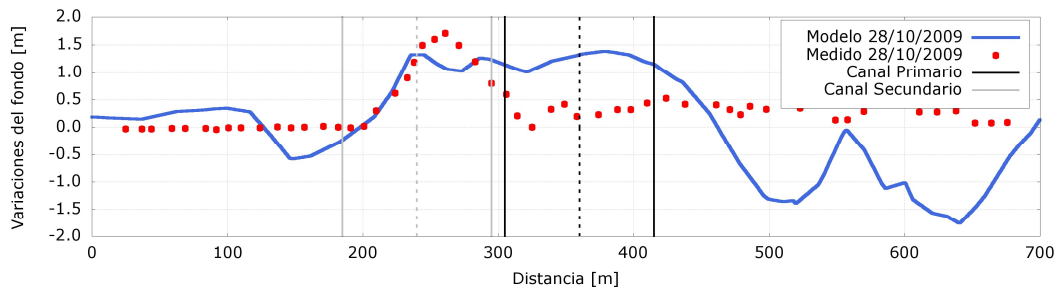
**Figura 4.25.** Perfiles batimétricos simulados (línea amarilla) y medidos (puntos verdes) sobre la línea 02 en diferentes momentos



a) 14 de abril de 2009

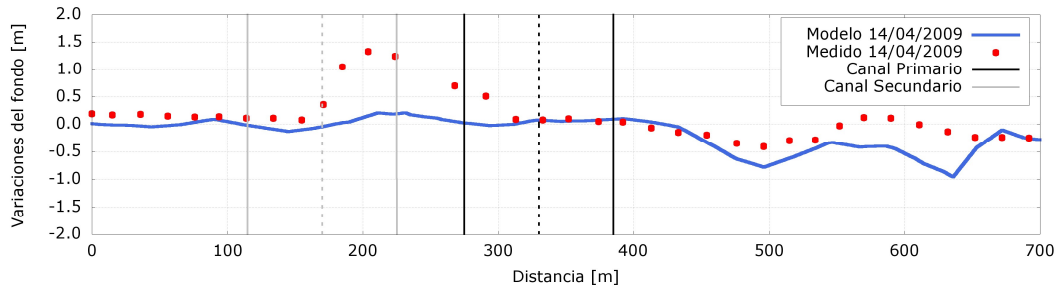


b) 05 de agosto de 2009

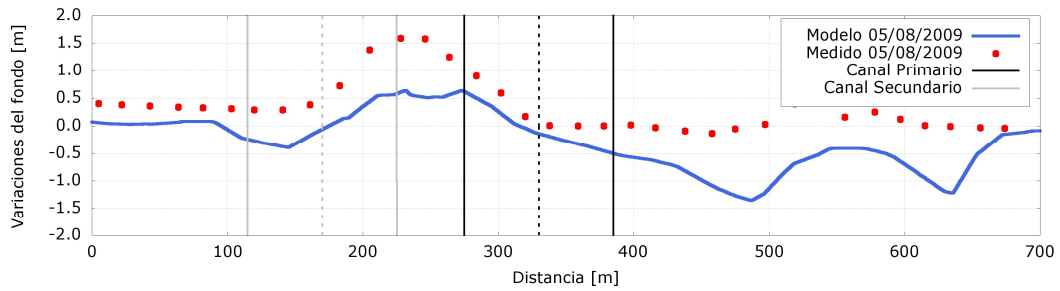


c) 28 de octubre de 2009

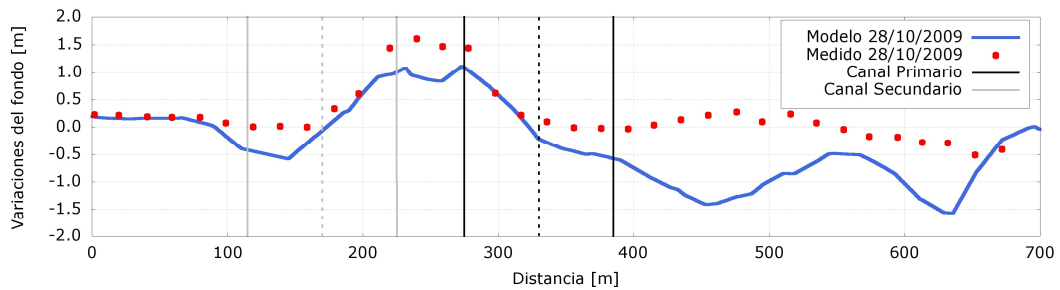
**Figura 4.26.** Variaciones batimétricas simuladas (línea amarilla) y medidas (puntos verdes) sobre la línea 01 en diferentes momentos



a) 14 de abril de 2009



b) 05 de agosto de 2009



c) 28 de octubre de 2009

**Figura 4.27.** Variaciones batimétricas simuladas (línea amarilla) y medidas (puntos verdes) sobre la línea 01 en diferentes momentos

#### 4.7 Modelación Local en el entorno de la ciudad de Las Toninas.

Tal como se vió en el capítulo anterior, otra zona de interés para estudiar en detalle, por la infraestructura comprometida, es la correspondiente a la localidad de Las Toninas. Para esto se implementó un modelo local (DL-LT), de 40 km de extensión a lo largo de la costa y 11,5 km de ancho y un modelo de detalle (DD-LT), anidado al local y que toma como condiciones de borde los resultados de este último, que se desarrolla 11,5 km a lo largo de la costa y 3,5 km en forma perpendicular a la misma. El modelo local incluye las localidades de Las Toninas, San Clemente del Tuyú y Costa Azul. El dominio de ambos modelos se puede ver en la Figura 4.28.

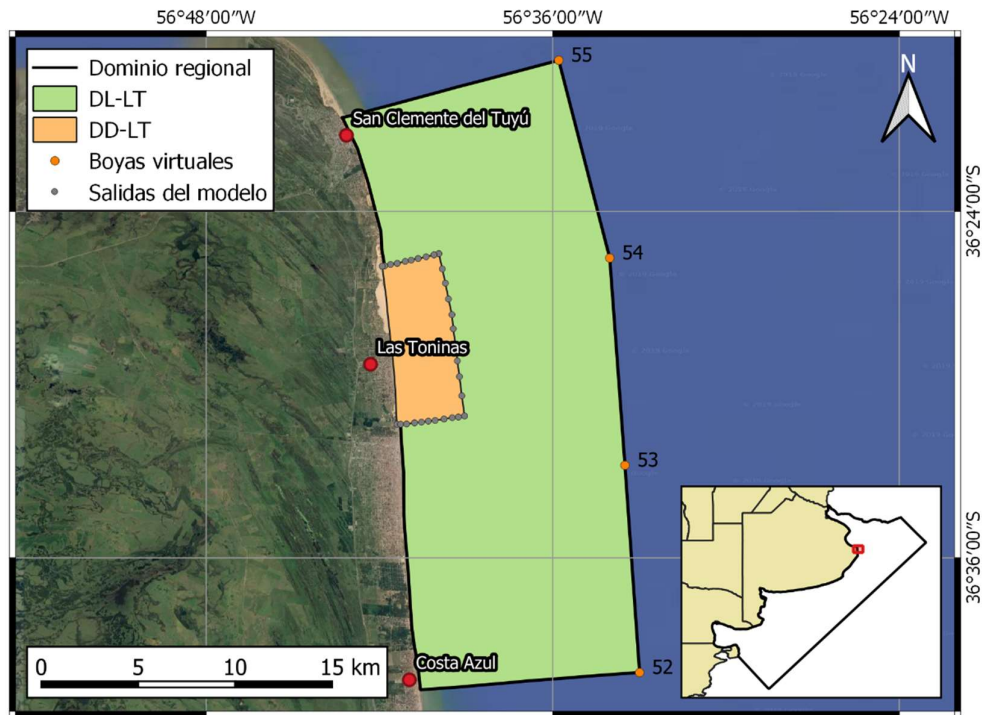


Figura 4.28 Dominio del modelo local y de detalle de la zona de Las Toninas.

##### 4.7.1 Batimetría, discretización, parámetros físicos y forzantes

Para el armado Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo del modelo local y del modelo de detalle se utilizaron datos batimétricos obtenidos de cartas del Servicio de Hidrografía Naval (Tabla 4.2). Los MDE resultantes para el modelo local y de detalle se presentan en la Figura 4.29.

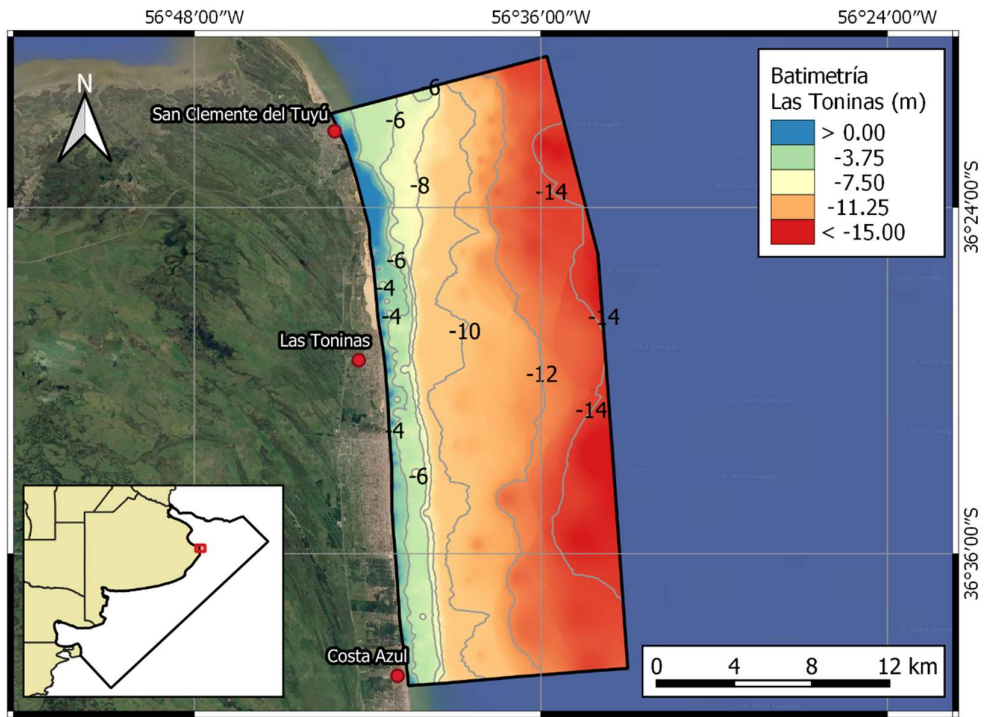
Las grillas de discretización se materializaron con elementos triangulares. Para el modelo local se utilizó una sola textura de elementos en todo el dominio mientras que para el modelo de detalle se definieron 3 texturas (Figura 4.30). En la Tabla 4.5 se describen los detalles de las grillas utilizadas.

