



Output 5 | Actividad 5.1

Atlas de riesgo e impacto del cambio climático sobre la costa marítima de la provincia de Buenos Aires

Español

INFORME 5.1 – 20 Abril 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 10-376-20
Ezeiza, abril 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:

Nicolás Tomazin, Federico Haspert y Mariano Re.

Resumen

La realización de un Atlas de Riesgo Costero para la costa marítima de la provincia de Buenos Aires se constituye como una herramienta necesaria para avanzar hacia un manejo costero integrado de esta región. Para su obtención se aplicaron una serie de herramientas de cálculo simplificadas que permitieron el desarrollo de un amplio análisis orientado a caracterizar el riesgo costero de esta región de estudio. La cuantificación de un conjunto destacado de variables, necesaria para la elaboración de este producto, fue realizada mediante la evaluación de 53 perfiles de playa distribuidos a lo largo de una extensión de más de 600 km.

El Atlas de Riesgo Costero consiste en una serie de mapas que permiten evaluar el impacto de temporales con diferente grado de severidad sobre la costa, tanto para las condiciones actuales del clima como para escenarios futuros que proyectan diferentes incrementos en el nivel medio del mar (NMM).

Para la evaluación del impacto de los efectos asociados al cambio climático se consideraron los resultados de proyecciones de escenarios climáticos para diferentes horizontes: años 2045 y 2100. Por un lado, estos cambios se evaluaron de acuerdo a la incidencia sobre el riesgo costero. Además, estos análisis, permitieron estimar la “erosión estructural” consistente en el retroceso de línea de costa como consecuencia de la elevación del nivel medio del mar y la readecuación de los perfiles de equilibrio de playa en cada uno de los sitios de estudio.

Índice

1	Introducción	5
1.1	Problema	5
1.2	Asistencia técnica	6
1.3	Actividad 5.1.....	6
2	Aspectos metodológicos sobre el análisis de Impactos y Riesgos en Zonas Costeras	8
2.1	Sitios de análisis	9
2.2	Metodología para la evaluación del riesgo	11
3	Cuantificación de la peligrosidad (amenazas costeras)	12
3.1	Mapas de Peligrosidad	12
4	Evaluación de los Impactos de eventos de temporal.....	16
4.1	Evaluación de niveles de inundación de la playa.	16
4.2	Mapas de inundación de la playa.....	20
4.3	Evaluación de la erosión sobre el perfil de playa	22
4.4	Mapas de volumen erosionado.....	26
5	Caracterización del riesgo costero	30
5.1	Indicadores.....	30
5.2	Mapas de Riesgo Costero.....	32
6	Impacto de la elevación del nivel medio del mar.....	37
6.1	Elevación del nivel medio del mar	37
6.2	Estimación de riesgo para escenarios futuros	39
	Horizonte 2045 Escenario RCP 8.5	39
	Horizonte 2100 Escenario RCP 8.5	42
6.3	Erosión a largo plazo	46
6.3.1	Resultados	47
7	Conclusiones.....	50
	Referencias.....	53

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema

La costa oceánica de la Provincia de Buenos Aires presenta gran diversidad de playas a lo largo de sus 600 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.

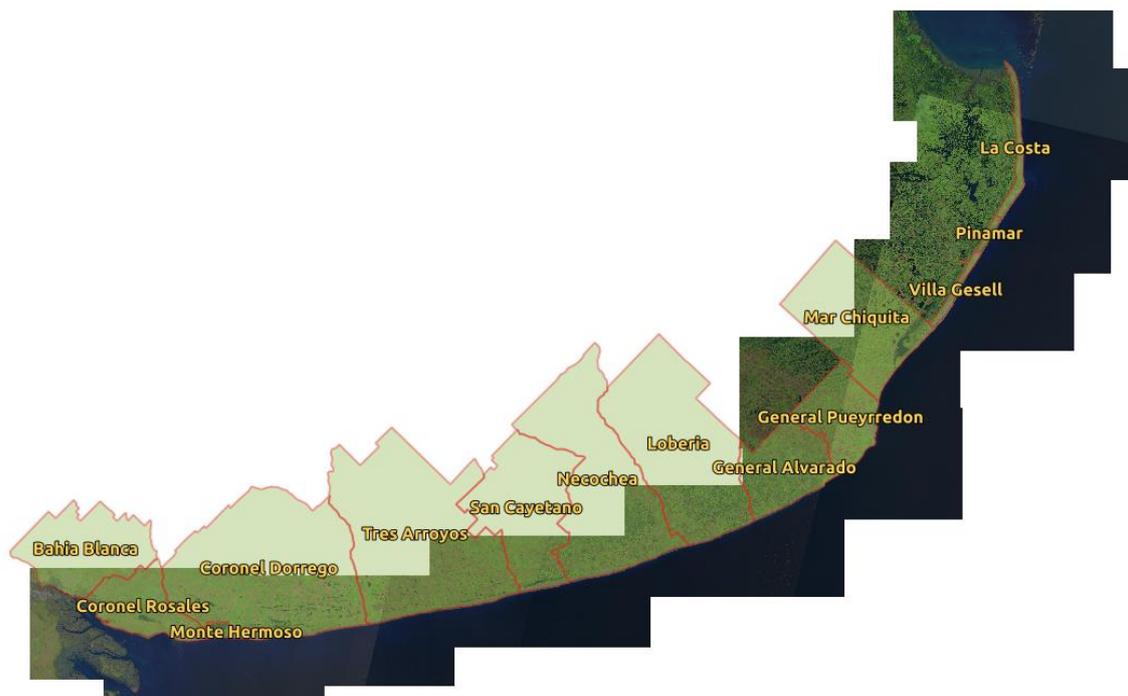


Figura 1-1. Partidos del litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires.

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 5.1

La Actividad 5.1 de esta Asistencia Técnica se enmarca dentro del Entregable 5, y está asociada con la evaluación del riesgo costero generado por la acción de temporales y el impacto del

cambio climático a lo largo de la totalidad de la franja costera del área marítima en la Provincia de Buenos Aires.

La evaluación del riesgo costero se realizó identificando la amenaza por medio del impacto generado por eventos de temporal caracterizados por una importante sobreelevación del nivel del mar, asociado a la marea meteorológica, junto con alturas elevadas del oleaje. El impacto de estos eventos fue cuantificado en términos de cota máxima de inundación y erosión sobre el perfil de costa sobre un número importante de sitios de estudio distribuidos a lo largo de la franja costera bonaerense. Para ello se implementó la metodología de cálculo presentada en el Informe 4.3 de esta Asistencia Técnica, basada en la utilización de la herramienta denominada *SimpleCoast*.

Para la evaluación del impacto de los efectos asociados al cambio climático se consideraron los resultados obtenidos en el Informe 4.2 de esta Asistencia Técnica, dónde se identificó a la elevación del nivel medio del mar como la única variable con una tendencia significativa en las proyecciones de los modelos numéricos que plantean escenarios futuros para diferentes horizontes (año 2045 y año 2100).

De acuerdo a esos resultados se analizaron los impactos de esta variable para los horizontes señalados considerando dos aspectos diferentes. Por un lado, se evaluó la incidencia sobre el riesgo costero, estimando valores de erosión y cotas de inundación generados por eventos de temporal desarrollados con el nivel medio del mar proyectado para escenario correspondiente. En segundo lugar, se realizó una estimación de la “erosión estructural”, consistente en el retroceso de línea de costa como consecuencia de la elevación del nivel medio del mar y la readecuación de los perfiles de equilibrio de playa en cada uno de los sitios de estudio. Este análisis se realizó mediante el cálculo asociado a la implementación de la conocida Regla de Bruun (1962).

2 ASPECTOS METODOLÓGICOS SOBRE EL ANÁLISIS DE IMPACTOS Y RIESGOS EN ZONAS COSTERAS

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 (refiere a la amenaza, en este caso la inundación o la 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.

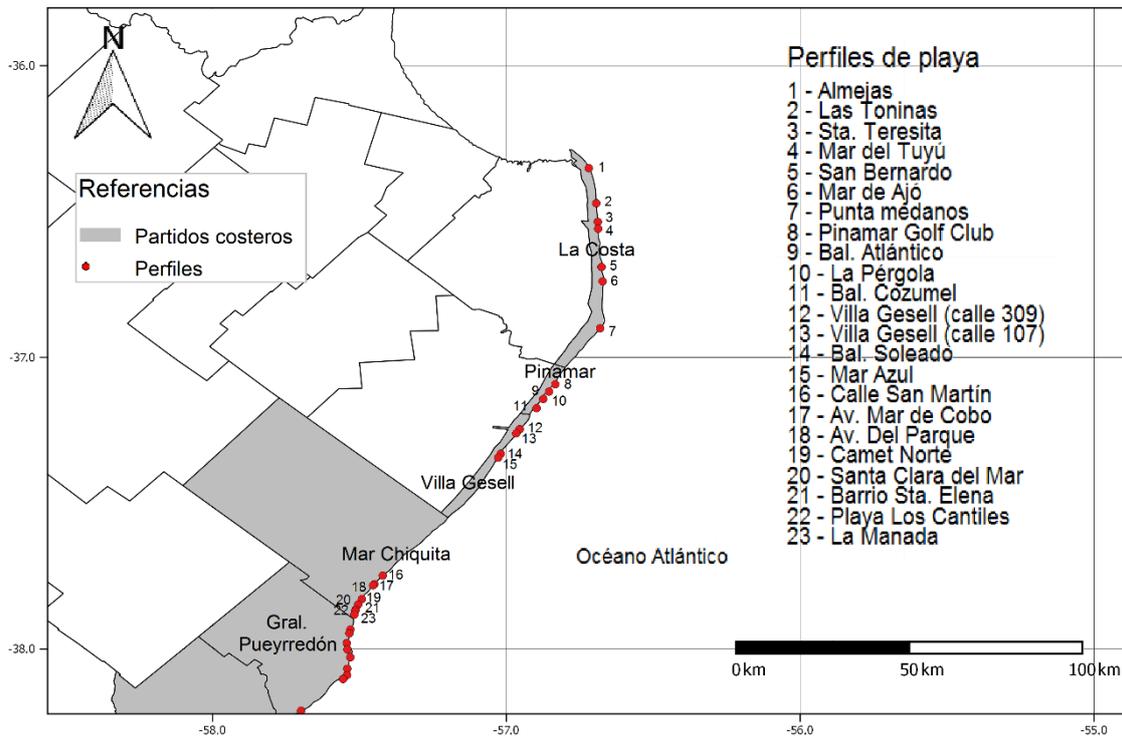
Si bien la evaluación del riesgo generalmente implica la cuantificación de estos tres componentes, los alcances de este trabajo justifican la consideración conjunta de los conceptos de exposición y vulnerabilidad, tal como sugieren distintos investigadores, entre ellos Merlotto *et al.* (2017). Siguiendo esta metodología, 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 presenta la aplicación de una metodología que permite determinar el riesgo mediante la combinación de peligrosidad y vulnerabilidad, identificando los sectores más comprometidos y los de menor impacto por acción de temporales a lo largo de todo el frente costero del área marítima de la Provincia de Buenos Aires.

2.1 Sitios de análisis

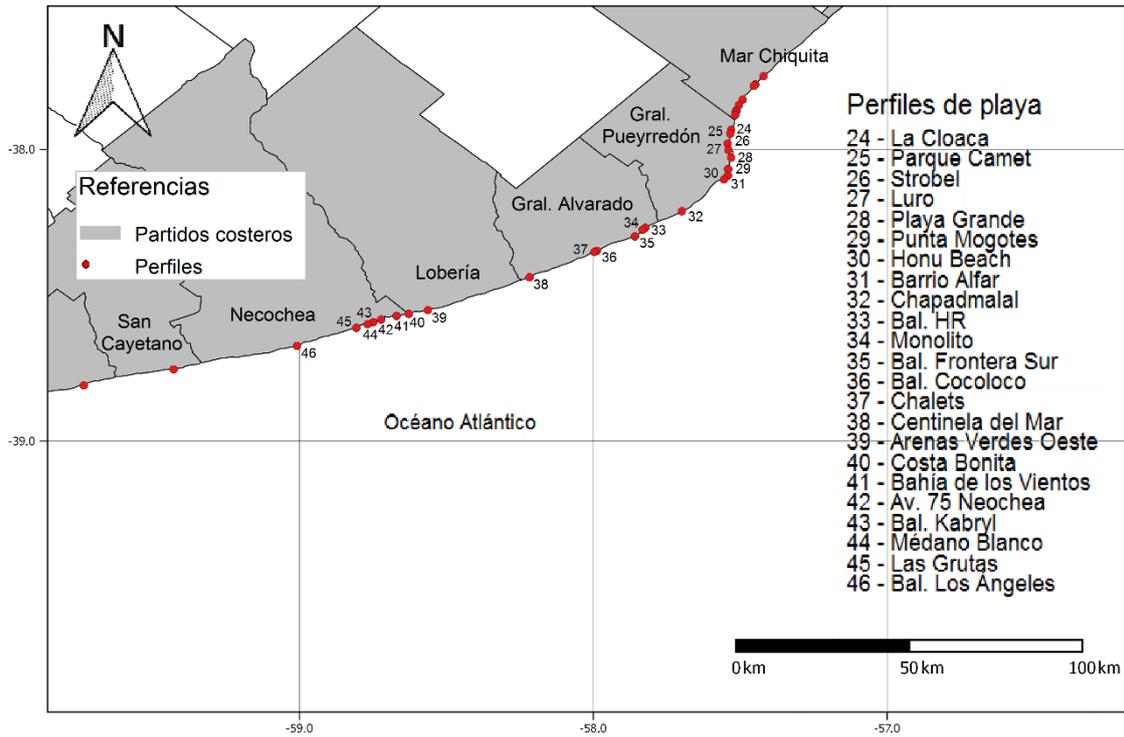
La evaluación del riesgo fue realizada sobre un amplio conjunto de ubicaciones puntuales distribuidas a lo largo de todo el frente costero marítimo de la provincia de Buenos Aires. De esta manera se logró una representación razonable de la morfología costera en un área con una extensión de más de 600 km.

La Figura 2.1 muestra la disposición de los sitios de análisis (perfiles de playa) a lo largo del área de estudio segmentada en tres sectores. En la Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo¹, se presenta información referida a las coordenadas de ubicación de cada perfil, su ángulo de inclinación (convención náutica), y la denominación de la boya virtual de referencia.

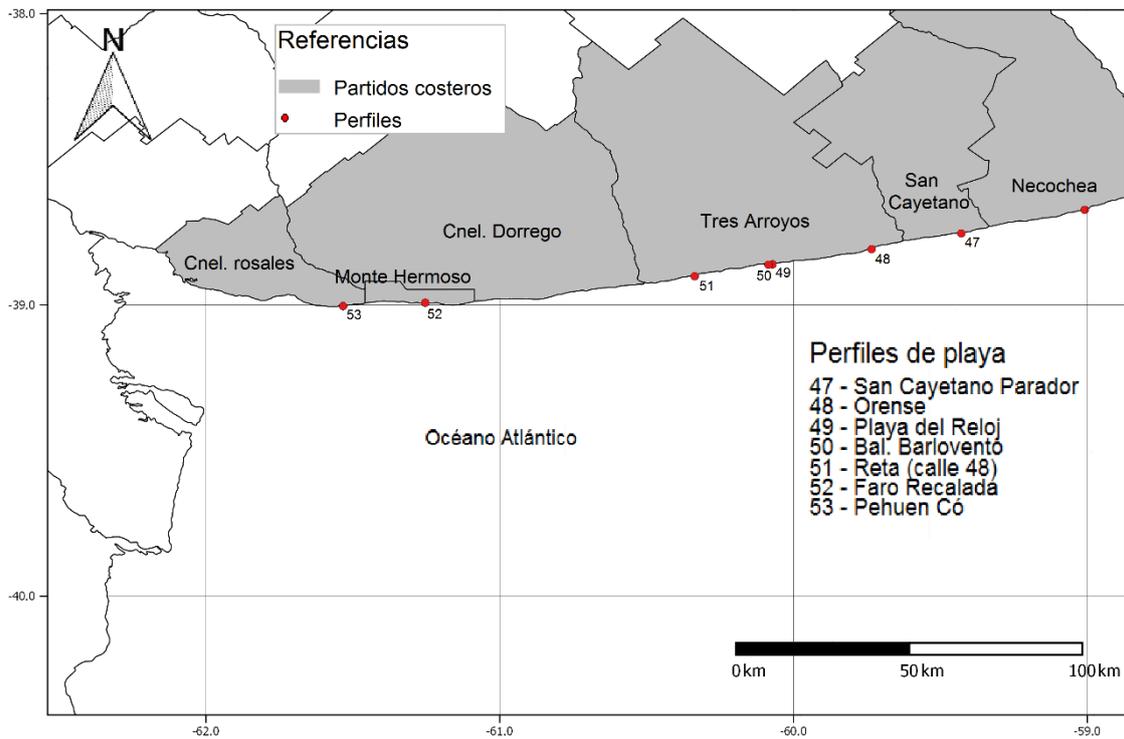


a) Sector Noreste

¹ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx



b) Sector Central



c) Sector Sudoeste

Figura 2.1. Localización de perfiles de análisis a lo largo de la costa bonaerense.