Los parámetros físicos, tanto del modelo local como del modelo de detalle, son similares a los del modelo hidrodinámico regional y pueden verse en la sección 4.3.6.

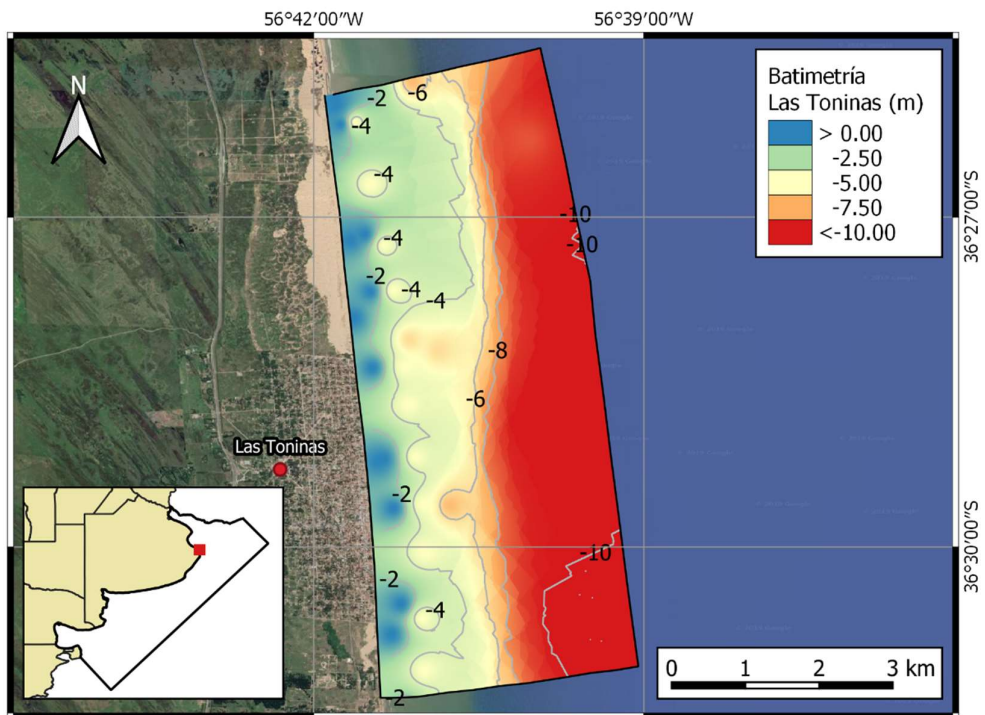
En lo referido a los forzantes, para disminuir el costo computacional de los modelos locales, dado que la escala de representación así lo permitía, se optó por utilizar una formulación paramétrica de desacoplado direccional en lo que refiere a la formulación espectral del oleaje, y una formulación cuasi estacionaria en la formulación temporal. A su vez, se adoptó una discretización del oleaje en 16 direcciones que cubrieran los 360° y una resolución de la discretización geográfica de bajo orden, que permite una simplificación del algoritmo de cálculo. Para el módulo hidrodinámico se adoptó una condición de marea constante e igual a 0 m.

**Tabla 4.5.** Caracterización de las grillas de cálculo

	Modelo local	Modelo detalle		
		1	2	3
Textura	-	1	2	3
Paso medio (m)	250	250	90	30
Área máxima (km <sup>2</sup> )	440	12	13	9
Cantidad de elementos	13853	838	5410	29164
Rango de profundidades (m)	0 - -16	-5 - -10	-5 - -10	0 - -7

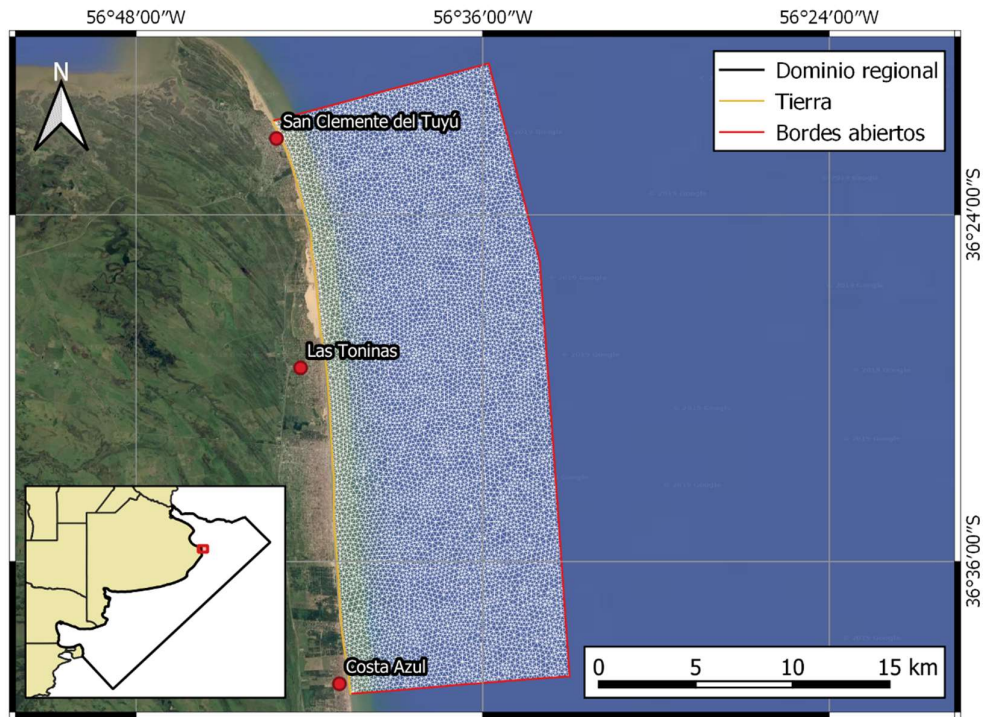


a) Modelo Local (DL-LT)

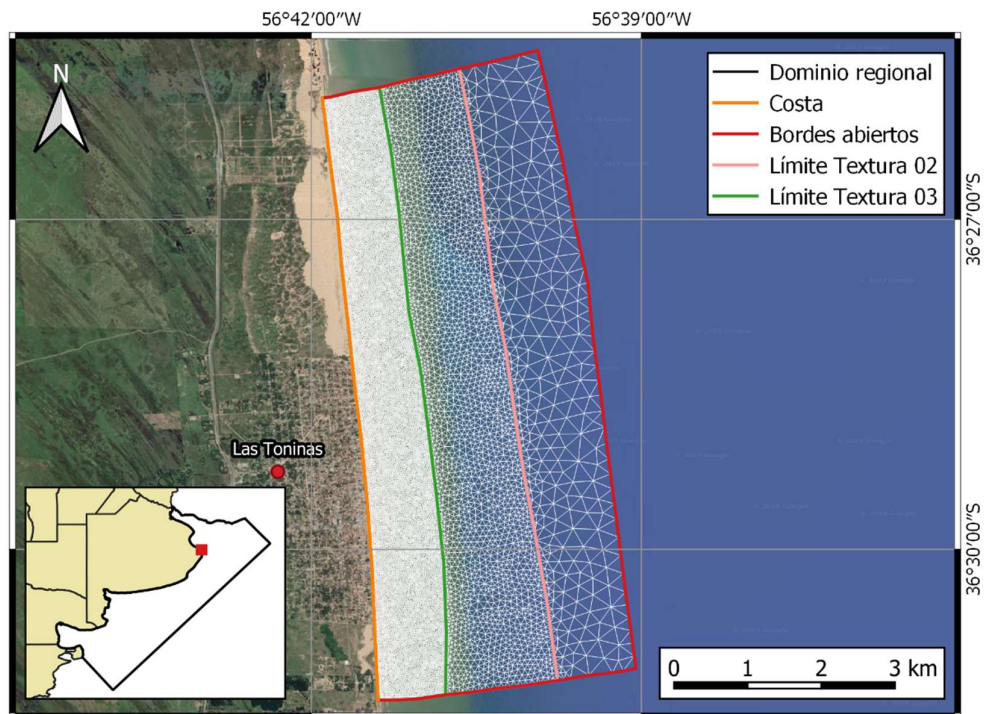


b) Modelo de detalle (DD-LT)

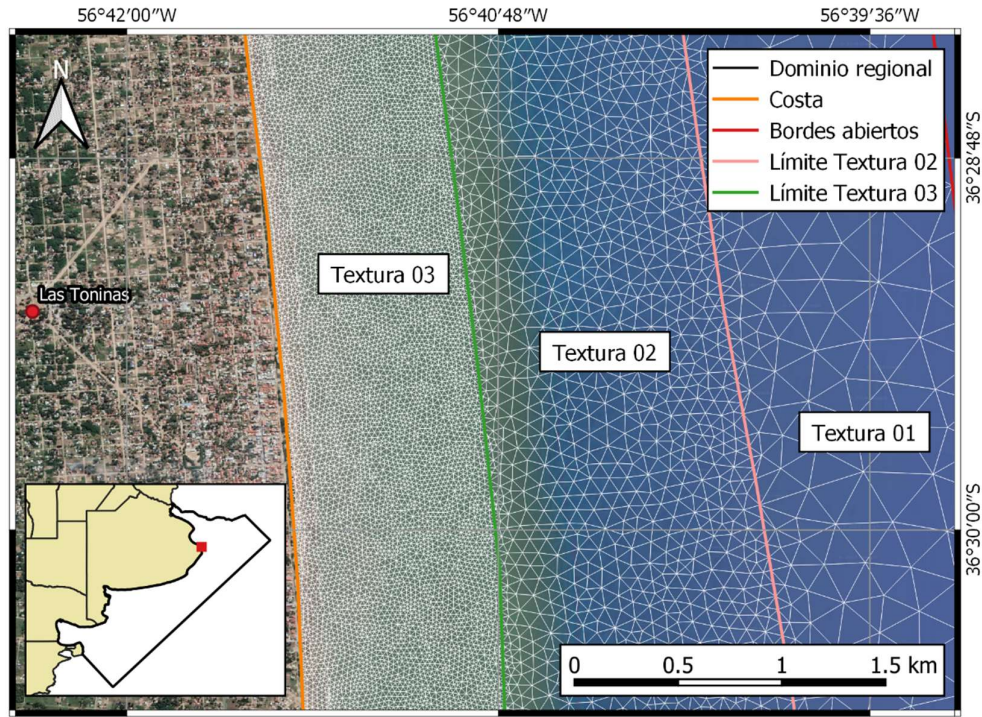
Figura 4.29. Modelos Digitales de Elevación (MDE) del fondo.



a) Modelo local (DL-LT).



b) Modelo detalle (DD-LT)



c) Zoom en el modelo de detalle DD-LT

Figura 4.30. Grillas de cálculo.