Para cada una de estas ubicaciones se cuenta con un relevamiento del perfil de playa realizados en diferentes campañas de campo llevadas a cabo por el Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario perteneciente a la Universidad Nacional de Mar del Plata y a la Comisión de

Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (UNMdP-CIC). La información batimétrica necesaria para prolongar los perfiles medidos hasta profundidades requeridas para el cálculo fue extraída de las Cartas Náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN).

Esta evaluación, desarrollada con un enfoque regional, asume que las características físicas de cada perfil de playa analizado resultan representativas del tramo costero al que pertenece, de modo tal que los resultados obtenidos en los diferentes sitios de estudio permiten obtener una mirada integrada de los procesos que se desarrollan sobre todo el frente marítimo de la Provincia de Buenos Aires.

2.2 Metodología para la evaluación del riesgo

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 (H_s) y Niveles de Marea (N) y sus correspondientes períodos de retorno (Tr).
- Evaluación del impacto de los peligros (amenazas) costeros, a fin de cuantificar 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.

En los capítulos siguientes de este informe se presenta una breve descripción de la metodología desarrollada para cada una de las etapas de estudio y los resultados obtenidos en las mismas.

Dichos resultados son presentados mediante un conjunto de mapas que tienen el propósito de ilustrar la distribución espacial de las variables más significativas para el análisis, considerando al mismo tiempo la acción de temporales de distinta intensidad asociada a un período de retorno determinado.

Asimismo, se destaca que en la Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo² se presenta toda la información utilizada para la confección de los mapas.

² https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

3 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.

3.1 Mapas de Peligrosidad

La caracterización de las amenazas que permitieron cuantificar la peligrosidad a la que se encuentra expuesto el tramo costero en evaluación se realizó mediante los parámetros de oleaje y niveles extremos correspondientes a las boyas virtuales 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 Figura 3.1 y en la Figura 3.2, respectivamente.

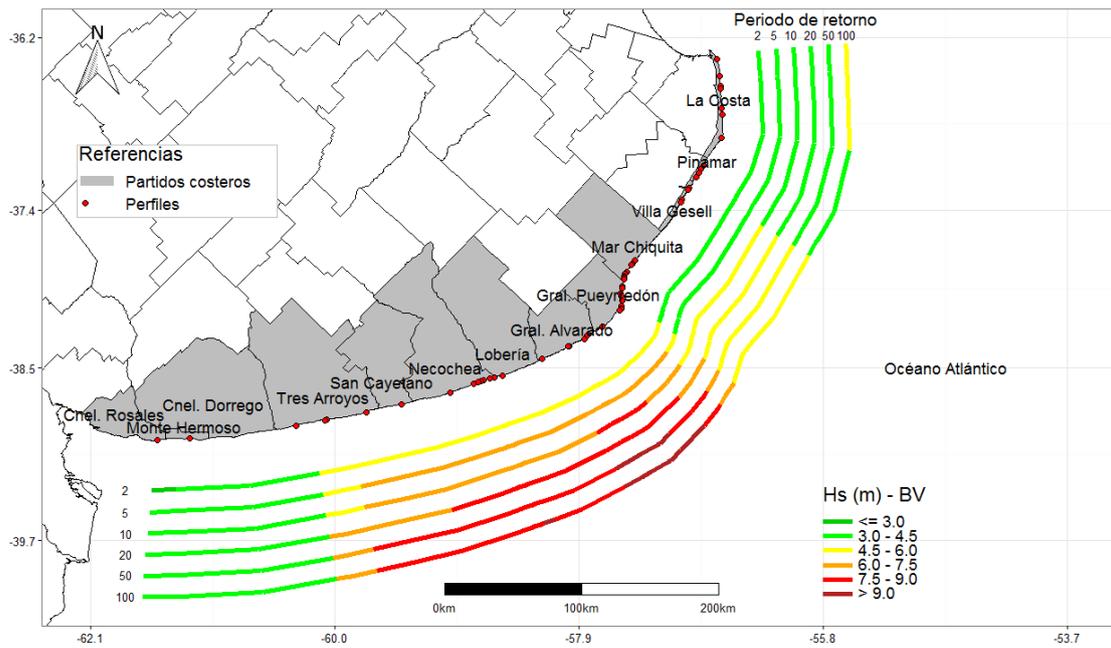


Figura 3.1. Altura significativa del oleaje para distintos períodos de retorno en boyas virtuales.

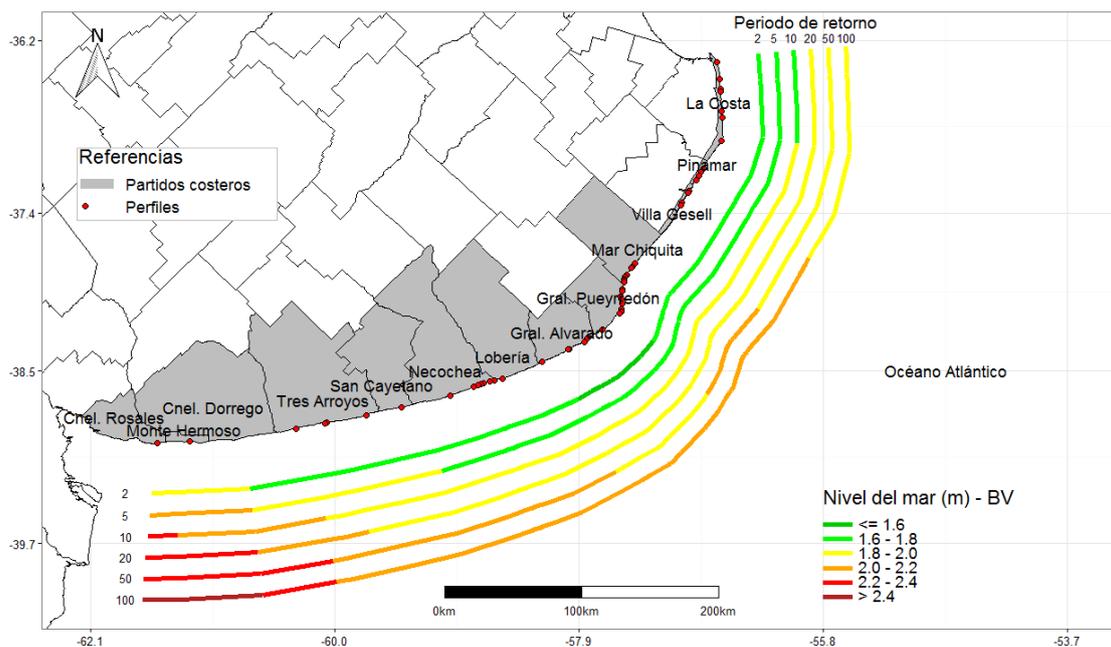


Figura 3.2. Niveles de onda de tormenta para distintos períodos de retorno en boyas virtuales.

Otros parámetros de interés resultan ser los valores de altura de ola para una profundidad costera de referencia de $d=8\text{m}$ (Figura 3.3) y altura de ola a pie de duna (Figura 3.4), 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 de cada perfil de playa en estudio.

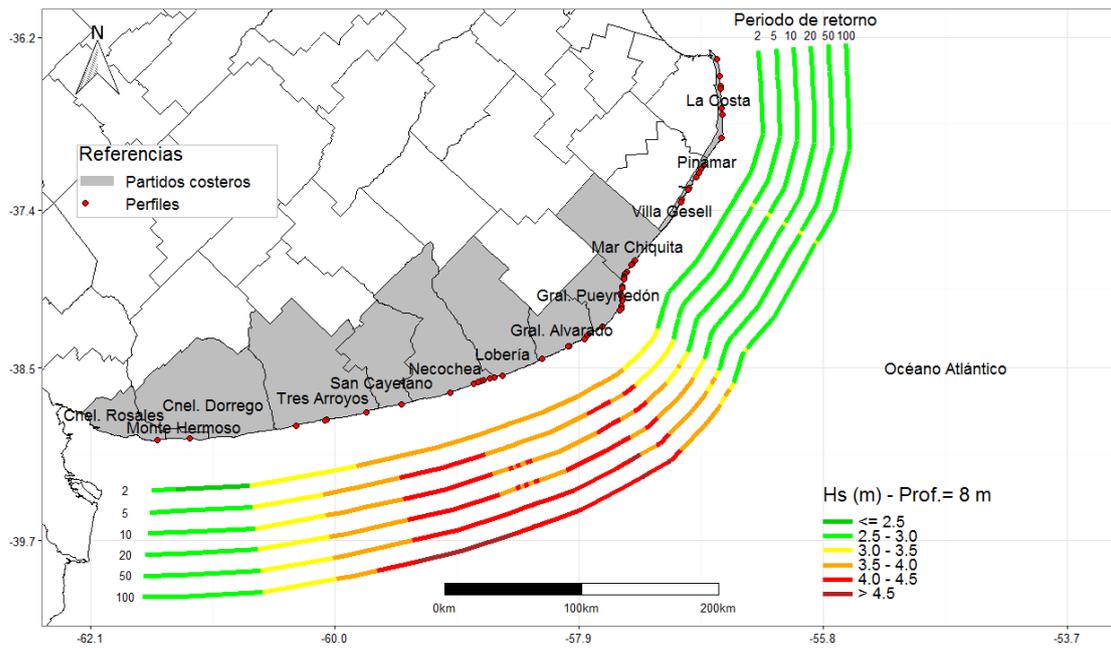


Figura 3.3. Altura significativa del oleaje a una profundidad de referencia d=8 m.

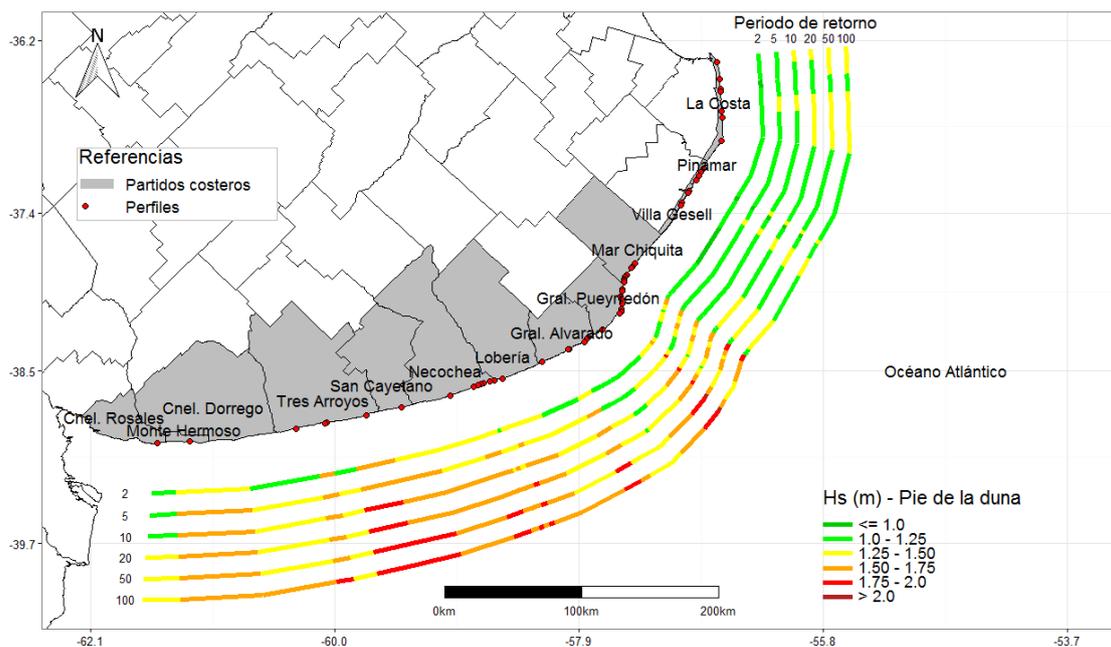


Figura 3.4. Altura significativa del oleaje a pie de duna.

El conjunto de mapas presentado (Figura 3.1 a Figura 3.4) permite interpretar la distribución de la peligrosidad a lo largo del tramo costero en estudio mostrando las diferencias en la magnitud de las variables en un enfoque regional. Los valores puntuales obtenidos para cada variable en

los diferentes sitios de análisis pueden obtenerse en la Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo³.

³ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

4 EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS DE EVENTOS DE TEMPORAL

Para esta aplicación se utilizaron las herramientas de cálculo disponibles en el paquete *SimpleCoast*⁴ desarrollado por Deltares (Países Bajos).

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 (UNMDP-CIC).

4.1 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. En la Tabla 4.1. Variables para la evaluación de niveles de inundación en la playa se resumen las variables a calcular.

Tabla 4.1. Variables para la evaluación de niveles de inundación en la playa

'Flooding' SimpleCoast	Variable de cálculo
Profundidad del agua al pie de la duna	d_{toe} (m)
Altura de las olas y nivel de la marea	Δh_s : Sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje (m)
Pendiente del perfil de playa	$\tan\alpha$: pendiente del perfil (-)
Cálculo del run up	$R_{2\%}$: run-up (m)
Máximo nivel de inundación	Δh_{total} : nivel máximo de inundación (m)
Cálculo del sobrepaso	q_{wo} : tasa de sobrepaso (l/m/s)

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,

⁴ <http://www.simplecoast.com/>

2002). Para cada perfil, la bajamar media fue obtenida de las tablas de marea del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) 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 lo 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 sobreelevación 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:

Δh_s : Sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje (m).

γ : 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 4.1). 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).

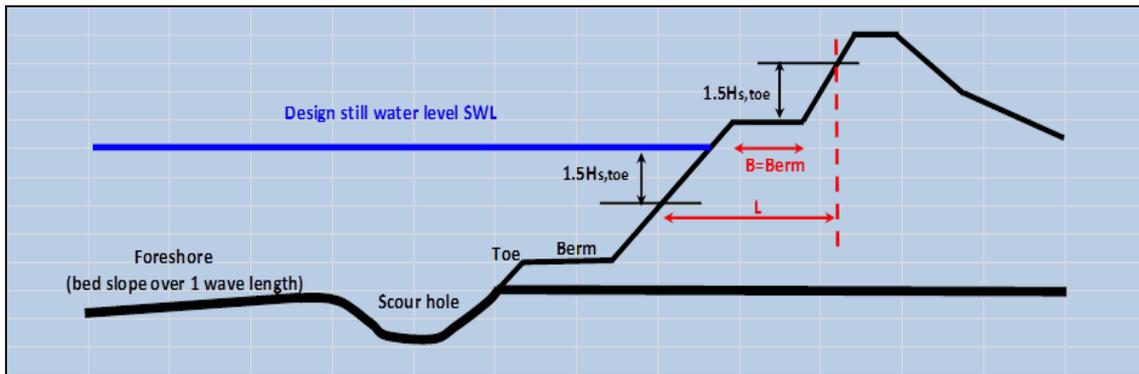


Figura 4.1. Esquema de perfil con berma (*SimpleCoast*)

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 ξ .

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}}$$

siendo:

ξ : 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 $\xi < 0,3$:

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

Para $\xi \geq 0,3$:

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

siendo:

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

γ_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 (Δh_{total} , Figura 4.2) mediante la siguiente expresión:

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

siendo:

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

Δh_T : Marea astronómica (m).

Δh_S : Marea meteorológica (m).

Δh_S : Sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje o *wave setup* (m).

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

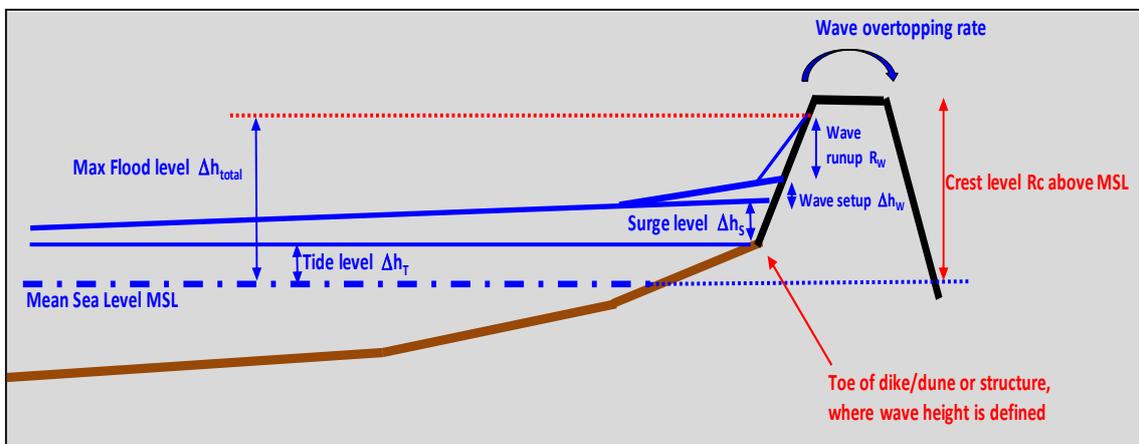


Figura 4.2. Esquema que ilustra el cálculo del máximo nivel de inundación (*SimpleCoast*)

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 ξ .

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).

ξ : parámetro de Iribarren (-).

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

α : ángulo de la pendiente del perfil de playa (-).

γ_r : factor de rugosidad (-).

γ_{berm} : factor de berma ($\gamma_{berm} = 1$ sin berma o bermas $< 3m$; $\gamma_{berm} = 0,6$ bermas $> 10m$) (-).

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

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

A_i : coeficientes disponibles en Tablas.

4.2 Mapas de inundación de la playa

Los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología *SimpleCoast* (apartado 4.1) permitieron construir el mapa de la Figura 4.3, donde se muestra la altura máxima del nivel de inundación alcanzado para diferentes períodos de retorno a lo largo del tramo costero en estudio. Este nivel máximo de inundación obtenido para condiciones de temporal incluye la marea total (astronómica + meteorológica) más las superposición de los efectos de *set-up* y *run-up*. Los valores expresados para el nivel de inundación (N) se encuentran referidos en todos los casos al nivel medio del mar.

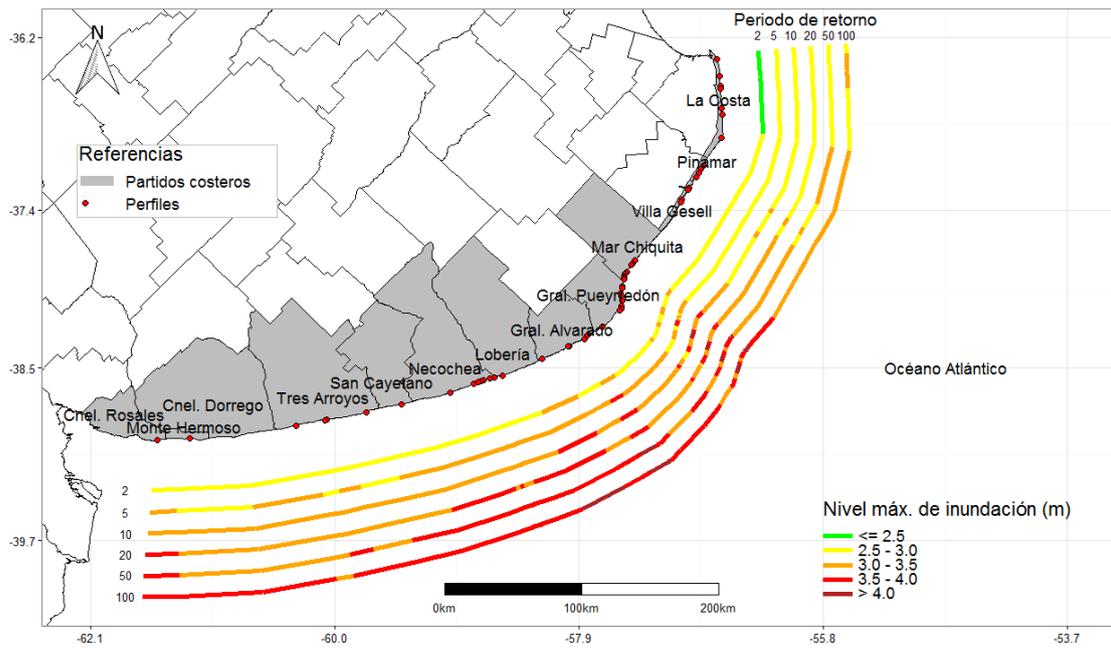


Figura 4.3. Nivel máximo de inundación en la costa.

La distribución de esta variable a lo largo de la costa muestra los niveles más bajos en la zona del partido de La Costa, con valores de N inferiores a 2.5 m para un período de retorno (Tr) de 2 años. Mientras que los valores más altos se encuentran entre los partidos de General Pueyrredón, General Alvarado y Lobería, donde se superan los valores de $N=3$ m para $Tr=2$ años.

Utilizando estos resultados se calcularon las alturas de revancha a lo largo de toda la costa obtenidas como diferencia entre la cota máxima del perfil de playa y el nivel de inundación estimado en cada ubicación analizada. La Figura 4.4 muestra distribución de esta variable a lo largo de la costa bonaerense.

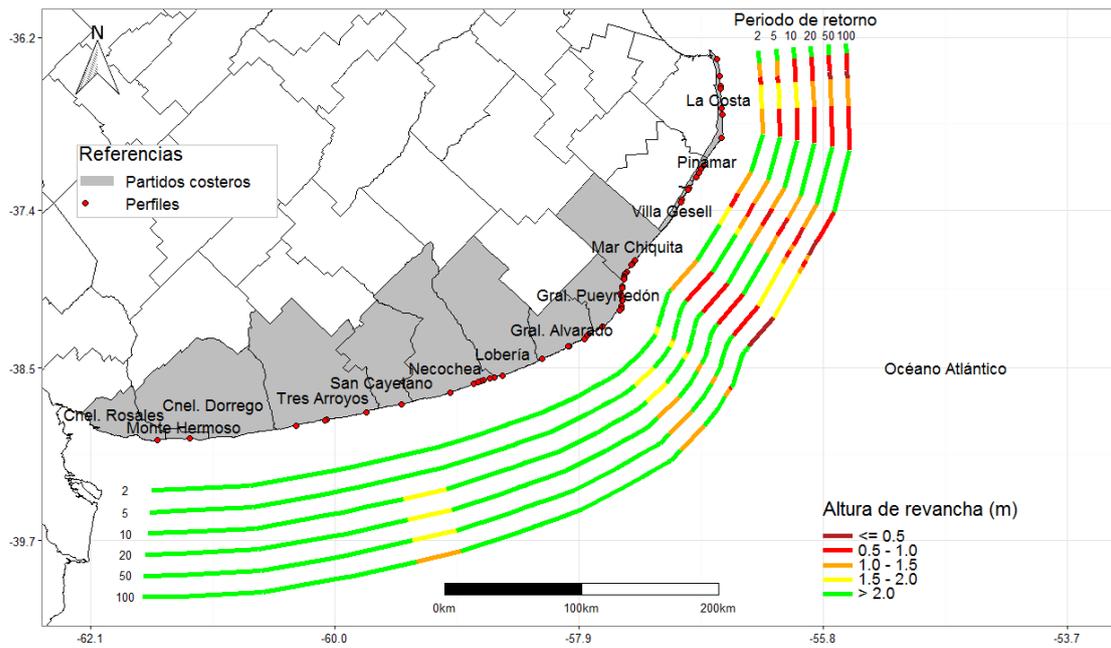


Figura 4.4. Altura de revancha en la costa.

El mapa de la Figura 4.4 señala que las zonas más comprometidas en cuanto a la posibilidad de inundación por acción de los temporales se encuentran comprendida entre los partidos de La Costa y Mar Chiquita. Hacia el sur, a excepción de un pequeño tramo en la zona de Mar del Plata (perfil Luro), la elevación natural del terreno da un resguardo a la costa con revanchas superiores a los 2 m en todos los perfiles analizados.

La situación más desfavorable corresponde a la zona de Santa Teresita, donde las alturas de revancha pueden ser inferiores a los 0.5 m en el caso de temporales asociados a períodos de retorno de 50 años en adelante.

4.3 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. En la Tabla 4.2. Variables para la evaluación de la erosión sobre el perfil de playa se resumen las variables a calcular.

Tabla 4.2. Variables para la evaluación de la erosión sobre el perfil de playa

'Littoral' SimpleCoast	Variable de cálculo
Caracterización del perfil de playa	$\tan\alpha$: pendiente del perfil (-) R_c : altura de la duna D_{50} : granulometría (mm)
Altura de las olas y nivel de la marea	Δh_s : Sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje (m)
Pendiente del perfil de playa	$A_{d,t=5}$: volumen erosionado (luego de 5 hs) (m^3/m) $A_{d,t}$: volumen erosionado (luego de t hs) (m^3/m) R_d : retroceso de la duna (luego de t hs) (m)

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

En la Figura 4.5 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 D_{50} , 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.

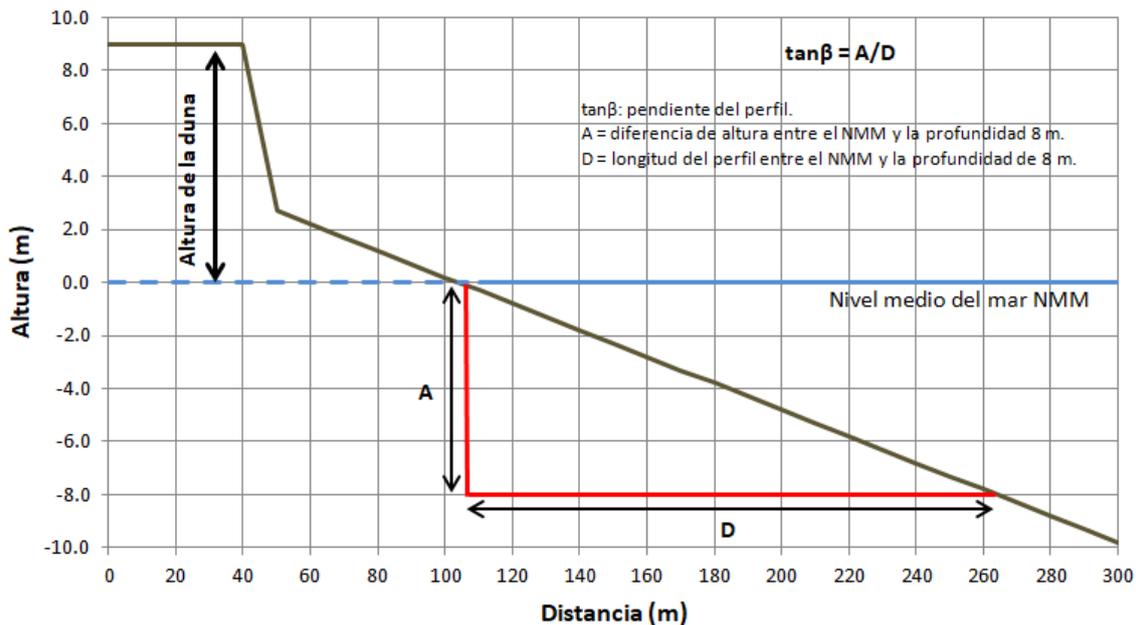


Figura 4.5. Esquema simplificado del perfil de playa utilizado para el cálculo (*SimpleCoast*)

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:

Δh_s : sobreelevación del nivel del mar por rotura del oleaje (m).

γ : 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 4.6 muestra el esquema simplificado que se considera para el desarrollo del cálculo.

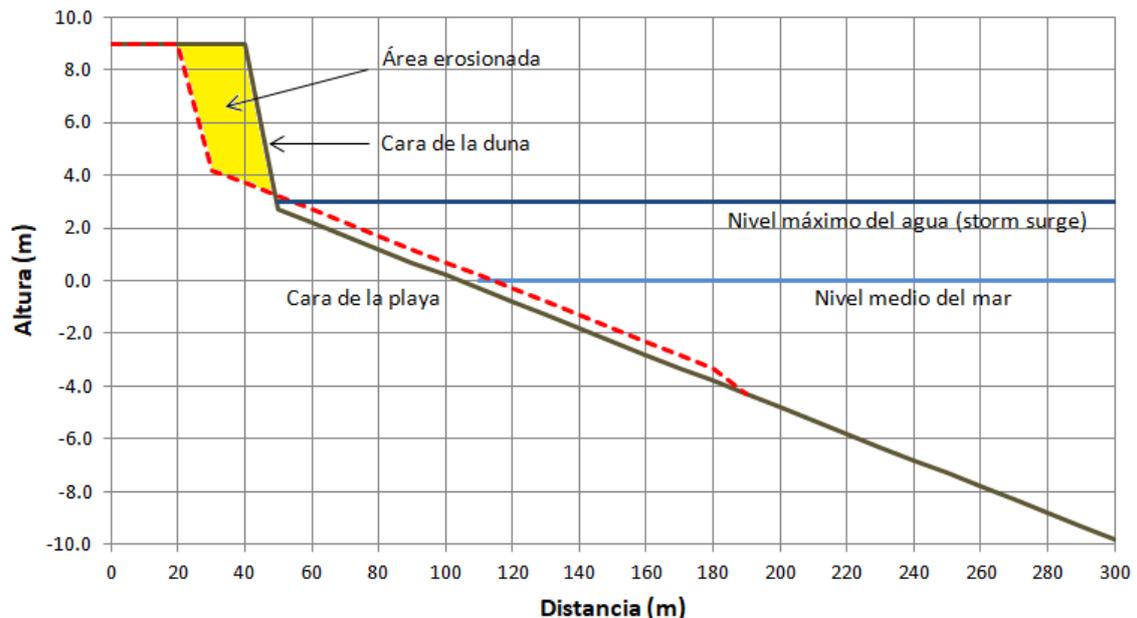


Figura 4.6. Esquema simplificado para el cálculo de la erosión sobre el perfil de playa (*SimpleCoast*)

Cálculo del volumen erosionado (luego de 5 hs)

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

$$A_{d,t=5} = 170 \cdot \left(\frac{0,00025}{D_{50}}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{S}{5}\right)^{1,3} \cdot \sqrt{\frac{H_{s,o}}{7,6}} \cdot \sqrt{\frac{T_p}{12}} \cdot \left(\frac{\tan\beta}{0,0222}\right)^{0,3} \cdot \sqrt{\frac{1 + \theta}{100}}$$

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

$$A_{d,t=5} = 170 \cdot \left(\frac{0,00025}{D_{50}}\right)^{1,3} \cdot \sqrt{\frac{S}{5}} \cdot \sqrt{\frac{H_{s,o}}{7,6}} \cdot \sqrt{\frac{T_p}{12}} \cdot \left(\frac{\tan\beta}{0,0222}\right)^{0,3} \cdot \sqrt{\frac{1 + \theta}{100}}$$

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 (mm).

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 (-).

θ_o : ángulo incidente de la ola respecto a la normal a la costa en aguas profundas ($^\circ$).

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 ≥ 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).

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

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

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).

4.4 Mapas de volumen erosionado

Las expresiones de cálculo presentadas en el apartado anterior fueron aplicadas para estimar condiciones de erosión de playa asociadas a eventos de tormenta caracterizados por el oleaje y niveles extremos.

Los resultados son expresados en función de la duración de la tormenta, para lo cual se adoptaron valores de 1, 5, 10, 15 y 20 horas, respectivamente. Los niveles de erosión estimados se presentan en términos de volumen removido por metro de ancho de playa, es decir que representan la cantidad de arena en la zona emergida que se pierde por acción de los temporales y se traslada sobre el perfil a un sector sumergido del mismo.

Los mapas presentados en las Figura 4.7 a Figura 4.11 señalan la variación de los volúmenes de erosión estimados a lo largo de la costa para diferentes períodos de retorno, considerando en cada caso un valor determinado para la duración del temporal. Las escalas que indican la magnitud de la variable en cada mapa fueron adaptadas convenientemente a los resultados obtenidos.

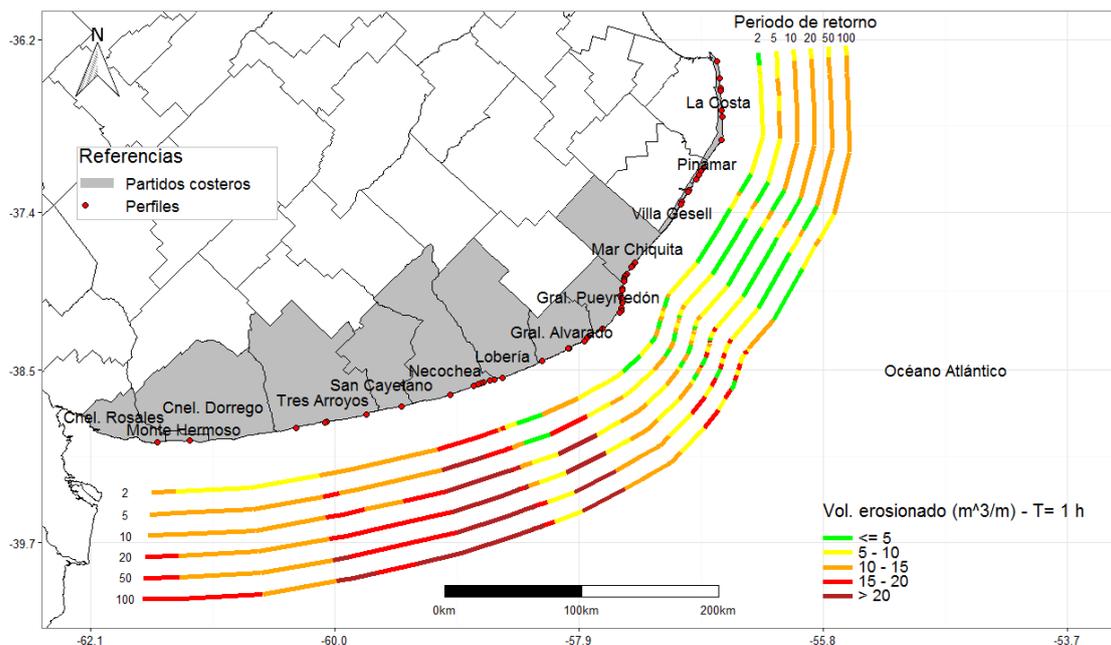


Figura 4.7. Volumen de playa erosionado para tormentas de 1 hora de duración.