## 5 ANÁLISIS DE IMPACTOS DE DIFERENTES INTERVENCIONES EN ZONAS COSTERAS PILOTO

### 5.1 *Introducción*

En el presente capítulo se plantean tres alternativas distintas como soluciones a cada uno de los problemas presentados en el punto 3.1. Con esto se busca principalmente demostrar la gran utilidad y versatilidad de la modelación numérica como herramienta para proponer y evaluar la eficacia de distintas soluciones que podrían abordar un determinado problema.

En línea con todo lo expuesto hasta el momento, las alternativas analizadas buscan no sólo resolver el problema puntual, sino también tener en cuenta al entorno costero como un todo en el que se deben proponer soluciones integrales evitando generar conflictos en zonas aledañas. Además, cuando sea posible, se priorizará la adopción de soluciones del tipo blandas, evitando obras de ingeniería duras e inmóviles, puesto que estas tienen a generar desequilibrios en la dinámica costera (ver punto 3.1). De esta forma, se tratarán tanto soluciones del tipo clásico, como nuevas aplicaciones que están comenzando a aparecer frente a los nuevos conocimientos adquiridos en los últimos años.

### 5.2 *Bahía de los vientos*

Para este primer caso se optó por simular la implementación de un by-pass de sedimentos, que tome arena en una zona de acumulación, como podría ser el sector de playa en crecimiento que se encuentra junto a la escollera Sur, y la deposite en una zona que se encuentre actualmente en retroceso, como es el caso de Bahía de los vientos. De esta forma no sólo se puede restablecer el régimen de deriva que había previo a la construcción de las escolleras del puerto, sino que además se evita que ésta pase por el canal de acceso, garantizando así la perdurabilidad del calado en este último.

Para simular esta intervención se modeló una fuente que erogue un caudal líquido conteniendo una determinada concentración de sólido, que en este caso era la arena presente en las playas de Necochea. A su vez, para poner a prueba la versatilidad de este tipo de soluciones, se probaron dos ubicaciones distintas de esta fuente y dos tipos de oleaje para cada una de ellas, para analizar qué ocurre en situaciones frecuentes, pero de características diferentes.

Este análisis replica la metodología expuesta por Reyes Cabañas (2015), que consiste en 3 etapas:

- Estimar la deriva litoral de la zona, sin tener en cuenta la presencia de las escolleras del puerto.

- Evaluar distintas ubicaciones de la fuente en función de la hidrodinámica actual de la zona.
- Analizar el impacto del by-pass a partir de la evolución de los perfiles de playa de la zona.

El primer paso se efectuó en el Informe 4.1, resultando en una deriva litoral de 10,26 kg/s. El segundo punto es el que se trata a continuación, para lo cual se adoptó un caudal líquido de 0,5 m<sup>3</sup>/s con una concentración de 20 kg/m<sup>3</sup> para todos los casos, resultando en un caudal sólido de 10 kg/s. El tercer punto no será tratado en este informe, por lo que quedará para una posterior evaluación en caso de que se desee continuar profundizando sobre la aplicación de esta alternativa.

Respecto al oleaje, en todos los escenarios se simuló una ola constante con características fijas durante el tiempo de simulación, con el objetivo de representar situaciones frecuentes en condiciones controladas, para así poder hacer un mejor análisis comparativo. Las olas adoptadas son:

- Tipo I:
  - Altura significativa:  $H_s = 2$  m.
  - Período pico:  $T_p = 10$  s.
  - Dirección media:  $MWD = 210^\circ$ .
  - Dispersión direccional:  $DS = 5^\circ$ .
- Tipo II:
  - Altura significativa:  $H_s = 1$  m.
  - Período pico:  $T_p = 7$  s.
  - Dirección media:  $MWD = 157^\circ$ .
  - Dispersión direccional:  $DS = 5^\circ$ .

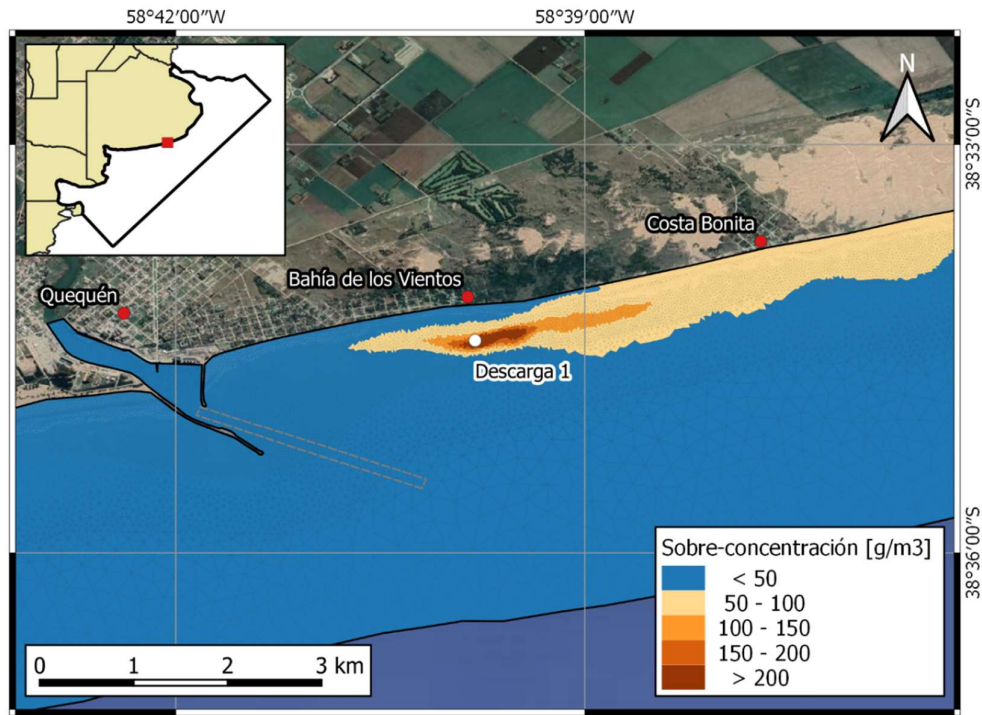
En cuanto a las posiciones de las fuentes, se determinaron analizando los vectores de velocidades del modelo calibrado, optando por una primera ubicación en frente a Bahía de los vientos y una segunda en un punto medio entre Bahía de los vientos y la escollera Norte.

Los resultados para las distintas combinaciones pueden observarse en las figuras siguientes, de las que se destaca lo siguiente:

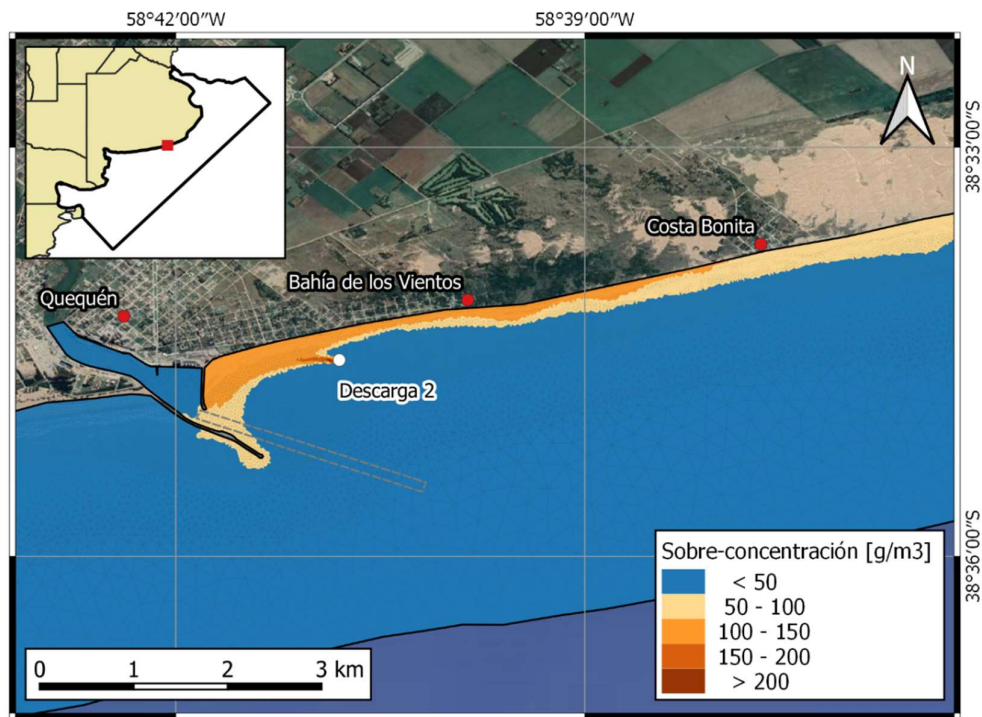
- Para el caso de la Descarga 1 con oleaje Tipo I (Figura 5.1a) se observa una elevada concentración de sedimento en las proximidades de la fuente y una progresiva disminución de esta con sentido hacia Costa Bonita, pero nada de esto va a parar a las playas de Bahía de los vientos.
- La segunda posición con oleaje Tipo I (Figura 5.1b) resulta en una mejor distribución del sedimento, en forma uniforme a lo largo de toda el área de interés, pero también propagándose hacia la entrada del puerto, lo que podría resultar en un aumento en la tasa de sedimentación del canal de acceso.
- Para la Descarga 1 con oleaje Tipo II (Figura 5.2a) las máximas concentraciones se materializan directamente en las proximidades de Bahía de los vientos. Aunque no alcanzan sus costas, un importante abastecimiento de material en sus proximidades

podría disminuir significativamente el desequilibrio actual. Como contrapartida se observa que parte del material termina en el canal de acceso al puerto, aunque en menor medida que para el caso anterior.

- Por último, para la segunda posición con oleaje Tipo II (Figura 5.2b) se puede observar el caso más desfavorable de todos, en el que el sedimento se dirige contra la escollera Norte y luego atraviesa el canal de acceso, evitando en su totalidad la zona de interés.

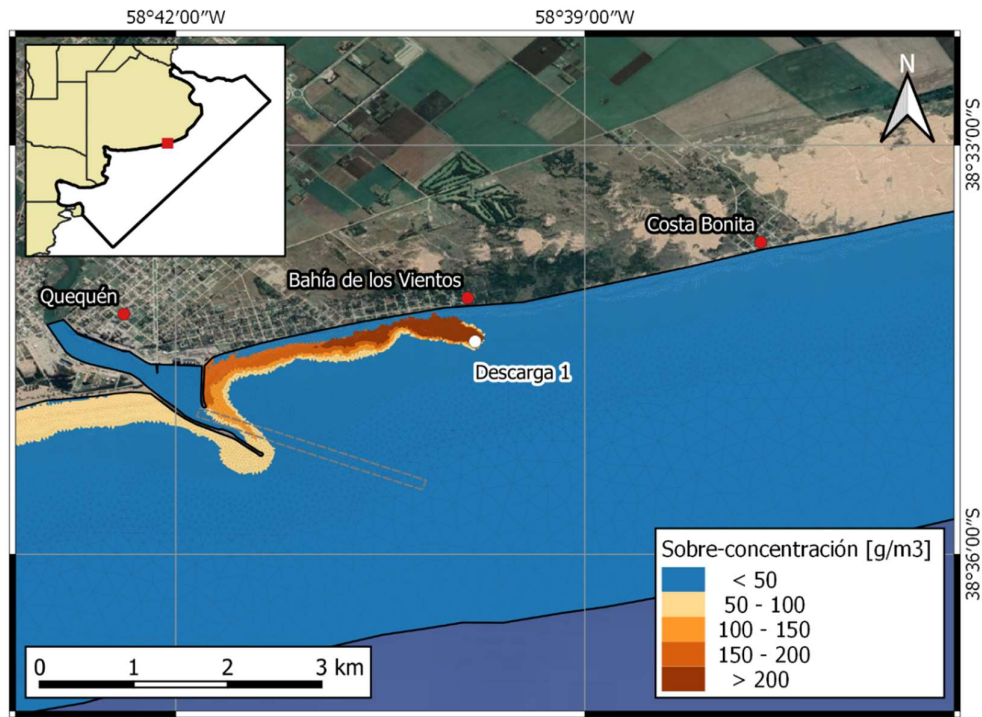


a) Descarga 1, oleaje Tipo I.

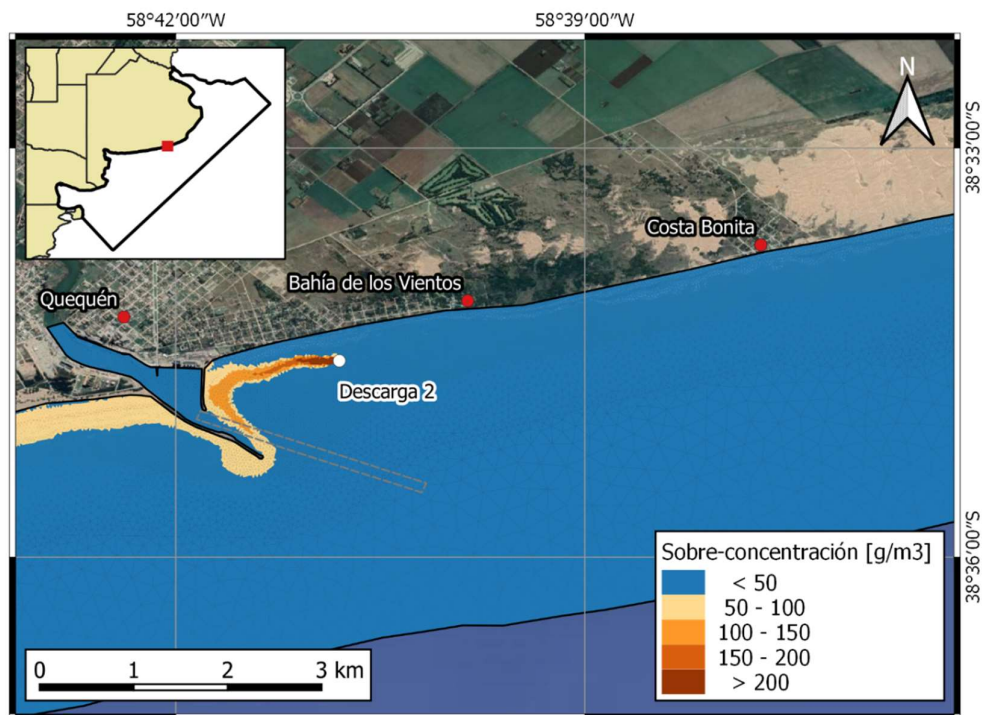


b) Descarga 2, oleaje Tipo I.

Figura 5.1. Sobre-concentración media producida por la descarga del by-pass con oleaje Tipo I.



a) Descarga 1, oleaje Tipo II.



b) Descarga 2, oleaje Tipo II

Figura 5.2. Sobre-concentración media producida por la descarga del by-pass con oleaje Tipo I.

Debe remarcar que los resultados de este análisis no son taxativos, sino que son una primera aproximación a la solución del problema planteado, por lo que correspondería probar con una mayor cantidad de tipos de ola distintos para simular todas las combinaciones posibles.

A pesar de lo anterior, algo a destacar de estos ensayos es que se pone en evidencia la influencia de la dirección del oleaje en la deriva litoral, la cual en ocasiones se dirige en sentido opuesto al establecido en el punto 3.1.1. Como consecuencia, uno de los numerosos aspectos a tener en cuenta al aplicar este tipo de soluciones es el rango de condiciones hidrodinámicas en las cuales corresponde operar el by-pass para que el sedimento se dirija hacia la ubicación deseada.

Como se mencionó anteriormente, restaría evaluar la evolución del perfil de playa en Bahía de los vientos teniendo en cuenta este nuevo aporte de sedimentos. Dado que se trata de una modelación similar a la ya efectuada en el informe 4.1, este último paso no fue llevado a cabo. Cabe resaltar sin embargo, que esto es algo sumamente necesario para poder determinar la eficacia de cada alternativa, por lo que debe hacerse en caso de querer profundizar en la aplicación de esta solución.

### 5.3 Puerto de Mar del Plata

En este caso se optó por poner a prueba una intervención similar a la propuesta por Luteijn (2013), que consiste en la implementación de dos trampas de arena en las proximidades de la escollera Sur. El objetivo es que el sedimento se deposite en una zona en donde no interfiera con las operaciones diarias del puerto y a su vez permita un fácil y más económico mantenimiento respecto de la situación actual, que implica efectuar dragados en el acceso al puerto, interfiriendo con el normal desarrollo de sus actividades.

De esta forma, se elaboró una corrida idéntica a la utilizada para la calibración del modelo, pero con dos modificaciones batimétricas, para representar las trampas de arena a -8 m y -11 m de profundidad (Figura 5.3).

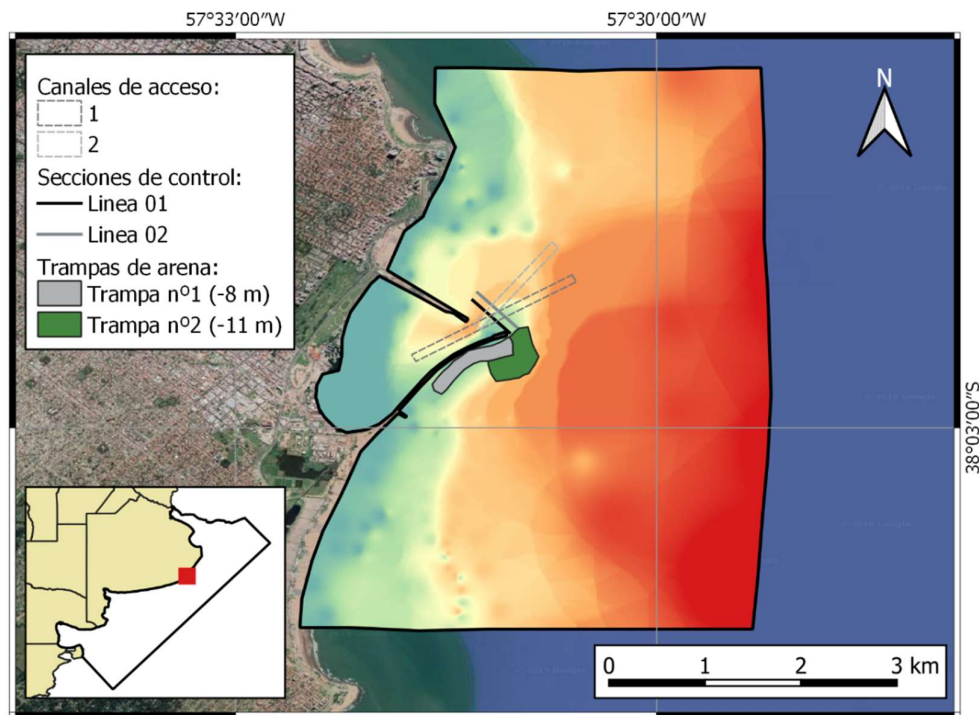
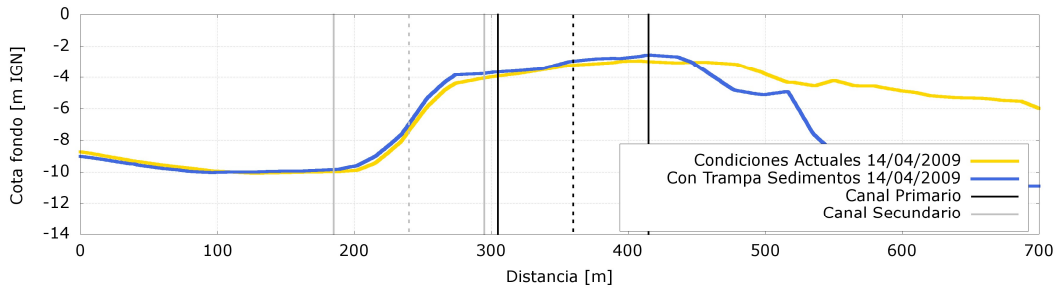
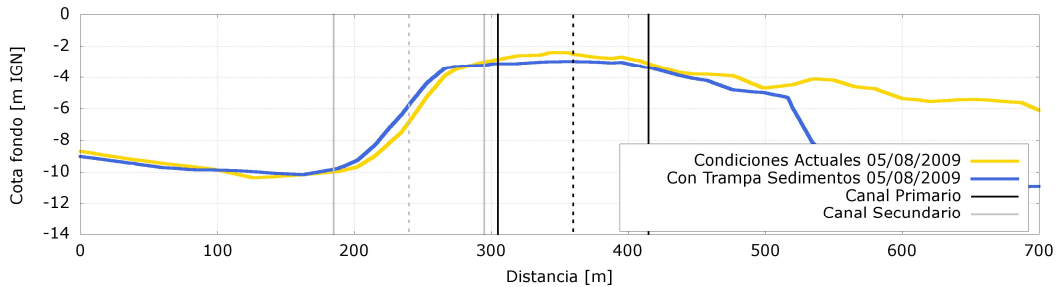


Figura 5.3. Trampas de arena al pie de la escollera Sur.