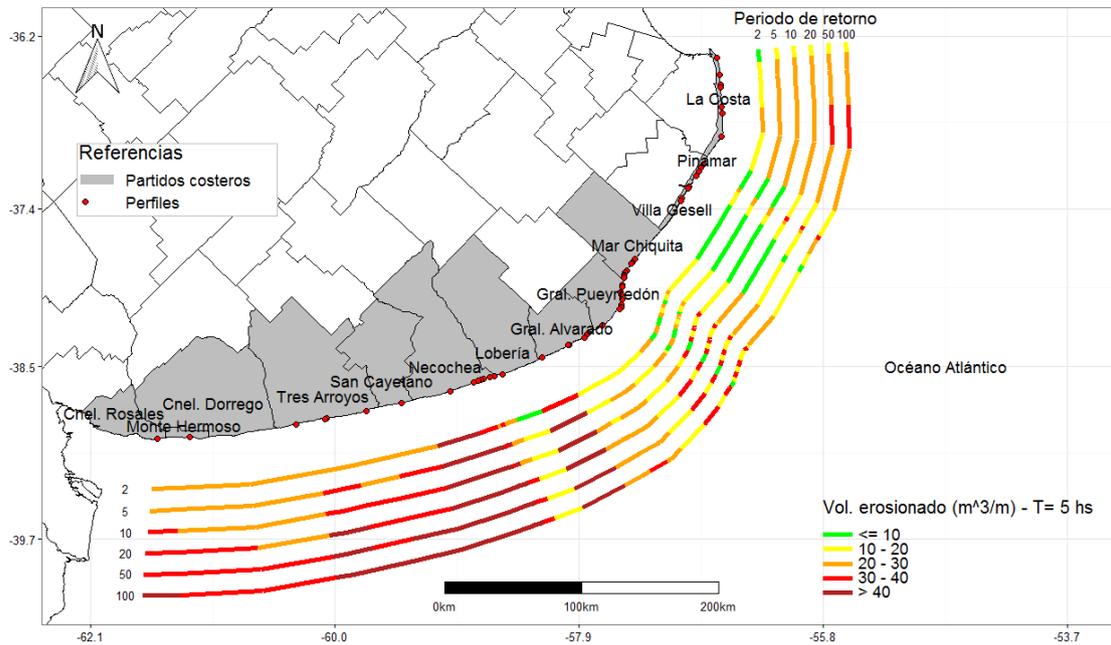


Figura 4.8. Volumen de playa erosionado para tormentas de 5 horas de duración.

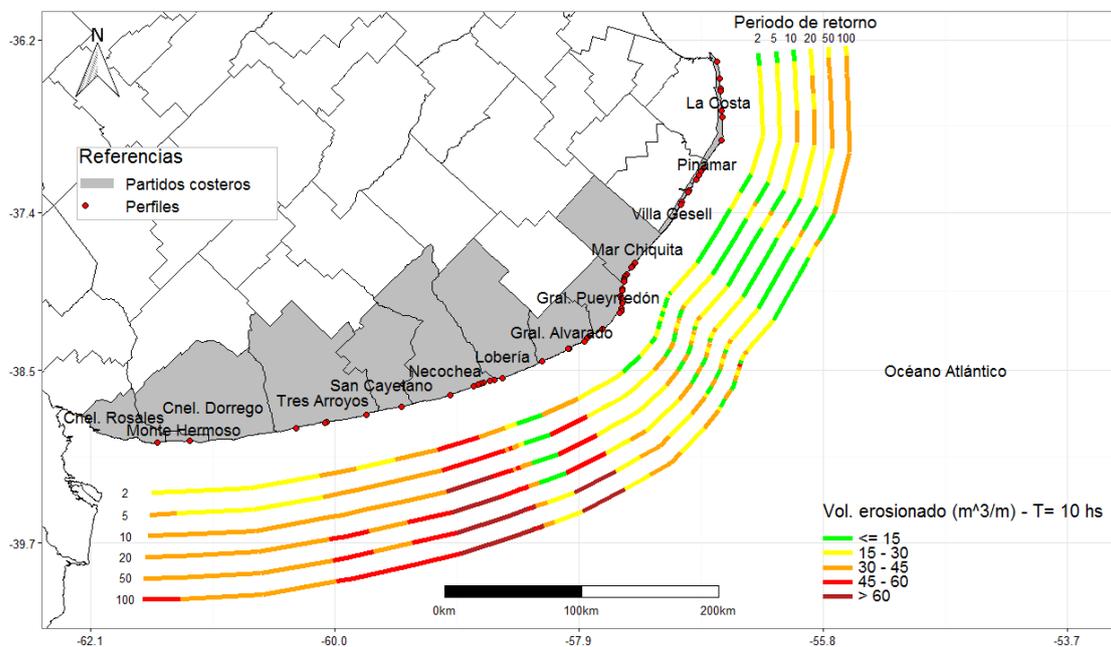


Figura 4.9. Volumen de playa erosionado para tormentas de 10 horas de duración.

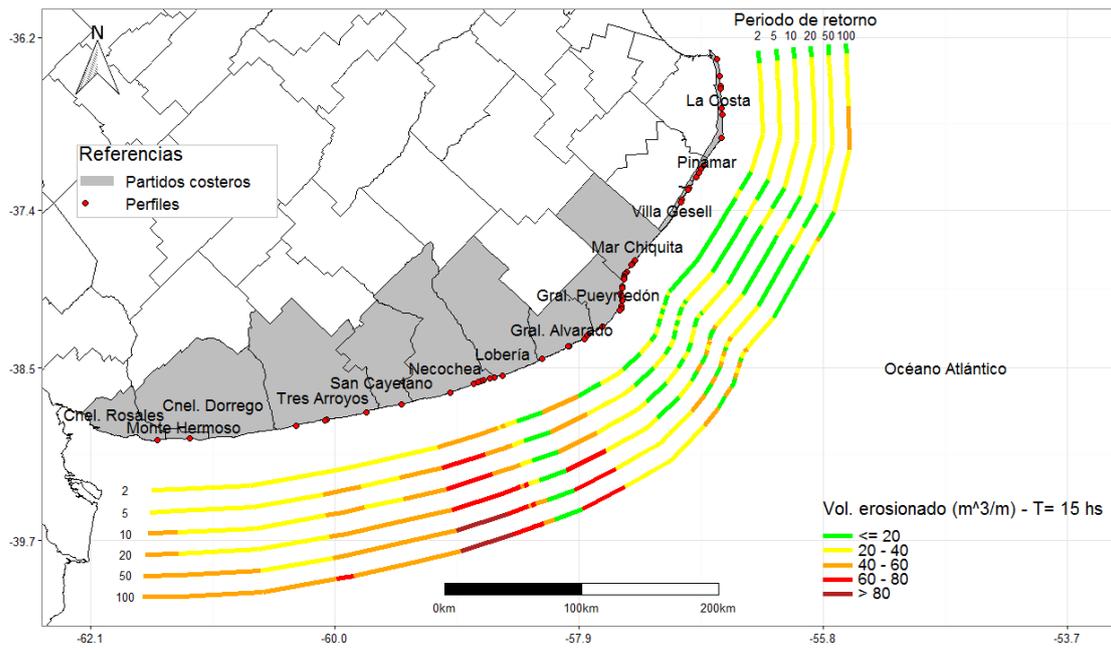


Figura 4.10. Volumen de playa erosionado para tormentas de 15 horas de duración.

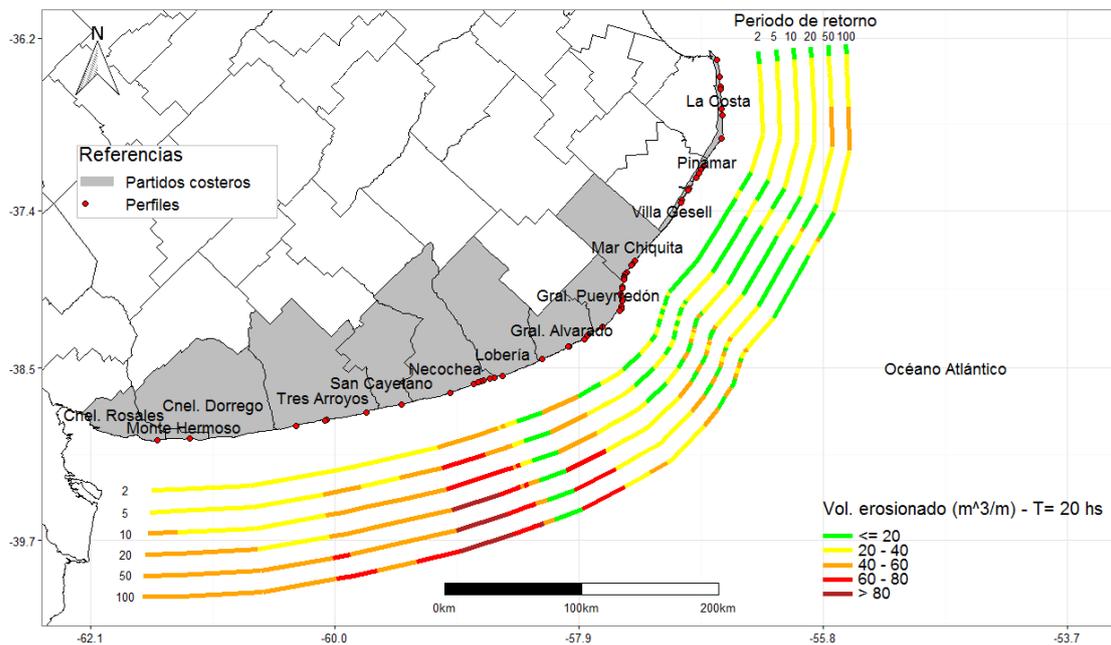


Figura 4.11. Volumen de playa erosionado para tormentas de 20 horas de duración.

El análisis del conjunto de mapas presentados pone en evidencia el incremento de los volúmenes erosionados al considerar duraciones mayores para los eventos y condiciones más severas, caracterizadas por el aumento en los valores del período de retorno.

A modo de ejemplo, puede verse que promediando los volúmenes de erosión estimados a lo largo de toda la costa para eventos asociados a $Tr= 2$ años, se obtienen valores de 8,3, 21,3 y 23,1 m^3/m para duraciones de 1, 10 y 20 horas, respectivamente. Mientras que si se eligen eventos asociados a $Tr= 10$ años, se obtienen valores promedio de 11,0, 28,2 y 32,4 m^3/m para las mismas duraciones anteriormente señaladas.

Por otra parte, existen importantes diferencias en cuanto a la magnitud del impacto erosivo de los temporales en los distintos sectores de la costa. Los mapas muestran con claridad que los volúmenes de erosión más elevados se encuentran en el tramo sudoeste de la franja costera, siendo el balneario Los Ángeles (Partido de Necochea) el que mostró las estimaciones más altas, con valores que pueden superar los 90 m^3/m para las condiciones más severas. Salvo algunas excepciones puntuales, los resultados obtenidos entre el partido de La Costa y el partido de General Pueyrredón muestran valores significativamente inferiores a los anteriores.

La totalidad de los valores puntuales obtenidos en los diferentes sitios de análisis pueden obtenerse de la Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo⁵.

⁵ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

5 CARACTERIZACIÓN DEL RIESGO COSTERO

5.1 Indicadores

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). Ambos indicadores se promedian para obtener el *Índice de Peligrosidad* mediante la siguiente expresión:

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

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. Siendo: 1: muy baja peligrosidad, 2: baja peligrosidad, 3: moderada peligrosidad, 4: alta peligrosidad, y 5: muy alta peligrosidad.

La Tabla 5.1 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 volumen por metro lineal de la playa removido durante un temporal (*Índice de erosión*).

Tabla 5.1. Categorización de las componentes del índice de peligrosidad

Peligrosidad	Índice de inundación		Índice de erosión	
	Valor	Altura de agua debajo de cota max (m)	Valor	Volumen erosionado (m ³ /m)
Muy bajo	1	> 2	1	0 – 20
Bajo	2	2 - 1	2	20 – 40
Moderado	3	1 – 0,5	3	40 – 60
Alto	4	0,5 – 0	4	60 – 80
Muy Alto	5	< 0	5	> 80

El *Índice de vulnerabilidad* utilizado para este estudio surge del análisis de los resultados obtenidos en dos trabajos específicos vinculados a esta temática, desarrollados por Merlotto et al. (2017) y Natenzon y Seattone Passe (2015), respectivamente.

El primero consiste en 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. Este índice de vulnerabilidad fue elaborado sobre la base del método propuesto en un trabajo previo de Natenzon (2007), utilizando datos obtenidos del Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda del año 2001 (INDEC, 2005).

El trabajo de Natenzon y Seattone Passe (2015) fue desarrollado a escala nacional y analiza un conjunto similar de variables e indicadores agrupadas en tres dimensiones: condiciones sociales, condiciones habitacionales y condiciones económicas de la población expuesta. Este índice de vulnerabilidad fue construido a partir de la información recopilada durante el Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda del año 2010 y ha formado parte de las presentaciones correspondientes a la Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de La Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Asumiendo la misma escala adoptada para cuantificar la *Peligrosidad*, la Tabla 5.2 muestra una comparación entre valores de *índice de Vulnerabilidad* obtenidos por ambos trabajos para los distintos municipios costeros de la provincia de Buenos Aires.

Tabla 5.2. Comparación de valores para el índice de Vulnerabilidad por Municipio

Municipio	Índice de Vulnerabilidad (IV)	
	Merlotto et al. (2017)	Natenzon y Seattone Passe (2015)
La Costa	3 (moderada)	4 (alta)
Pinamar	2 (baja)	3 (moderada)
Villa Gesell	2 (baja)	3 (moderada)
Mar Chiquita	4 (alta)	3 (moderada)
Gral. Pueyrredón	3 (moderada)	4 (alta)
Gral. Alvarado	3 (moderada)	3 (moderada)
Lobería	---	3 (moderada)
Necochea	2 (baja)	3 (moderada)
San Cayetano	1 (muy baja)	2 (baja)
Tres Arroyos	1 (muy baja)	3 (moderada)
Coronel Dorrego	1 (muy baja)	2 (baja)
Monte Hermoso	2 (baja)	2 (baja)
Coronel Rosales	1 (muy baja)	3 (moderada)

Cabe destacar que el índice presentado en la Tabla 5.2 para el trabajo de Merlotto et al. (2017) constituye el valor máximo calculado para cada municipio, dado que muchos de éstos existe una sectorización con índices asignados distintas localidades. Por el contrario, el trabajo de Natenzon y Seattone Passe (2015) indica un valor único por municipio.

La comparación entre ambos conjuntos de índices de vulnerabilidad muestra una aproximación razonable, con valores levemente superiores en casi todos los casos para el segundo trabajo.

Si bien ambos indicadores podrían ser utilizados para la evaluación del *Riesgo Costero*, obteniéndose resultados similares, para este trabajo se decidió utilizar el conjunto de valores presentados por Natenzon y Seattone Passe (2015), dado que se trata de índices que permiten realizar las estimaciones sobre un escenario más desfavorable (considerando mayor vulnerabilidad), y porque han sido construidos sobre la base de información estadística más reciente.

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

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

En la Tabla 5.3 Tabla 5.3. Escala de riesgo costeros presenta la escala de riesgo costero.

Tabla 5.3. Escala de riesgo costero

<i>Rango del índice</i>	<i>Riesgo</i>
0-5	Muy bajo
5-10	Bajo
10-15	Moderado
15-20	Alto
20-25	Muy alto

5.2 Mapas de Riesgo Costero

Los resultados obtenidos en el Capítulo 0 sobre la evaluación del impacto de los temporales permitieron establecer los valores correspondientes a los *índices de inundación y erosión* a lo largo de todo el tramo costero de la provincia de Buenos Aires. Para ello se utilizaron las escalas definidas en la Tabla 5.1.

Las Figura 5.1 y Figura 5.2 muestran respectivamente los mapas que identifican la variación de los índices mencionados a lo largo del área de estudio. 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.

Estos mapas reflejan los resultados presentados anteriormente, mostrando índices de inundación elevados para el sector Noreste e índices de erosión más destacados en el sector Sudoeste de la costa bonaerense.