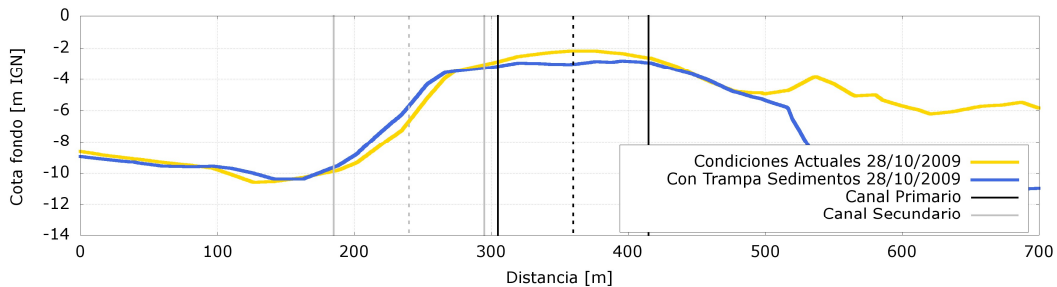
Si se analizan las secciones de control que se utilizaron en el punto 4.6.2 resulta que los cambios morfológicos no necesariamente son positivos: en la Línea 01 el canal principal se ve beneficiado por un aumento en sus profundidades de 1 m aproximadamente y el canal secundario se ve perjudicado en la misma cantidad (Figura 5.4), mientras que en la Línea 02 los cambios son prácticamente despreciables (Figura 5.5).



a) 14 de abril de 2009

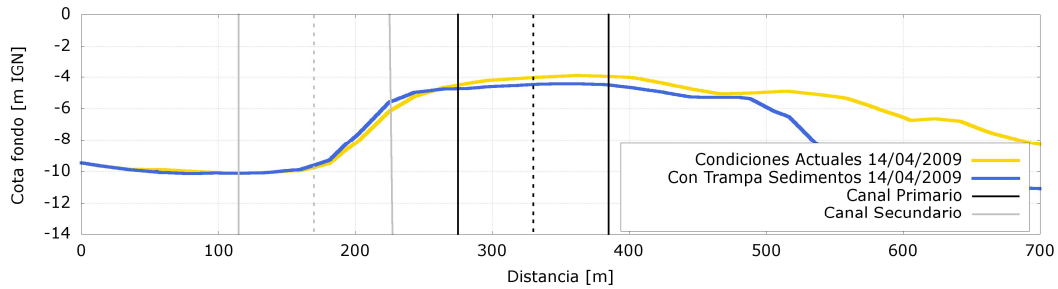


b) 05 de agosto de 2009

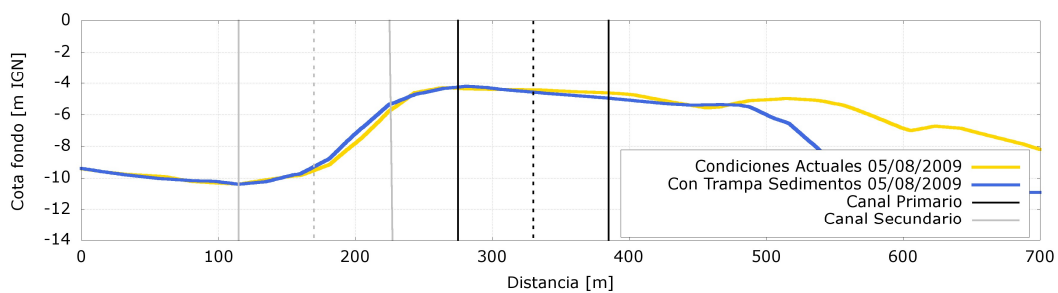


c) 28 de octubre de 2009

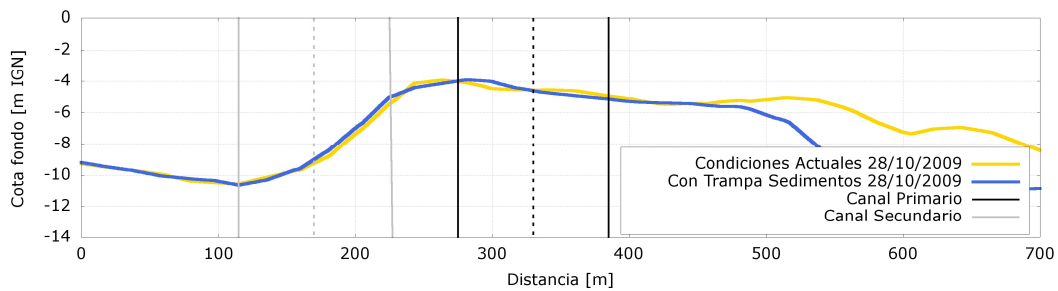
**Figura 5.4.** Perfiles batimétricos simulados en condiciones actuales (línea amarilla) y con trampa de sedimentos (línea azul) sobre la línea 01 en diferentes momentos.



a) 14 de abril de 2009



b) 05 de agosto de 2009



c) 28 de octubre de 2009

**Figura 5.5.** Perfiles batimétricos simulados en condiciones actuales (línea amarilla) y con trampa de sedimentos (línea azul) sobre la línea O2 en diferentes momentos.

Sin embargo, si se tiene en cuenta la totalidad de la extensión de ambos canales, pueden apreciarse mejores resultados. En la Figura 5.6 se muestra la diferencia entre los cambios relativos del lecho para los casos con y sin trampas de sedimentos, reflejando acumulaciones a lo largo de toda la trampa n°1 y en un extremo de la trampa n°2. Un comportamiento similar puede observarse en el trabajo de Luteijn (2013), en el que si bien no puede hacerse una comparación tan directa con este caso dadas las diferencias entre los modelos y entre las trampas de arena adoptadas, se observan mayores retenciones en las mismas áreas.

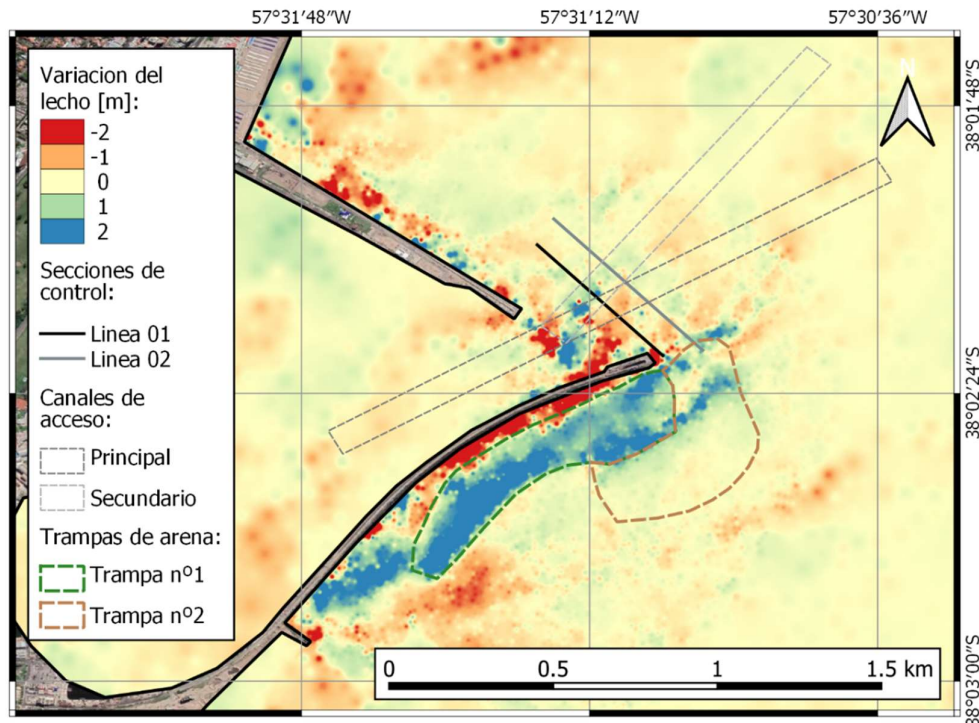


Figura 5.6. Variación del lecho entre las simulaciones con y sin trampas de arena.

Ahora bien, este diseño presenta también condiciones de acceso desfavorables, ya que a pesar de que aparecen dos zonas en el canal principal con mayores profundidades, también se hacen presentes otras dos zonas en donde el lecho disminuye en profundidad, afectando a ambos canales.

Con lo anterior surgen dos conclusiones importantes: por un lado se podría trabajar en un mejor diseño de las trampas utilizadas para no incurrir en costos innecesarios (la gran mayoría de la segunda trampa podría evitarse). Por el otro, con este tipo de medidas se disminuye considerablemente la superficie de obstrucción en la entrada al puerto, lo que disminuiría las actividades de dragado necesarias para garantizar el calado óptimo.

#### 5.4 Las Toninas

Como medida para contrarrestar la erosión presente en Las Toninas, se plantea a modo de prueba la construcción de tres espigones paralelos a la costa, tal como se hizo al Sur de Punta Mogotes (Sciarrone et al., 2012). Para ello, se hizo un pre-dimensionamiento de estas estructuras siguiendo las recomendaciones del Coastal Engineering Manual del US Army Corps of Engineers (2008), a partir de las que se definieron los siguientes parámetros:

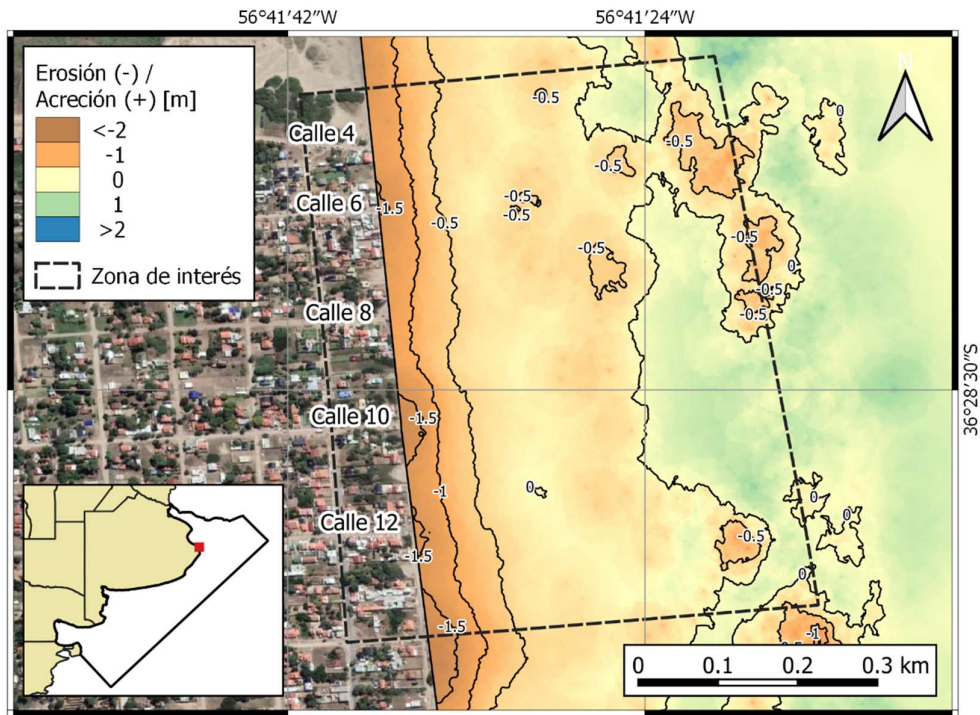
- Distancia a la costa:  $Y = 380$  m.
- Separación entre ejes de espigones:  $S = 500$  m.
- Longitud de cada espigón:  $B = 120$  m.
- Ancho de cada espigón:  $X = 30$  m.

Tal como en el punto 5.2, en este caso se puso a prueba la solución propuesta sometiénola a dos tipos de ola distintos para evaluar la respuesta de la obra en ambos casos respecto del escenario sin intervención. En este caso, los tiempos de simulación son de dos meses con un factor de aceleración morfológica de 3, por lo que equivale a un período de 6 meses. Los tipos de ola simulados fueron representados por las siguientes variables:

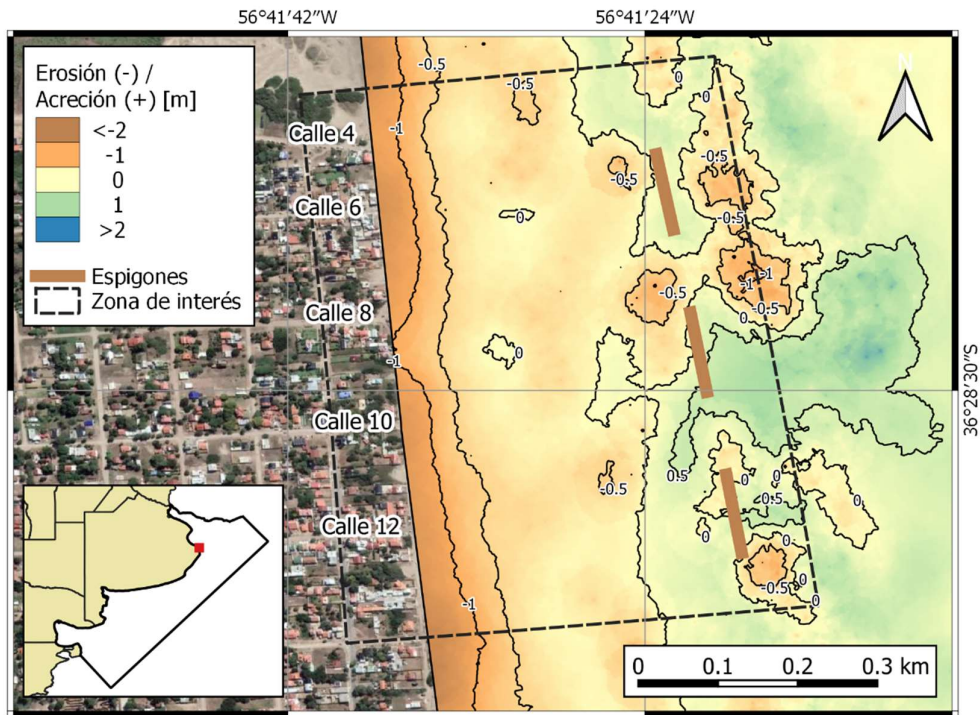
- Tipo I:
  - Altura significativa:  $H_s = 0.75$  m.
  - Período pico:  $T_p = 5$  s.
  - Dirección media:  $MWD = 135^\circ$ .
  - Dispersión direccional:  $DS = 5^\circ$ .
  
- Tipo II:
  - Altura significativa:  $H_s = 0.75$  m.
  - Período pico:  $T_p = 6$  s.
  - Dirección media:  $MWD = 157.5^\circ$ .
  - Dispersión direccional:  $DS = 5^\circ$ .

Para el primer caso se observa en la Figura 5.7 que hay un aumento de las zonas de acreción entre los espigones y la línea de costa, que puede verse por la modificación de las curvas de nivel de variación del lecho de 0 m y -0.5 m, que se ubican más próximas a la costa con la implementación de los espigones. También por la desaparición de la curva de -1.5 m respecto del escenario original, que se observa en el entorno de las calles 6, 10 y 12. En el tramo entre las calles 8 y 10 se observa además la desaparición de la curva de -1 m.

Otro resultado interesante es el que se obtiene de restar las variaciones morfológicas del escenario original al del escenario con espigones, que puede observarse en la Figura 5.8. Entre las calles 8 y 12 puede verse una tendencia positiva alternada con sectores sin modificaciones en la zona más próxima a la costa, mientras que en las proximidades de los espigones hay zonas con tendencia erosiva, posiblemente producto de la modificación de la hidrodinámica por la presencia de estas estructuras, que encausan al flujo por los espacios que hay entre estas.



a) Evolución morfológica sin espigones



b) Evolución morfológica con espigones

Figura 5.7. Variación del lecho para las simulaciones con y sin espigones, oleaje Tipo I.

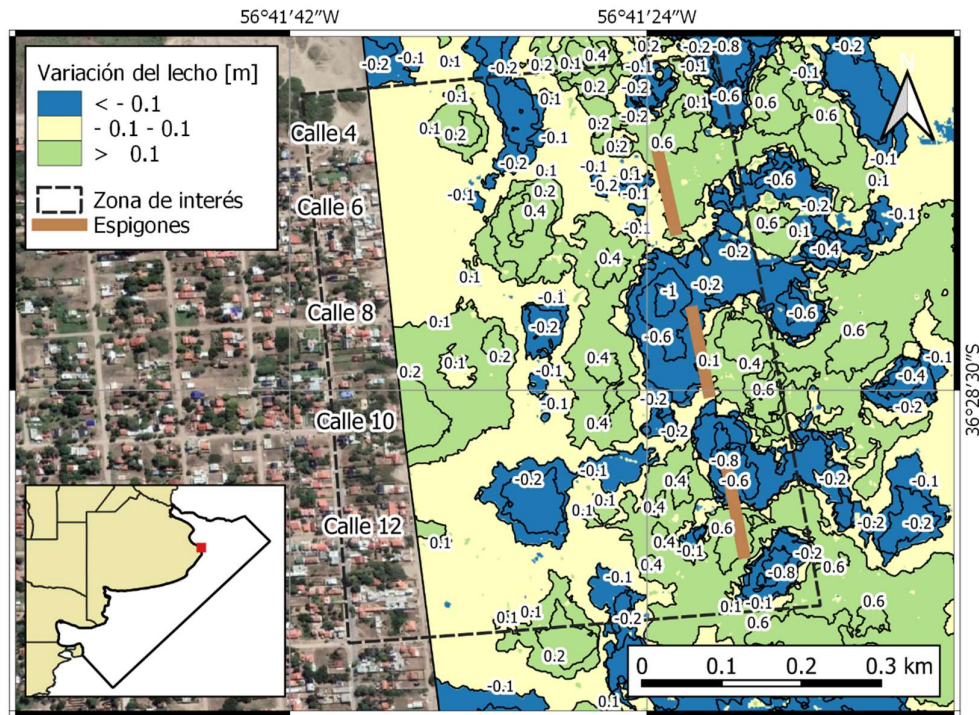
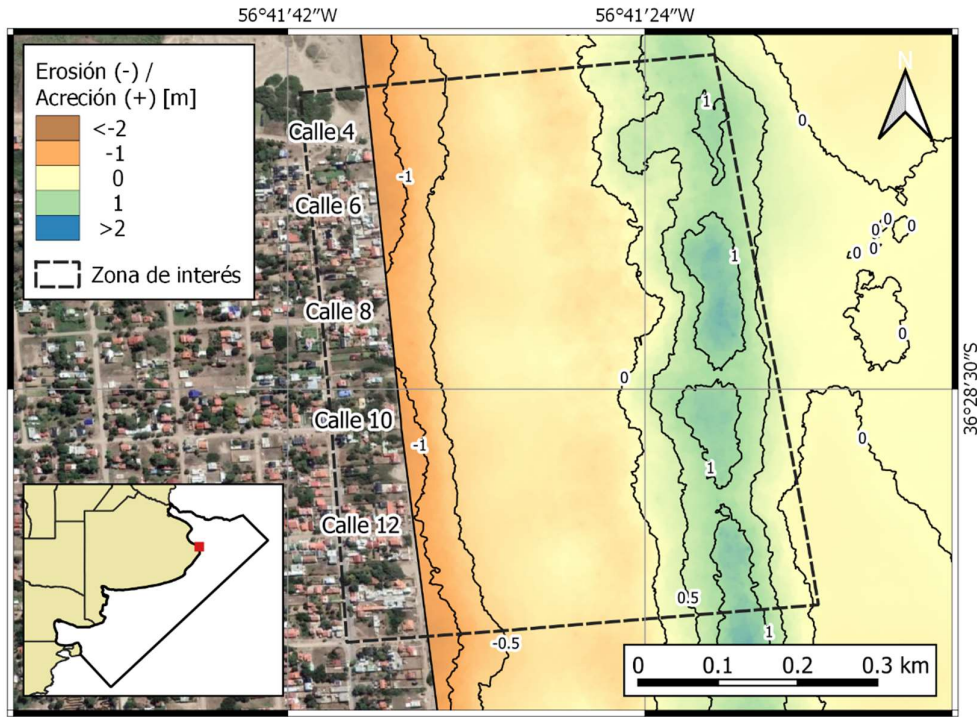