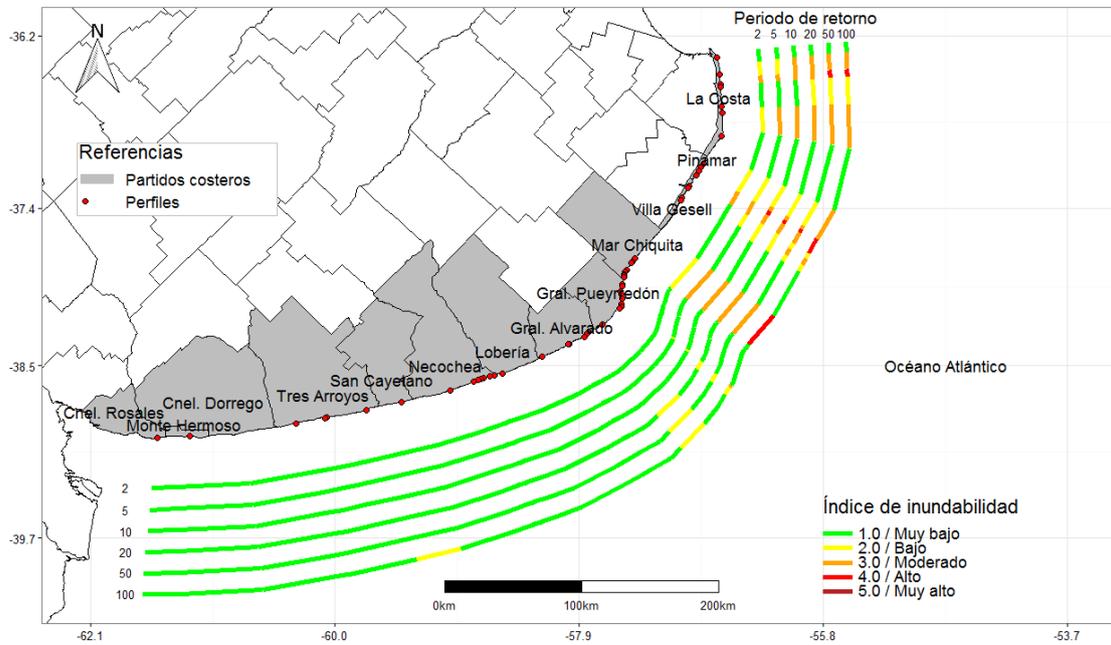


Figura 5.1. Índice de inundación.

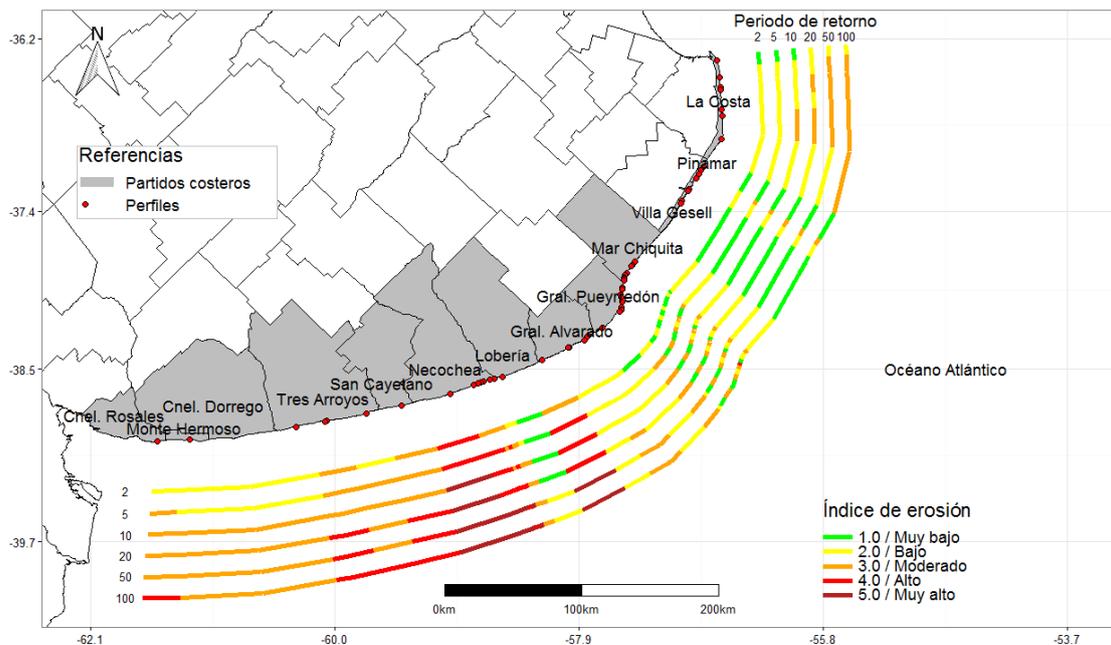


Figura 5.2. Índice de erosión.

De la combinación entre los dos mapas anteriores se obtiene el *índice de Peligrosidad*, el cual se presenta en el mapa de la Figura 5.3.

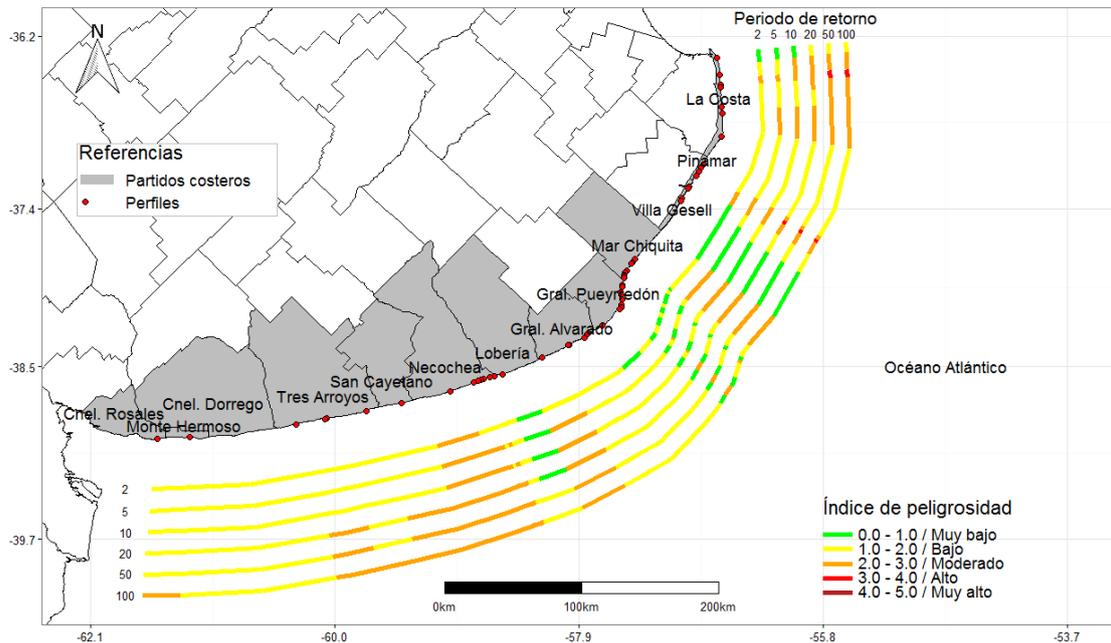


Figura 5.3. Índice de Peligrosidad.

Este mapa muestra la distribución espacial de la peligrosidad y su incremento a partir de la consideración de temporales asociados a períodos de retorno elevados. En efecto, promediando el valor de dicho índice en todo el frente costero se obtienen condiciones de *peligrosidad baja* ($1 < IP < 2$) para temporales de hasta $Tr=20$ años, mientras que se asciende a la escala de *peligrosidad moderada* ($2 < IP < 3$) para el impacto de temporales asociados a $Tr=50$ y 100 años. En casos puntuales como Santa Teresita y Valeria del Mar se obtuvieron valores de $IP=3,5$ (*peligrosidad alta*) para períodos de retorno de 50 y 100 años.

La Figura 5.4 muestra el mapa correspondiente al *índice de Vulnerabilidad* de la costa marítima bonaerense, construido a partir del trabajo de Natenzon y Seattone Passe (2015). El mismo indica una condición de vulnerabilidad alta para los partidos de La Costa y General Pueyrredón, disminuyendo a la condición de bajo y moderado para el resto de los distritos.

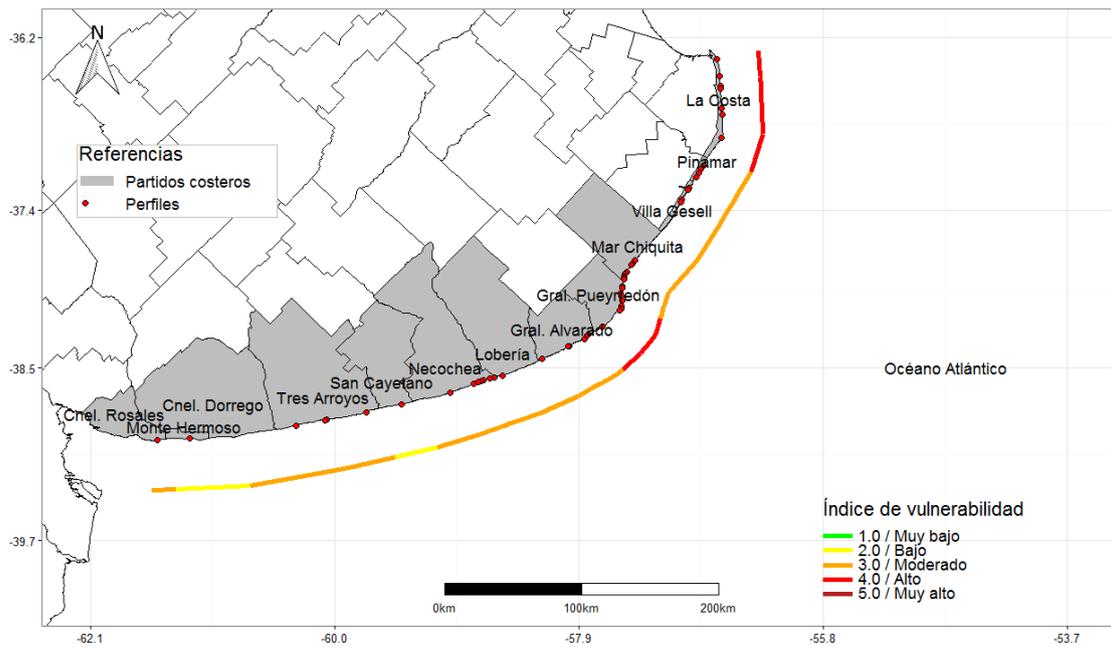


Figura 5.4. Índice de Vulnerabilidad.

Finalmente, la integración de los resultados anteriores permite construir el mapa de riesgo para la costa bonaerense, presentado en la Figura 5.5.

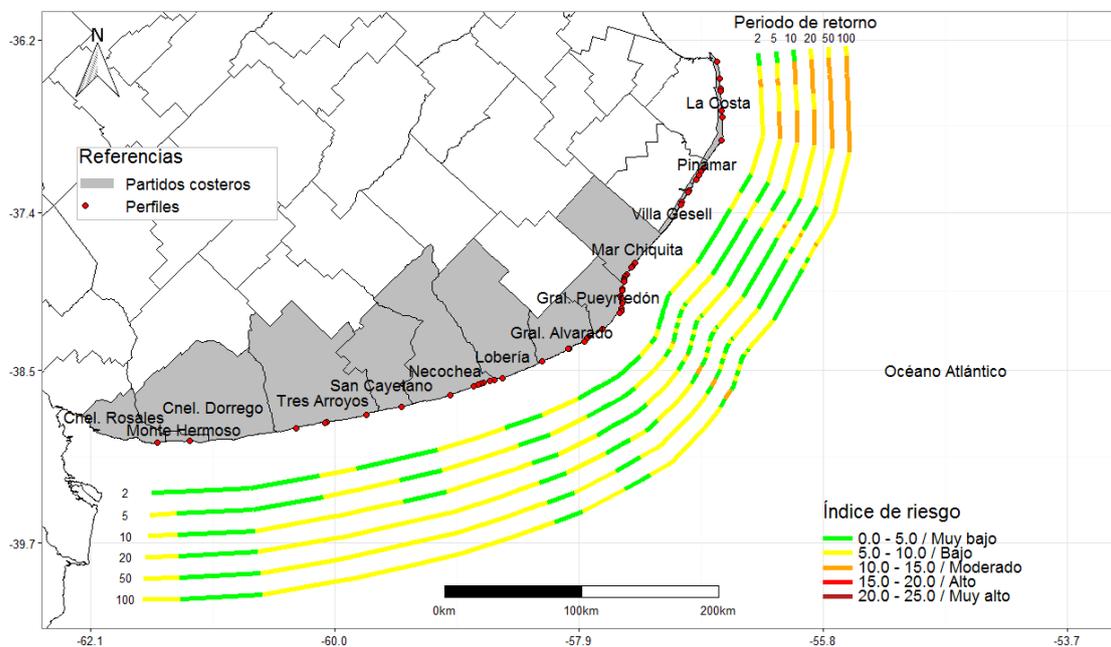


Figura 5.5. Índice de Riesgo.

La distribución del riesgo a lo largo de la franja costera que se evalúa muestra el predominio de niveles bajo/muy bajo que se incrementan levemente con el aumento del período de retorno considerado. El promedio de toda el área de estudio da un valor de $IR < 5$ (muy bajo) para $Tr = 2$ años y un valor de $5 < IR < 10$ (bajo) para el resto de los períodos de retorno considerados.

Las excepciones están dadas por el partido de La Costa, donde se observa en gran medida un valor de riesgo moderado, y los casos puntuales de Valeria del Mar y Luro (Mar del Plata) donde también se observa un riesgo moderado para períodos de retorno elevados.

Para una mejor interpretación de los resultados pueden observarse los valores puntuales obtenidos en los diferentes sitios de análisis presentados en la Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo⁶.

⁶ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

6 IMPACTO DE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

6.1 Elevación del nivel medio del mar

Los resultados obtenidos en el Informe 4.2 de esta Asistencia Técnica indican que las proyecciones de cambio en las variables relacionadas con el oleaje y la marea meteorológica son muy bajas, inclusive para los escenarios de cambio climático relativamente severos, siendo estos cambios en general no significativos.

En contraposición a lo anterior, las proyecciones de aumento de nivel medio del mar en la región sí son significativas, siendo del orden de 20 cm para mediados del siglo XXI y en el rango 30 cm – 1 m para finales del siglo XXI, según qué escenario se considere.

Los resultados mencionados fueron obtenidos mediante el análisis de las series temporales de aumento del nivel medio del mar en nueve puntos a lo largo de la costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires obtenidos de los modelos de circulación global (Figura 6.1; los nueve puntos corresponden a puntos de agua en la costa de Buenos Aires en la malla de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ en la que están definidos los datos; en particular los puntos 5 y 9 corresponden a nodos acuáticos de acuerdo a la discretización de los modelos globales, a pesar de estar localizados en tierra en la realidad).

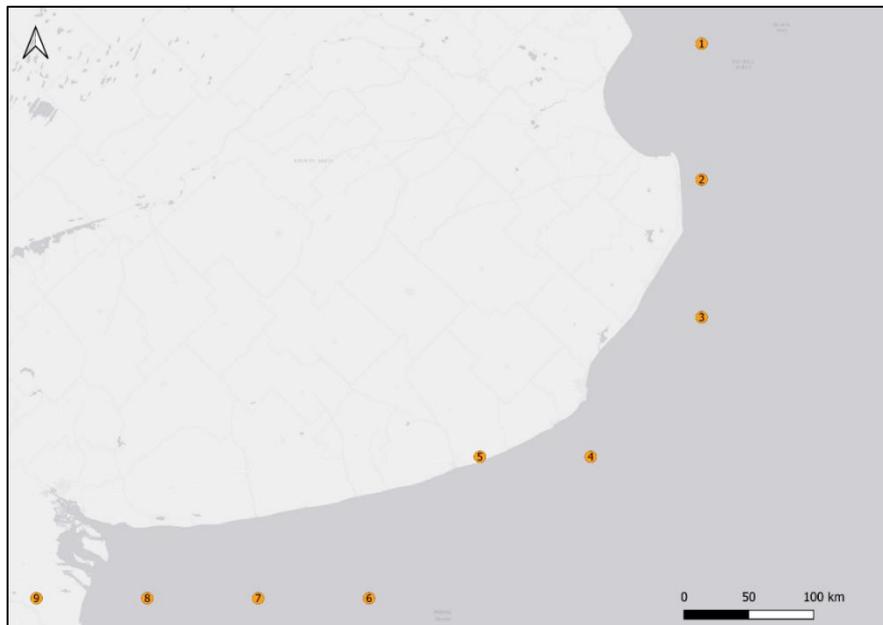


Figura 6.1. Localización de los puntos para los cuales se extraen las series temporales de aumento de nivel de mar en la provincia de Buenos Aires.