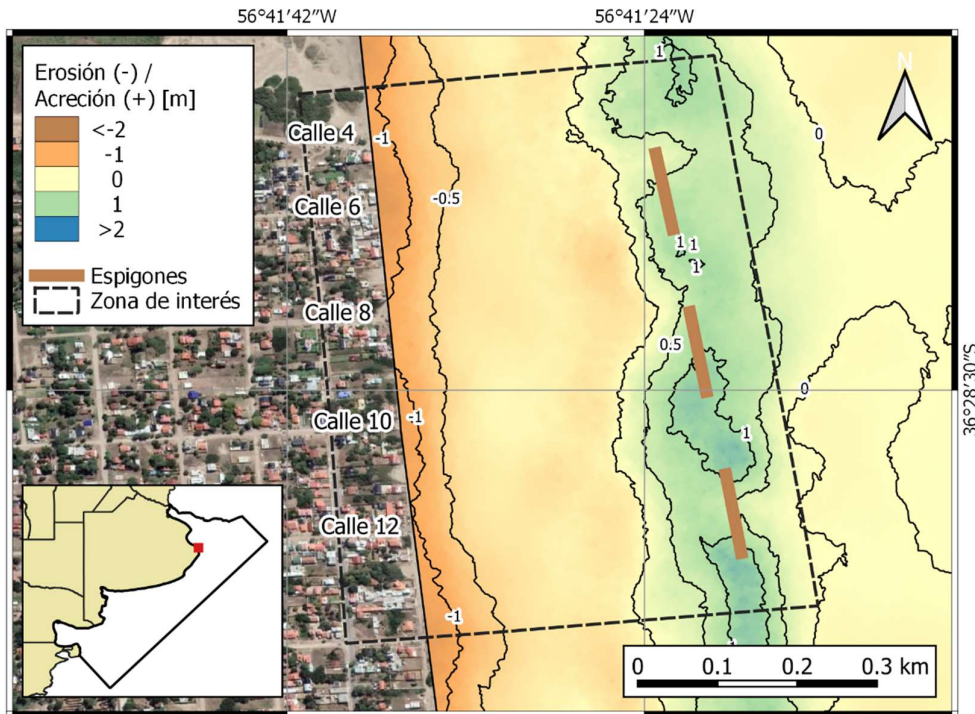
Figura 5.8. Variación del lecho entre las simulaciones con y sin espigones, oleaje Tipo I.

En el segundo caso, si bien se trata de una ola con característica no tan frecuentes, los resultados no son tan beneficiosos. Como puede observarse en la Figura 5.9 en el entorno de las calles 4 y 12 hay un leve movimiento de la curva de nivel de variación del lecho de -1 m que se aproxima hacia la costa con la presencia de los espigones. Sin embargo, con estos también hay un avance de la curva de -0.5 m hacia mar adentro y lo mismo ocurre con la curva de -1 m que se encuentra en las proximidades de la calle 8. Los mayores beneficios se ven en el entorno de los espigones, en donde las curvas de 0 m y 0.5 m se desplazan levemente hacia la costa.

Si analizamos ahora la diferencia entre el caso con espigones y el caso sin estos (Figura 5.10), se puede ver claramente como en el entorno de la calle 6 el escenario con espigones es peor que el escenario original, mientras que en el resto de la franja costera más próxima las variaciones son prácticamente nulas. Esto último era esperable, puesto que el ángulo entre la dirección del oleaje y la de los espigones no es un ángulo aproximadamente recto, por lo que la acción protectora de estos pierde eficacia.



a) Evolución morfológica sin espigones



b) Evolución morfológica con espigones

Figura 5.9. Variación del lecho para las simulaciones con y sin espigones, oleaje Tipo II.

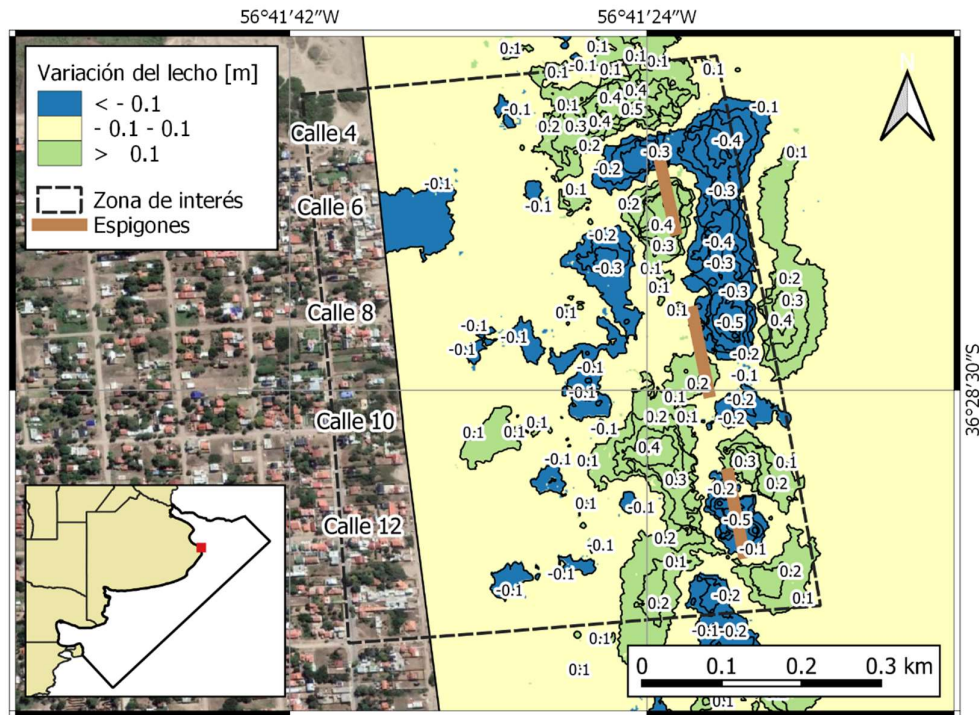


Figura 5.10. Variación del lecho entre las simulaciones con y sin espigones, oleaje Tipo II.

Como principales conclusiones de esta intervención puede remarcarse que si bien no se alcanzó una situación de acreción generalizada o al menos un equilibrio morfológico en la zona de interés, sí hay una mejora respecto de la situación original. Esto lleva a pensar que se podrían obtener incluso mejores resultados haciendo pruebas adicionales para perfeccionar el diseño y la ubicación de los espigones paralelos.

Claro está que la acción benéfica de los espigones se hace presente en casos en los que el oleaje tiene una dirección más bien perpendicular a estos. Es por ello que si se deseara continuar profundizando en la viabilidad de esta alternativa, se debería continuar los ensayos con otros tipos de ola, e incluso podría modificarse la forma y la orientación de los espigones, por ejemplo acercándolos a la costa o dándoles una forma curvilínea para que puedan absorber mejor la energía provista por oleajes de distintas direcciones.

## 6 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones respecto al análisis de impactos y riesgos en las zonas costeras pilotos se detallan a continuación:

- La evaluación del riesgo costero mostró altos índices de peligrosidad para las tres zonas piloto estudiadas, los mismos fueron caracterizados por los impactos esperables en términos de erosión costera e inundación de la playa debido a la ocurrencia de temporales extremos.
- A pesar de ello, los niveles de riesgo obtenidos en la mayoría de los escenarios analizados para los tres sitios fueron caracterizados como *bajo*, lo cual se explica por los bajos índices de vulnerabilidad indicados para la zona según los estudios realizados por Merlotto et al. (2017). La excepción resulta ser Mar del Plata, dónde para escenarios asociados a períodos de retorno a partir de 20 años el riesgo comienza a ser *moderado*.
- La zona de Las Toninas mostro los índices de peligrosidad más elevados (3.5 a 4.5), tanto por el impacto en erosión como en inundación, donde incluso pueden esperarse eventos de sobrepaso con caudales moderados para temporales con períodos de retorno superiores a los 20 años. Esto indica que se trata de un área sensible, donde un incremento futuro en los niveles de vulnerabilidad (asociado al desarrollo socio-económico de la población) podría derivar en una elevación considerable de los índices de riesgo.
- En segundo término en cuanto a la magnitud de la peligrosidad se ubicó Mar del Plata (2.5 a 4) dónde el impacto más importante resulta en términos de erosión del perfil de playa. Por último, Bahía de los viento mostró los índices de peligrosidad menores (2.5 a 3.5), donde también se destaca la erosión por la acción de temporales.

En relación a las tareas de modelación, las principales conclusiones son:

- Se desarrollaron e implementaron modelos de diferentes escalas (regionales y locales) y que resuelven diferentes problemas físicos (modelos hidrodinámicos, modelos de oleaje, modelos sedimentológicos y morfológicos)
- Se utilizó el sistema de modelación MIKE 21 cuya licencia, perteneciente a la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH), fue puesta en valor durante esta Asistencia Técnica.

- Los modelos implementados buscan demostrar la gran utilidad y versatilidad de la modelación numérica como herramienta para la gestión costera.
- En particular, con los modelos numéricos desarrollados se estudiaron los impactos morfodinámicos de diferentes intervenciones en las zonas pilotos.
- Se estudiaron en el entorno de los Puertos de Quequén y Mar del Plata, soluciones del tipo blandas (by pass de arenas y trampas de sedimentos, respectivamente), evitando obras de ingeniería duras e inmóviles, puesto que estas tienen a generar desequilibrios en la dinámica costera. En la zona de Las Toninas se estudió el impacto de espigones paralelos a la costa. De esta forma, se trataron tanto soluciones del tipo clásico, como nuevas aplicaciones que están comenzando a aparecer frente a los nuevos conocimientos adquiridos en los últimos años, mostrando que ambos tipos pueden ser abordados desde la modelación numérica.

## REFERENCIAS

- Bértola, G. (2006). Morfodinámica de playas del Sudeste de la provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 13(1), 31–57.
- Bértola, G.; Merlotto, A.; Cortizo, L.; e Isla, F. (2013). Playas de Bolsillo en Mar Chiquita Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70 (2): 267-278.
- Bértola, G.; del Río, L.; y Farenga, M. (2016). Relleno de playa en Honu Beach (Mar del Plata, Argentina). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* N° 37: 1-11.
- Bunicontro, P.; Marcomini, S.; y López, R. (2013). Zonificación de la erosión costera en la localidad de Santa Clara del Mar, provincia de Buenos Aires. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 31: 1-15.
- Cáceres, R. (2014). Hidrodinámica costera y evolución morfológica de una playa en presencia de estructuras de bajo coronamiento paralelas a la costa. Tesis doctoral presentada ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.
- Cáceres, R. (2016). Criterios de selección del clima de olas para el diseño de defensas de costas. IX Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria, Buenos Aires, Argentina.
- Cáceres, R., Zyserman, J. y Perillo, G. (2016). Analysis of Sedimentation Problems at the Entrance to Mar del Plata Harbor. *Journal of Coastal Research*, 32 (2), 301 – 314.
- Caviglia, F.; Pousa, J. y Lanfredi, N (1992). Transporte de sedimentos: Una alternativa de cálculo. II Congreso de Ciencias de la Tierra, Memorias (Santiago, Chile, Instituto Geográfico Militar de Chile), pp. 413–422.
- Codignotto, J.; Dragani, W.; Martin, P.; Simionato, C.; y Medina, R. (2011). Incremento de la Erosión en la Bahía Samborombón, Río de la Plata, Argentina. XVIII Congreso Geológico Argentino.
- Coastal Engineering Manual, US Army Corps of Engineers (2008). Manual n° 1110-2-1100, Part V, Chapter III – Shore protection projects, 116 pp.
- Dean, R. y Dalrymple, R. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, p. 488.
- DHI. (2012a). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. Horshølm, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 52p.
- DHI. (2012b). MIKE 21 Spectral Wave Module. Horshølm, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 66p.
- DHI. (2012c). Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. Horshølm, Denmark: DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 66p.
- DHI. (2016). MIKE 21, Tidal Analysis and Prediction Module. DHI Water & Environment, Inc. Scientific Documentation, 72p.
- D’Onofrio, E.; Fiore, M. y Mediavilla, D. (2006). Evolución de las ondas de tormenta en Mar del Plata durante el período 1956–2005. Resúmenes VI Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar y XVI Coloquio de Oceanografía IAPSO, 4 al 8 de diciembre de 2006. Puerto Madryn, Argentina, p. 164.
- Engelund, F. and Fredsøe, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7(1), 296–306.

- Estación Meteorológica Santa Teresita (2000). Delegación Meteorológica aeródromo de Santa Teresita. Municipio de la Costa, informe inédito, 32 p., Santa Teresita.
- EurOtop. (2007). Wave overtopping of sea defences and related structures – Assessment Manual. UK: N.W.H. Allsop, T. Pullen, T. Bruce. NL: J.W. van der Meer. DE: H. Schüttrumpf, A. Kortenhaus.
- Fernández, J. y Bértola, G. (2011). Evolución de la Línea de Costa y de la Urbanización entre Quequén y Costa Bonita. Revista Geográfica Digital. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 8. Nº 15.
- Fernández, J.; Bértola, G.; y Campo, A. (2017). Aplicación del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) a los Barrios Costeros del Partido de Mar Chiquita, Buenos aires, Argentina. Geoacta 42(1).
- Fiore, M.; D’Onofrio, E.; Pousa, J.; Schnack, E. y Bértola, G. (2009). Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. Continental Shelf Research 29 (2009) 1643–1649.
- Fredsøe, J. (1984). Turbulent Boundary Layer in Wave-current Motion. Journal of Hydraulic Engineering, 110 (8), DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:8(1103).
- García, M. (2011). Escenario de riesgo climático por sudestadas y tormentas en Mar del Plata y Necochea-Quequén, provincia de Buenos Aires, Argentina. Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium, Uberlândia, Vol. 2 (2): 286-304.
- Giardino, A.; van Rijn, L.; Quataert, E.; Warren, A.; Jeuken, A.; Nederhoff, K.; y Desramaut, N. (2017). SimpleCoast: Simple Assessments of Coastal Problems and Solutions. Proceedings of the Medcoast 17 Conference, 137-148, Malta.
- INA. (2019a). “Desarrollo de una base de datos estructurada para la costa de la provincia de Buenos Aires.”. Informe 3.1 Español. Proyecto INA 376, Informe LHA 04-376-19. Comitante: UNIDO/CTCN, abril 2019.
- INA. (2019b). “Taller de Validación”. Informe 3.2 Español. Proyecto INA 376, Informe LHA 05-376-19. Comitante: UNIDO/CTCN, abril 2019.
- INA. (2019c). “Análisis histórico de las variables de la dinámica costera”. Informe 4.1 Español. Proyecto INA 376, Informe LHA 06-376-19. Comitante: UNIDO/CTCN, diciembre 2019.
- INDEC (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010: indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2007). The Physical Basis Summary for Policymakers, <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>.
- Isla, F.; Bértola, G.; Farenga, M.; Serra, S.; y Cortizo, L. (1998). Villa Gesell: un desequilibrio sedimentario inducido por fijaciones de médanos. AAS Revista Vol. 5 (1): 41-51.
- Isla, F. (2006). Erosión y defensa costeras. En: Isla, F.I and Lasta, C.A. (eds.), Manual de Manejo costero para la Provincia de Buenos Aires. Mar del Plata, Argentina: EUDEM, pp. 125–147.
- Isla, F.; Bértola, G.; Merlotto, A.; Ferrante, A. y Cortizo, L. (2009). Requerimientos y disponibilidad de arenas para la defensa de las playas de Necochea y Lobería. Rev Asoc Geol Argent 65(3):446–456
- Isla, F. I.; Cortizo, L. C.; Merlotto, A.; Bértola, G. R.; Pontrelli, M.; y Albisetti, C. F. (2017). Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. Ocean and Coastal Management Vol. 156: 107-116.
- López, R. y Marcomini, S. (2000). Geomorfología y ordenamiento territorial del sector costero comprendido entre la ciudad de Miramar y el arroyo Nutria Mansa, partido de General Alvarado. Revista de la Asociación Geológica Argentina 55(3): 251-264.
- López, R. (2010). Geología y Dinámica costera del Cabo de San Antonio, Provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, inédita, 367 p., Buenos Aires.
- López, R. y Marcomini, S. (2011). Problemática Costera de Buenos Aires. En: López, R. y Marcomini, S. (compiladores) Problemática de los Ambientes Costeros - Sur de Brasil, Uruguay y Argentina.

- Luteijn, J. (2013). Study on sedimentation and effects of mitigating measures at Port of Mar del Plata, Argentina. M. Sc. Thesis Final Report, 163 pp.
- Marcomini, S. y López, R. (2008). Erosión y manejo costero de Villa Gesell. Libro, Buenos Aires: Unión por Gesell.
- Marcomini, S. y López, R. (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.
- Medina, R.; Martínez, A.; Mormeneo, L.; y Richiano, S. (2016). Cambios Morfodinámicos Causados por la Construcción de un Espigón en Camet Norte, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73 (2): 273-282.
- Merlotto, A. y Bértola, G. (2009). Evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina. *Ciencias Marinas* 35(3): 271-286.
- Merlotto A., Bertola G., Piccolo M. (2013). Seasonal morphodynamic classification of beaches in Necochea municipality, Buenos Aires Province, Argentina. *Ciencias Marinas* 39(3): 331-347. doi:10.7773/cm.v39i4.2180.
- Merlotto, A.; Bértola, G.; Isla, F.; Cortizo, L.; y Piccolo, M. (2014). Short and medium-term coastal evolution of Necochea Municipality, Buenos Aires province, Argentina. *Environ Earth Sci* 71: 1213-1225.
- Merlotto, A.; Bértola, G.; e Isla. (2017). Riesgo de erosión costera de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía* Vol. 26 (2).
- Ministerio de Transporte, Obras Públicas y Obras Sanitarias del Gobierno de los Países Bajos (1997). Estudio del puerto y la costa de Mar del Plata. Informe Interno de la Municipalidad de General Pueyrredón, p. 142, sin publicar.
- Perillo, G.; Pérez, D.; Piccolo, M.; Palma, E. y Cuadrado, D. (2005). Geomorphologic and physical characteristics of a human impacted estuary: Quequén Grande River Estuary, Argentina. *Estuar, Coast and Shelf Sci* 62:301:312.
- Reyes Cabañas P. (2015). Dimensionamiento de un sistema de bypass de arena en el puerto de Sisal, Yucatán, 123 pp.
- San Martín, L.; Marcomini, S.; y López, R. (2012). Vulnerabilidad a la erosión costera entre las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Santorio, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata, *Cont. Shelf Res.*, 60, pp. 51-63.
- Sciarrone, R.; Melendez, R. y Loschacoff, S. (2012). Rompeolas aislados como estructuras de protección costera, recuperación de playas. VII Congreso argentino de Ingeniería Portuaria – AADIP, 2012.
- SHN (Servicio de Hidrografía Naval). (1975<sup>a</sup>). Carta Náutica H 250, Rada Mar del Plata. Buenos Aires, Argentina: Departamento de Artes Gráficas, escala 1:50.000, 1 hoja.
- SHN. (1975b). Carta Náutica H 251, Puerto de Mar del Plata. Buenos Aires, Argentina: Departamento de Artes Gráficas, escala 1:5000, 1 hoja.
- SHN (1999). Registros de máximas mareas en los últimos 50 años para la estación mareográfica de San Clemente, p. 4, Buenos Aires.
- SHN (2009a). Tablas de Marea. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina.
- SHN (2009b). Tablas de marea. Publicación H-601, p. 599, Buenos Aires.
- SHN (2016). Publicación H-216, Avisos a los Navegantes. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Defensa, Servicio de Hidrografía Naval, Folleto No. 1216, p. 52.
- SHN (2019). Publicación H-216, Avisos a los Navegantes. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Defensa, Servicio de Hidrografía Naval, Boletín No. 122019, p. 27.

Stockdon, H.; Holman, R.; Howd, P.; y Sallenger, A. (2006). Empirical parameterization of setup, swash and runup. *Coastal Engineering*, Vol. 53, p. 73-588.

Sunrise Technical Consultants Engineering Staff (1971). Estudio mediante ensayo hidráulico sobre modelo del Puerto de Mar del Plata y sus alrededores. Tokyo, Japón: Sunrise Technical Consultants, Co., Technical Report No. 1, 405p.

Syvitski, J.; Harvey, N.; Wolanski, E.; Burnett, W.; Perillo, G.; Gornitz, V.; Arthurton, R.; Bokuniewicz, H.; Campbell, J.; Cooper, L.; Dunton, K.; Gao, S.; Hesp, P.; Saito, Y.; Salisbury, J.; Snoussi, M., y Yim, W. (2005). Dynamics of the coastal zone. En: Crossland, C.; Kremer, H.; Lindeboom, H.; Marshall Crossland, J., and Le Tissier, M. (eds.), *Coastal Fluxes in the Anthropocene: The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme*. Berlin, Germany: Springer, pp. 39-94.

van der Meer, J. W. (2002). Technical Report - Wave run-up and wave overtopping at dikes. Technical Advisory Committee for Flood Defence in the Netherlands (TAW), Delft.

Verón, M. y Bértola G. (2014). Aplicación del método de flujo de energía en el litoral de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 21(1):17-23.