Como síntesis de los resultados, las Tabla 6.1 y

Tabla 6.2 muestran las proyecciones de nivel medio del mar regional para dos escenarios climáticos destacados: RCP4.5 (escenario de estabilización de emisiones y otros forzantes a 2100) y RCP8.5 (escenario de altas emisiones y otros forzantes, sin estabilización a 2100), obtenidos a partir de los datos utilizados para realizar los análisis de cambio en el nivel de mar regional del IPCC AR5.

Tabla 6.1. Aumento de nivel medio del mar en 9 puntos a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires para escenarios RCP 4.5 en los años 2045 y 2100, respecto a la media del período 1985-2005.

Nodo	Aumento NMM a 2045 (RCP4.5) [cm]			Aumento NMM a 2100 (RCP4.5) [cm]		
	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.
1	18	10	26	47	27	70
2	18	10	28	48	28	71
3	19	10	28	48	28	71
4	18	11	26	48	29	71
5	17	11	24	46	29	66
6	17	11	24	47	29	67
7	17	10	25	47	28	68
8	17	10	25	47	28	69
9	16	9	24	47	28	68

Tabla 6.2. Aumento de nivel medio del mar en 9 puntos a lo largo de la costa de la provincia de Buenos Aires para escenarios RCP 8.5 en los años 2045 y 2100, respecto a la media del período 1985-2005.

Nodo	Aumento NMM a 2045 (RCP8.5) [cm]			Aumento NMM a 2100 (RCP8.5) [cm]		
	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Valor medio	Lim. Inf.	Lim. Sup.
1	20	12	29	70	40	107
2	20	12	29	72	41	109
3	20	13	28	72	42	109
4	20	13	28	70	42	105
5	19	13	26	66	46	93
6	19	13	26	67	45	96
7	19	12	26	67	42	97
8	20	12	29	70	40	107
9	20	12	29	72	41	109

Los resultados presentados en ambas tablas fueron utilizados para evaluar los efectos potenciales de la elevación del nivel medio del mar sobre la costa bonaerense. Dicha evaluación

contempla tanto el incremento del riesgo costero por impacto de los temporales, como así también los efectos erosivos a largo plazo caracterizados por el retroceso de la línea de costa en toda el área de estudio.

6.2 Estimación de riesgo para escenarios futuros

Para estimar el efecto de la elevación del nivel medio del mar (NMM) sobre el impacto generado por temporales de distinta magnitud se consideró simplemente un incremento en los niveles de inundación estimados en el parágrafo 4.1 coincidente con el valor medio de las proyecciones correspondientes a los horizontes 2045 y 2100.

Se optó por realizar el análisis utilizando solamente las proyecciones que corresponden al modelo RCP 8.5 por ser los de mayor severidad. En consecuencia, para cada uno de los sitios de análisis, se estimaron valores de niveles de inundación futuros a partir del incremento generado por los datos de la

Tabla 6.2 correspondientes al nodo más cercano en cada caso. Este cálculo simplificado asume que los parámetros asociados al oleaje y a la marea permanecen inalterados.

Asimismo, el incremento en los *niveles de inundación* modifica el resto de las variables que se relacionan con éste, como ser: *altura de revancha*, *índice de inundación*, *índice de peligrosidad*, e *índice de riesgo*. Todas estas variables fueron estimadas para las condiciones futuras asociadas a las proyecciones de los horizontes 2045 y 2100.

Horizonte 2045 Escenario RCP 8.5

Asumiendo un aumento del NMM que para el horizonte del año 2045 proyecta valores medios que oscilan entre 18 y 20 cm a lo largo de la costa bonaerense (

Tabla 6.2) se reconstruyeron los mapas correspondientes a las variables mencionadas, los cuales son presentados en las Figura 6.2 a Figura 6.6, respectivamente.

La Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo⁷ contiene la información más relevante de estos resultados.

⁷ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

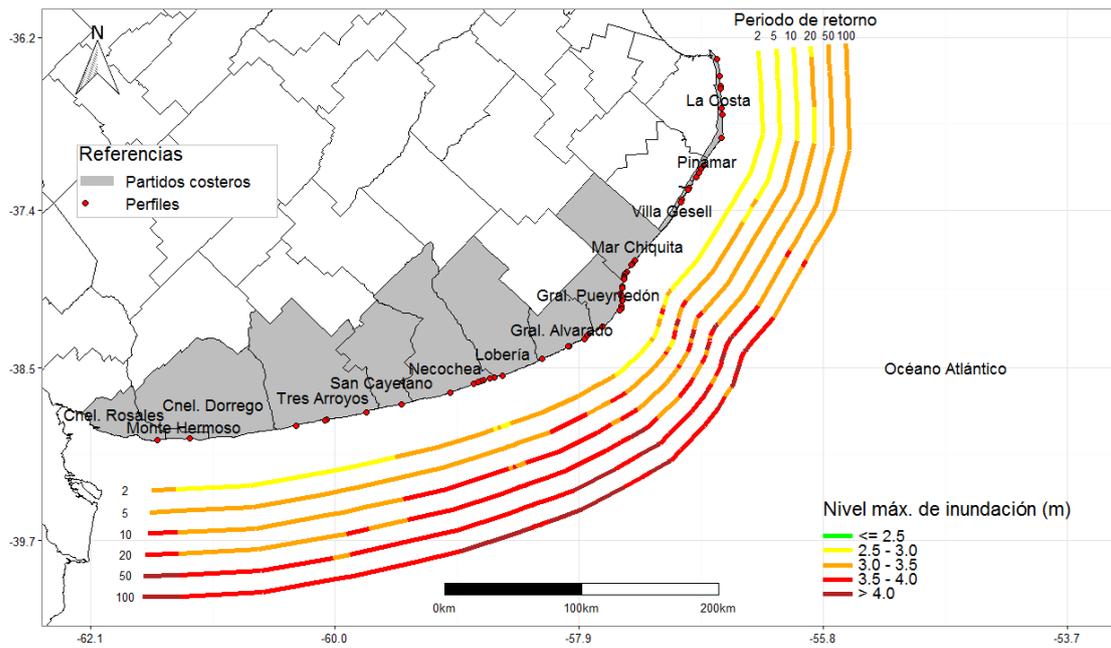


Figura 6.2. Nivel máximo futuro en la costa (escenario RCP 8.5 - horizonte 2045).

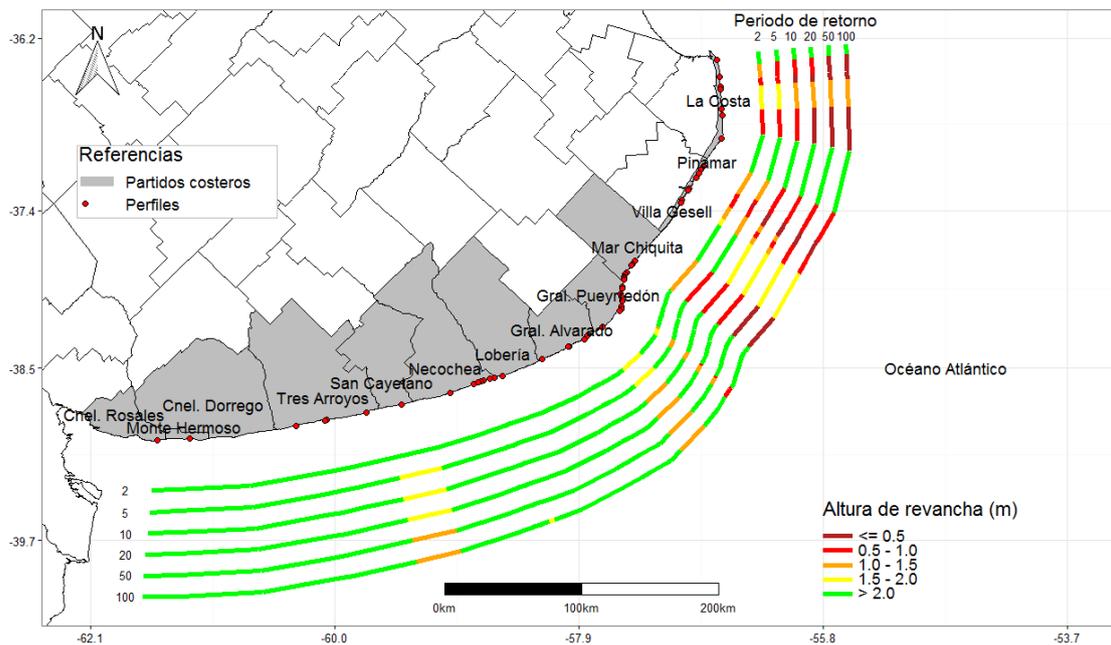


Figura 6.3. Altura de revancha futura (escenario RCP 8.5 - horizonte 2045).

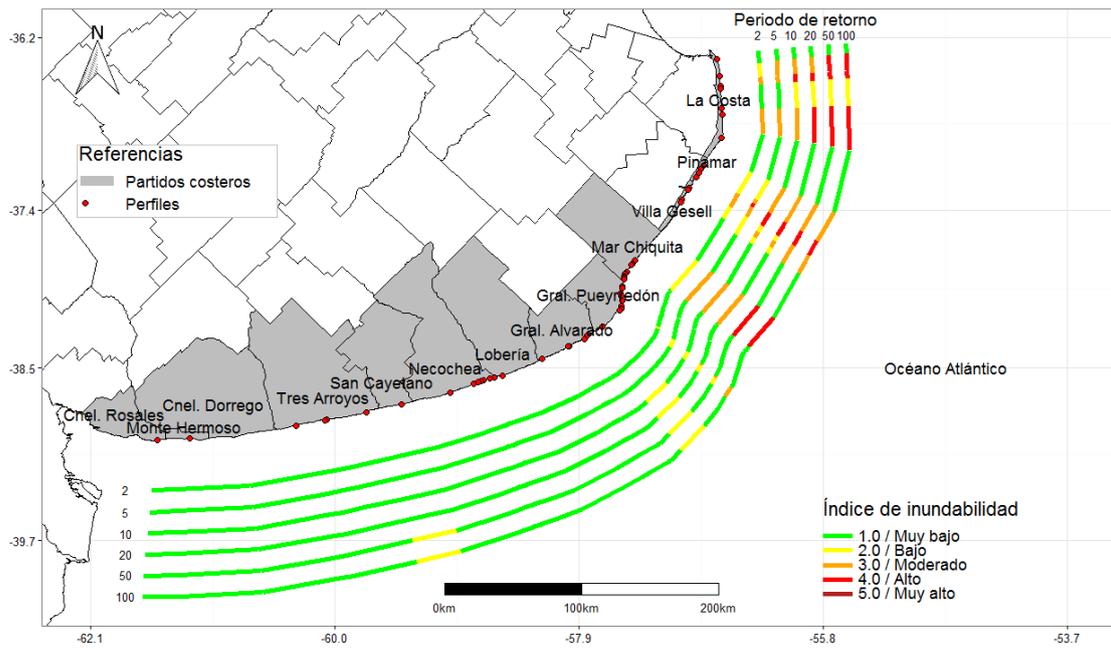


Figura 6.4. Índice de inundación futuro (escenario RCP 8.5 - horizonte 2045).

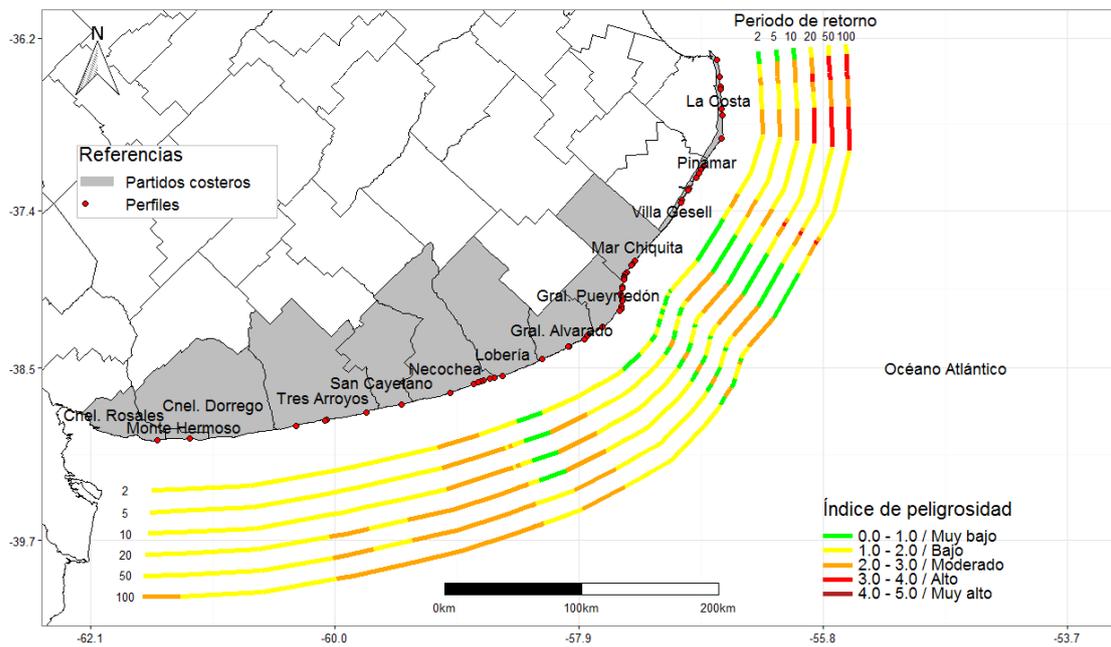


Figura 6.5. Índice de Peligrosidad futuro (escenario RCP 8.5 - horizonte 2045).

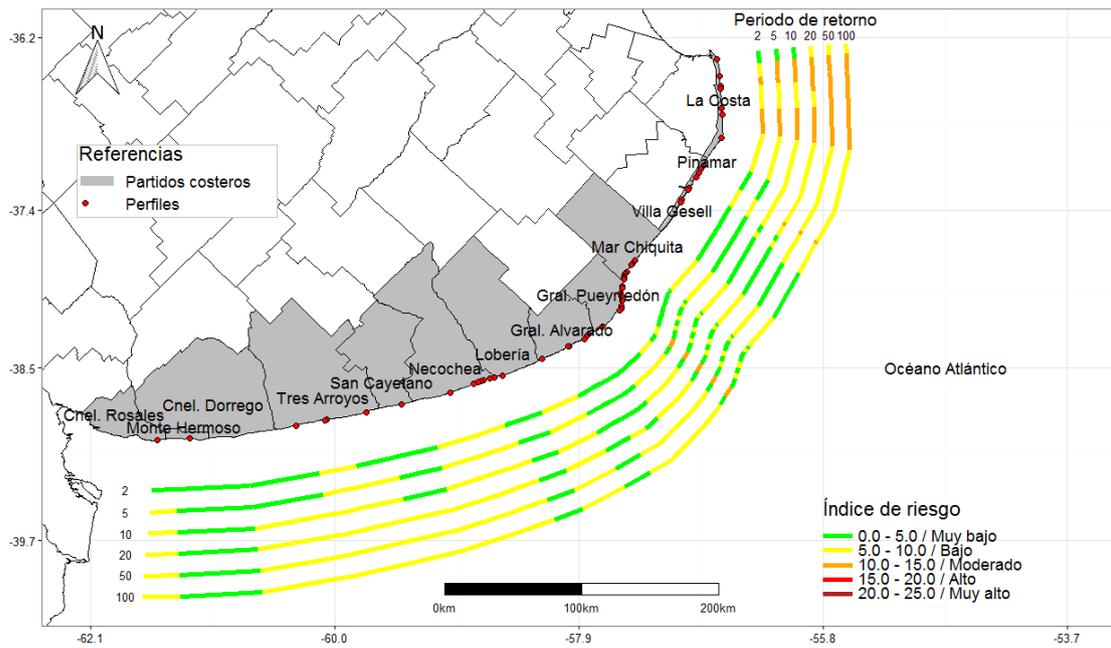


Figura 6.6. Índice de Riesgo futuro (escenario RCP 8.5 - horizonte 2045).

El aumento en los niveles máximos de inundación para los diferentes períodos de retorno (Figura 6.2), y la consecuente reducción de las alturas de revancha (Figura 6.3) a lo largo de toda la costa marítima bonaerense, pueden evaluarse a través de los incrementos observados en el índice de inundación futuro para el horizonte 2045 (Figura 6.4).

En efecto, comparando los resultados de la Figura 6.4 con su equivalente para la condición presente (Figura 5.1) se obtiene un incremento promedio del índice de inundación (considerando todos los valores de T_r) a lo largo de toda la costa, de 6.8%. Los cambios más relevantes se observan en el partido de La Costa (Las Toninas, Santa Teresita y Mar de Ajó), en el partido de Pinamar (Balnearios la Pérgola y Cozumel), y en el partido de Mar Chiquita (calle San Martín) donde el índice adquiere la clasificación de “alto”. En menor medida se observan cambios en Villa Gesell (Calle 309, Calle 107, Mar de las pampas y Mar Azul) y General Pueyrredón (Luro y Playa Grande) donde el índice resulta “moderado”. Prácticamente no se observan cambios sobre el tramo costero más hacia el sur.

Como consecuencia de esto, el índice de riesgo aumenta su valor promedio para toda la costa bonaerense en un 3%. Los impactos más significativos, promediados por partido se producen en: La Costa (5.6%), Pinamar (8.3%), Villa Gesell (14.6%), Mar Chiquita (0.5%), y General Pueyrredón (3.3%).

Horizonte 2100 Escenario RCP 8.5

Asumiendo un aumento del NMM con un valor medio que oscila entre 66 y 72 cm a lo largo de la costa marítima bonaerense (

Tabla 6.2) se reconstruyeron los mapas correspondientes a las variables mencionadas, los cuales son presentados en las Figura 6.7 a Figura 6.11, respectivamente.

La Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo⁸ contiene la información más relevante de estos resultados.

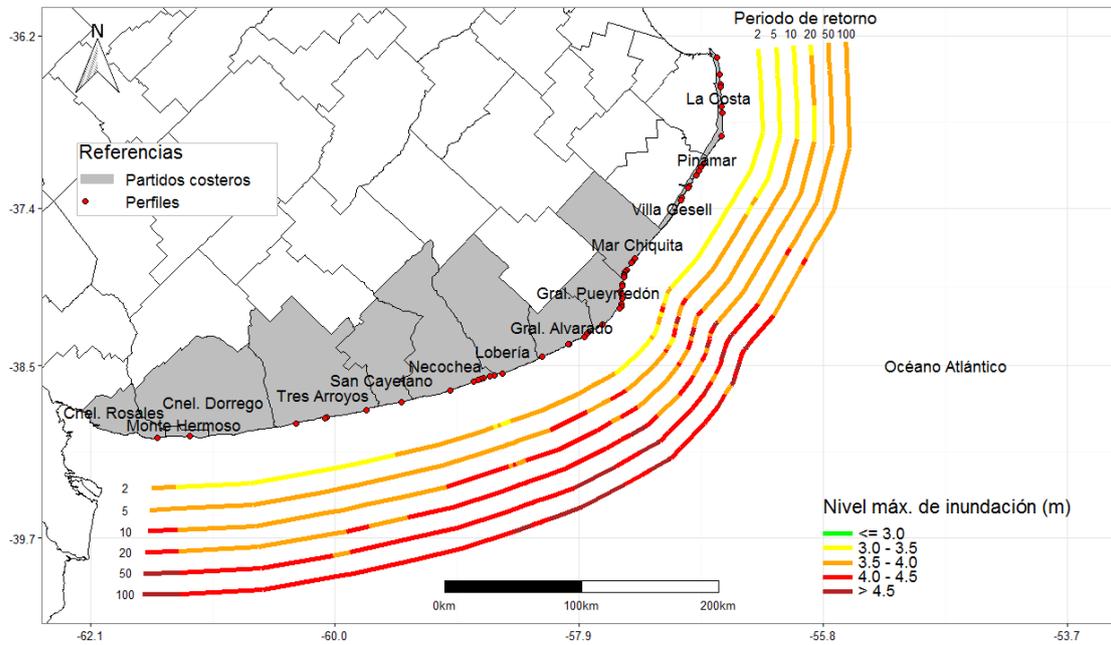


Figura 6.7. Nivel máximo futuro en la costa (escenario RCP 8.5 - horizonte 2100).

⁸ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

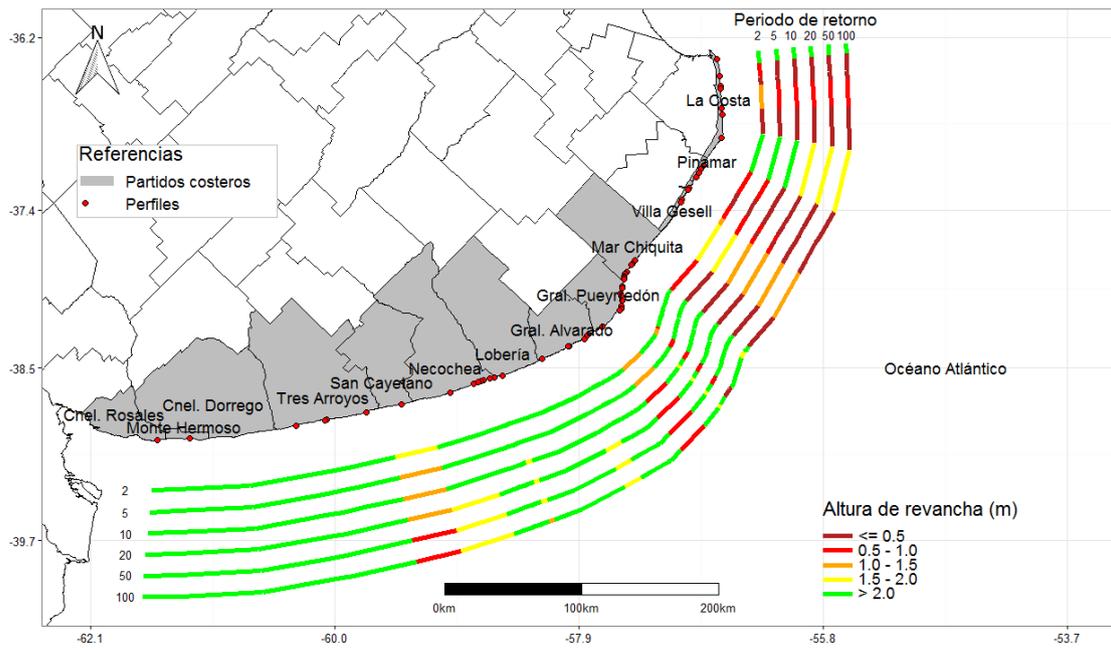


Figura 6.8. Altura de revancha futura (escenario RCP 8.5 - horizonte 2100).

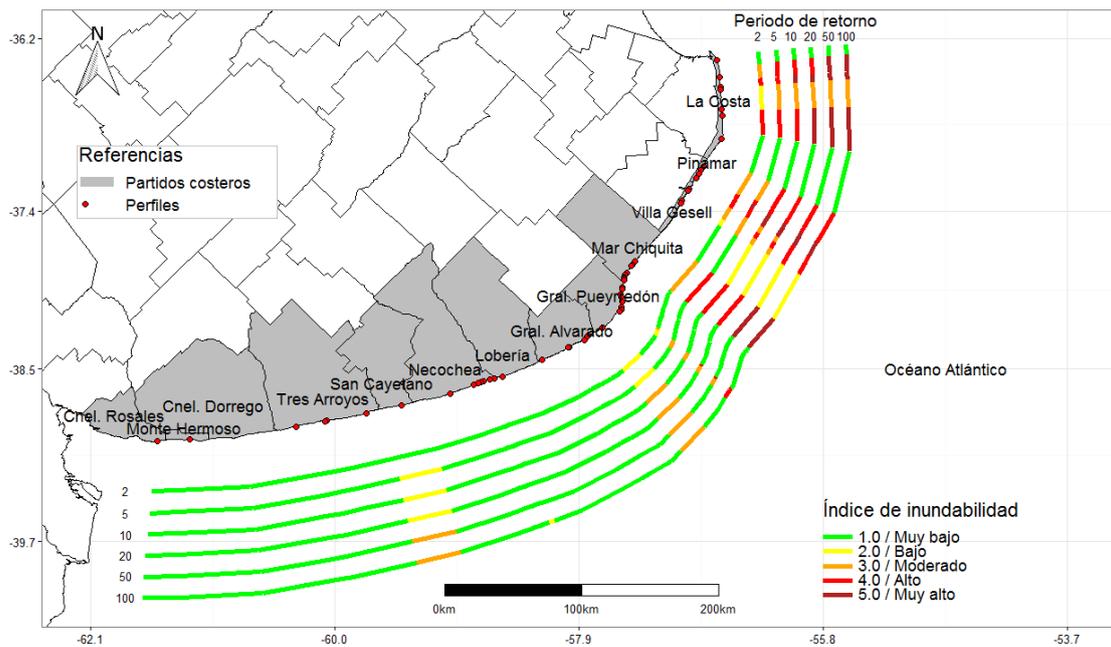


Figura 6.9. Índice de inundación futura (escenario RCP 8.5 - horizonte 2100).

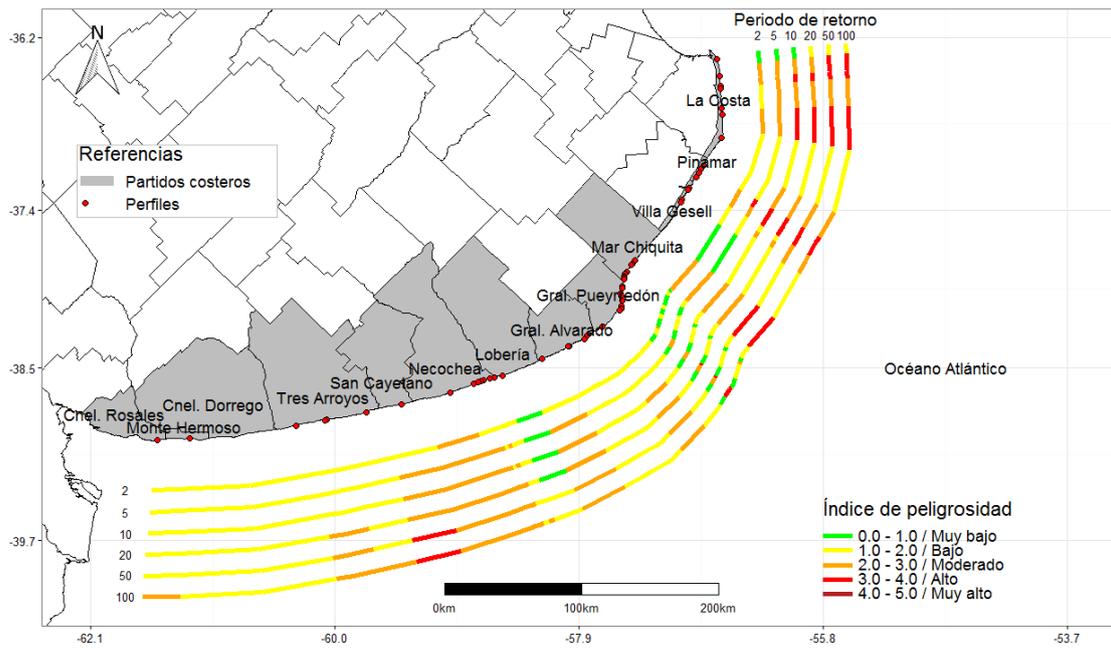


Figura 6.10. Índice de Peligrosidad futuro (escenario RCP 8.5 - horizonte 2100).

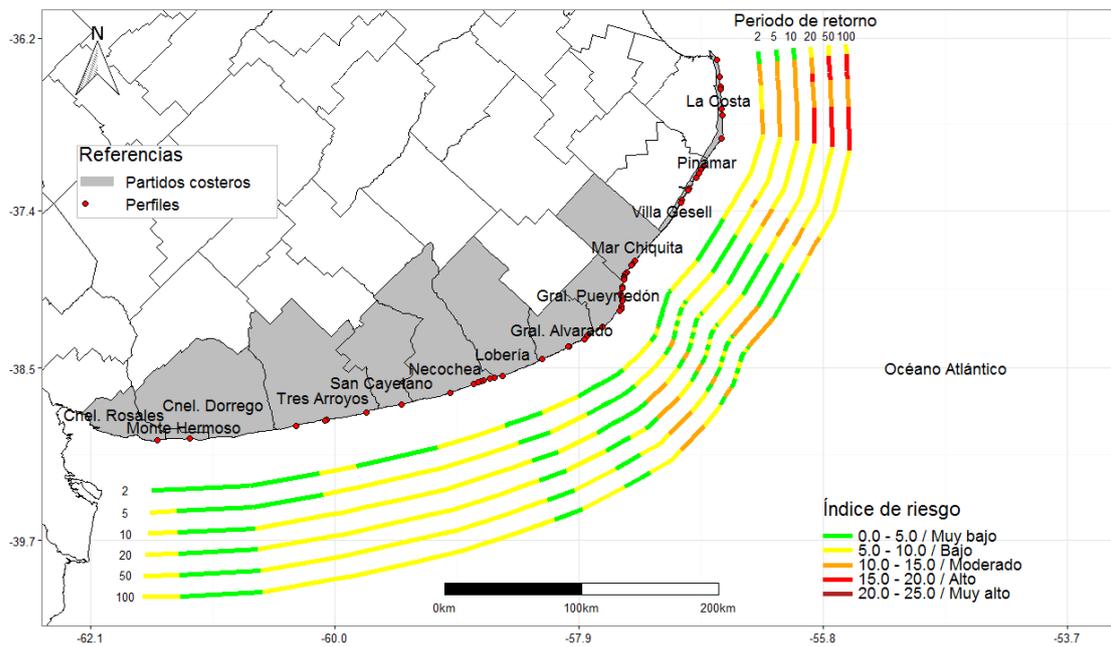


Figura 6.11. Índice de Riesgo futuro (escenario RCP 8.5 - horizonte 2100).

Las proyecciones del incremento en el NNM para el horizonte 2100 predicen impactos significativos sobre los niveles de inundación a lo largo de la costa bonaerense. La Figura 6.9 da cuenta de valores del *índice de inundación futuro* clasificados como “muy alto”, lo cual, según la

escala determinada, indica eventos de sobrepaso para algunas ubicaciones puntuales con períodos de retorno elevados. Dicha situación se observa para las ubicaciones de Las Toninas (valores de $Tr > 50$ años), Santa Teresita ($Tr > 10$ años), Mar de Ajó ($Tr > 20$ años), Balneario La Pérgola ($Tr > 5$ años), Balneario Cozumel ($Tr > 10$ años) y Calle San Martín en Mar Chiquita ($Tr > 50$ años).

Aunque con efectos menos severos, el impacto también es significativo en el partido de General Pueyrredón, alcanzando índices de inundación “altos” en Luro y Playa Grande y “moderado” en Chapadmalal. Más al sur se destaca también el índice moderado en el parador San Cayetano.

El incremento promedio del índice de inundación para este escenario en toda la costa alcanza un valor de 25.8 %.

El impacto de estas proyecciones sobre el *índice de riesgo* también resulta relevante, con un valor promedio para toda la costa bonaerense que asciende a 12%. Los incrementos más significativos, promediados por partido se producen en: La Costa (23.1%), Pinamar (30%), Villa Gesell (50 %), Mar Chiquita (3.4 %), y General Pueyrredón (11.9%).

Los casos puntuales más destacados resultan los de La Toninas, Santa Teresita y Mar de Ajó; dónde la clasificación del riesgo muestra índices de tipo “alto” para eventos con período de retorno de 20 años en adelante.

6.3 Erosión a largo plazo

De manera independiente al efecto causado por la acción de los temporales, existe una erosión de tipo estructural que se desarrolla en forma progresiva a lo largo del tiempo por efecto de la elevación del nivel medio del mar.

Para estudiar los cambios sobre el perfil de equilibrio de una playa se suele utilizar la regla de Bruun (1962), que determina la erosión por cambios en el nivel del mar y la profundidad de cierre. Esta relación determina el orden de magnitud de la erosión a largo plazo debido al cambio climático en ausencia de otras fuentes de cambios morfodinámicos.

Con base en la formulación de Dean (1977) y en diversos estudios antecedentes, se puede afirmar que la forma de un perfil de playa queda definida por la velocidad de caída del grano de la arena que la compone, que es función del diámetro medio D_{50} y de la densidad del sedimento. Por lo tanto, resulta la forma del perfil independiente de los parámetros que definen el oleaje incidente en la playa.

Imponiendo como hipótesis que con el nuevo nivel del mar se establecerá un perfil de equilibrio con forma idéntica al existente antes del ascenso, y que el volumen de arena de la playa debe conservarse (Figura 6.12), por lo cual se utiliza la siguiente expresión de cálculo:

$$R = S \frac{L}{B + h}$$

siendo:

R: retroceso de la línea de costa (m).

- S: aumento del nivel del mar (m).
- L: longitud del perfil entre B y h (m).
- B: altura de la duna u otra estimación de elevación para el área erosionada (m).
- h: profundidad de cierre (m).

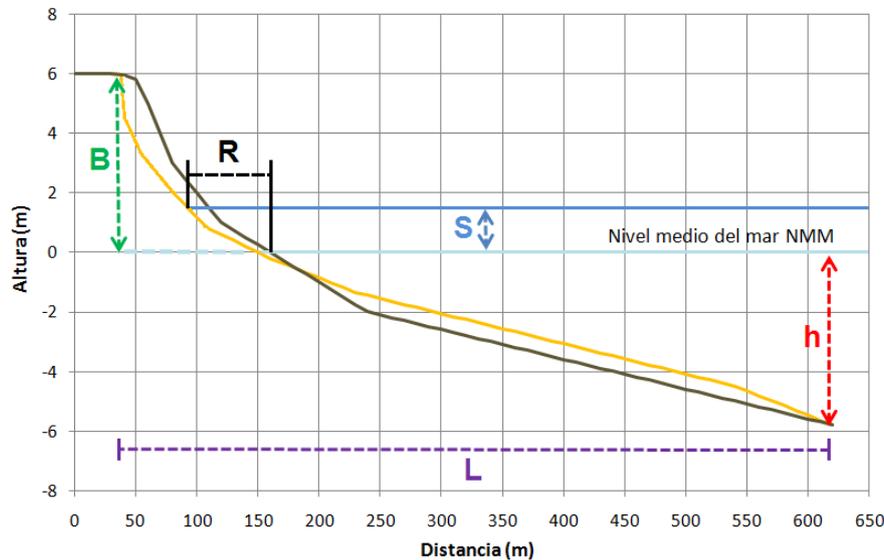


Figura 6.12. Esquema de perfil de playa y parámetros característicos de la fórmula de Bruun.

El esquema de cálculo se completa con la estimación de la profundidad de cierre h para cada perfil. En este caso, dicho parámetro fue estimado a partir de la aplicación de la fórmula de Hallermeier (1981), utilizando los datos de olas del periodo 1979-2018. La expresión correspondiente es la siguiente:

$$h = 2,28 \cdot H_{e,t} - 68,5 \cdot \left(\frac{H_{e,t}^2}{g \cdot T_{e,t}^2} \right)$$

siendo:

- h : profundidad de cierre (m).
- $H_{e,t}$: altura de ola significativa con frecuencia de excedencia del 0,137% (m).
- g : aceleración de la gravedad (m/s^2).
- $T_{e,t}$: periodo de la ola asociado a $H_{e,t}$ (s).

Para la aplicación de las expresiones de cálculo se utilizaron los valores medios de las proyecciones presentadas en las Tabla 6.1 y Tabla 6.2, los cuales representan estimaciones para aumento del nivel del mar correspondientes a los horizontes 2045 y 2100 bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5. Los parámetros B (altura de duna) y L (longitud del perfil) fueron obtenidos a partir de la geometría los perfiles de playa que fueron relevados a lo largo de toda la costa bonaerense.

Los resultados son presentados en forma de mapa en la Figura 6.13, dónde se muestra la variación del retroceso de costa estimado a lo largo de todo el frente costero en estudio, considerando los cuatro escenarios de proyecciones mencionados.

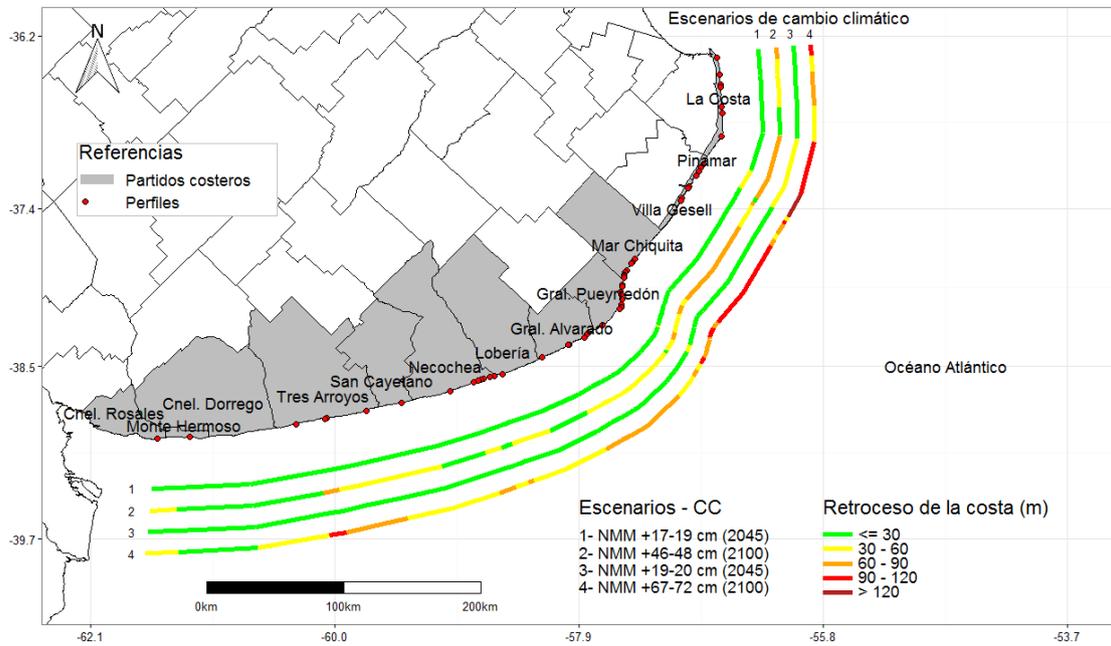


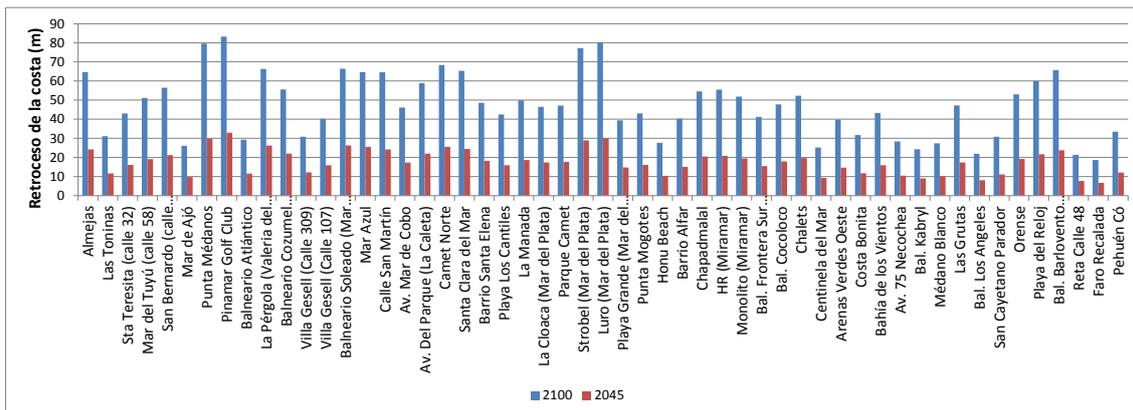
Figura 6.13. Retroceso de la línea de costa a largo plazo para horizontes 2045 y 2100.

En primer lugar, se observan claras diferencias entre los niveles de retroceso correspondientes a los horizontes proyectados para el año 2045 y para el año 2100, respectivamente.

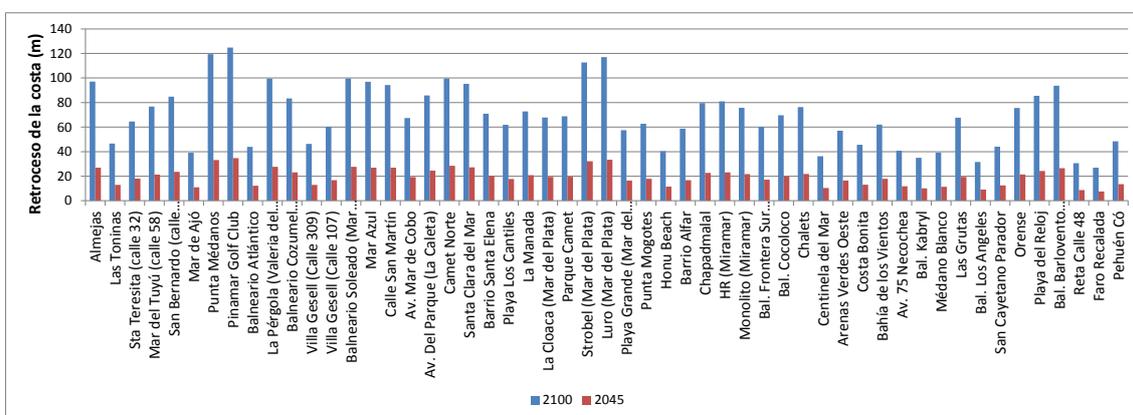
Computando el promedio de retroceso de línea de costa para la totalidad del área de estudio los resultados indican para el año 2045 valores de 17.8 m (escenario RCP 4.5) y 19.6 m (escenario RCP 8.5). Mientras que los promedios para el horizonte 2100 muestran valores de retroceso de 47.4 m (escenario RCP 4.5) y 69.7 m (escenario RCP 8.5).

La interpretación de los mapas permite observar una importante diferencia en la variación de los resultados a lo largo del área de estudio, siendo el tramo con mayor nivel de retroceso estimado el comprendido entre los municipios de Pinamar y General Pueyrredón. En menor medida, se destacan algunos sectores del partido de La Costa y Tres Arroyos.

La Figura 6.14 permite ampliar la visualización de los resultados, indicando los valores puntuales de retroceso de la línea de costa obtenidos para los dos horizontes considerados mediante ambos escenarios.



a) Escenario RCP 4.5



b) Escenario RCP 8.5

Figura 6.14. Valores puntuales de retroceso de la línea de costa a largo plazo.

Los resultados de este análisis pueden obtenerse también en la Planilla de Variables para el Análisis del Riesgo⁹

⁹ https://www.ina.gov.ar/lha/pdf/Informe_5.1_Variables_Atlas.xlsx

7 CONCLUSIONES

La aplicación de herramientas de cálculo simplificadas permitió el desarrollo un amplio análisis orientado a caracterizar el riesgo costero del área marítima de la provincia de Buenos Aires a partir de la cuantificación de un conjunto destacado de variables. Esta tarea fue realizada mediante la evaluación de 53 perfiles de playa distribuidos a lo largo de una extensión de más de 600 km.

Los resultados obtenidos en este análisis permitieron confeccionar un Atlas de Riesgo Costero constituido por una cartografía que permite evaluar el impacto de temporales con diferente grado de severidad sobre la costa, tanto para las condiciones actuales del clima como para escenarios futuros que proyectan diferentes incrementos en el nivel medio del mar (NMM).

Considerando el propósito de un enfoque regional para este estudio, los resultados obtenidos permiten obtener las siguientes conclusiones generales acerca del riesgo sobre el área de estudio en las condiciones actuales del clima:

- La cuantificación de los impactos en términos relativos mostró índices de inundación elevados para el sector Noreste (desde partido de La Costa hasta Mar Chiquita) e índices de erosión más destacados en el sector Sudoeste de la costa bonaerense (Partidos de Necochea y General Alvarado, principalmente)
- Promediando el *índice de peligrosidad* en todo el frente costero se obtienen condiciones de *peligrosidad baja* ($1 < IP < 2$) para temporales de hasta $Tr = 20$ años, mientras que asciende a la escala de *peligrosidad moderada* ($2 < IP < 3$) para el impacto de temporales asociados a $Tr = 50$ y 100 años. En casos puntuales como Santa Teresita y Valeria del Mar se obtuvieron valores de $IP = 3,5$ (*peligrosidad alta*) para períodos de retorno de 50 y 100 años.
- La evaluación de la vulnerabilidad obtenida a partir del trabajo de Natenzon y Seattone Passe (2015) presenta una condición de índice *alto* para los partidos de La Costa y General Pueyrredón, disminuyendo a la condición de *bajo y moderado* para el resto de los distritos.
- Como consecuencia de lo anterior, la distribución del riesgo a lo largo de la franja costera marítima de la provincia de Buenos Aires muestra el predominio de niveles bajo/muy bajo que se incrementan levemente con el aumento del período de retorno considerado. El promedio de toda el área de estudio da un valor de índice de riesgo $IR < 5$

(muy bajo) para temporales de $Tr = 2$ años y un valor de $5 < IR < 10$ (bajo) para el resto de los períodos de retorno considerados.

- Las excepciones están dadas por el partido de La Costa, donde se observa en gran medida un valor de riesgo moderado, y los casos puntuales de Valeria del Mar y Luro (Mar del Plata) donde también se observa un riesgo moderado para valores de Tr elevados.

El impacto potencial del cambio climático sobre las condiciones actuales fue evaluado mediante la consideración de las proyecciones de nivel medio del mar regional para dos escenarios climáticos destacados: RCP4.5 (escenario de estabilización de emisiones y otros forzantes a 2100) y RCP8.5 (escenario de altas emisiones y otros forzantes, sin estabilización a 2100). De este análisis surgen las siguientes conclusiones:

- La condición más severa para el horizonte 2045 (Escenario RCP 8.5) señala un incremento promedio del índice de inundación (considerando todos los valores de Tr) a lo largo de toda la costa, de 6.8%. Los cambios más relevantes se observan en el partido de La Costa (Las Toninas, Santa Teresita y Mar de Ajó), en el partido de Pinamar (Balnearios la Pérgola y Cozumel), en el partido de mar Chiquita (calle San Martín) donde el índice adquiere la clasificación de “alto”. En menor medida se observan cambios en Villa Gesell (Calle 309, Calle 107, Mar de las pampas y mar Azul) y General Pueyrredón (Luro y Playa Grande) donde el índice resulta moderado. Prácticamente no se observan cambios sobre el tramo costero más hacia el sur.
- Como consecuencia de esto, *el índice de riesgo* para el horizonte 2045 aumenta su valor promedio para toda la costa bonaerense en un 3%. Los impactos más significativos, promediados por partido se producen en: La Costa (5.6%), Pinamar (8.3%), Villa Gesell (14.6 %), Mar Chiquita (0.5 %), y General Pueyrredón (3.3%).
- La condición más severa para el horizonte 2100 (Escenario RCP 8.5) predice impactos significativos sobre los niveles de inundación a lo largo de la costa bonaerense, mostrando un incremento promedio del mismo de 25.8%.
- Para este escenario se observan valores del índice clasificados como “muy alto”, lo cual, según la escala determinada, indican eventos de sobrepaso para algunas ubicaciones puntuales con eventos de períodos de retorno (Tr) elevados. Dicha situación se observa para las ubicaciones de Las Toninas (valores de $Tr > 50$ años), Santa Teresita ($Tr > 10$ años), Mar de Ajó ($Tr > 20$ años), Balneario La Pérgola ($Tr > 5$ años), Balneario Cozumel ($Tr > 10$ años) y Calle San Martín en Mar Chiquita ($Tr > 50$ años).
- El impacto de estas proyecciones sobre el índice de riesgo para el horizonte 2100 también resulta relevante, con un valor promedio para toda la costa bonaerense que asciende a 12%. Los incrementos más significativos, promediados por partido se

producen en: La Costa (23.1%), Pinamar (30%), Villa Gesell (50 %), Mar Chiquita (3.4 %), y General Pueyrredón (11.9%).

- Los casos puntuales más destacados resultan los de La Toninas, Santa Teresita y Mar de Ajó; dónde la clasificación del riesgo muestra índices de tipo “alto” para eventos con período de retorno de 20 años en adelante.

El impacto de la elevación del nivel medio del mar en términos de “erosión estructural” fue evaluado mediante la aplicación de la regla de Bruun. De este análisis surgen las siguientes conclusiones generales para la costa marítima bonaerense:

- Computando el promedio de retroceso de línea de costa para la totalidad del área de estudio los resultados indican para el año 2045 valores de 17.8 m y 19.6 m, asociados a los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. Mientras que los promedios para el horizonte 2100 muestran valores de retroceso de 47.4 m y 69.7 m para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente.
- La interpretación de los mapas permite observar una importante diferencia en la variación de los resultados a lo largo del área de estudio, siendo el tramo con mayor nivel de retroceso estimado el comprendido entre los municipios de Pinamar y General Pueyrredón. En menor medida, se destacan algunos sectores del partido de La Costa y Tres Arroyos.

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., 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., 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.
- Bruun, P., 1962. Sea Level Rise as a Cause of Shore Erosion, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 88, 117-130.
- Bunicontro, P., Marcomini, S., 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., 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., 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., 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.G., 1977. Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts, Dept. of Civil Eng., Ocean Eng. Tech. Rep. 12, Univ. of Delaware.
- Dean, R., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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. Comitente: UNIDO/CTCN, abril 2019.
- INA, 2019b. Taller de Validación. Informe 3.2 Español. Proyecto INA 376, Informe LHA 05-376-19. Comitente: 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. Comitente: UNIDO/CTCN, diciembre 2019.
- INA, 2019d. Proyecciones de cambio del oleaje La marea meteorológica y el nivel medio del mar en la costa Atlántica de la provincia de Buenos Aires. Informe 4.2 Español. Proyecto INA 376, Informe LHA 07-376-20. Comitente: UNIDO/CTCN, febrero 2020.
- INDEC, 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010: indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-41-135
- IPCC, 2007. The Physical Basis Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>.
- Isla, F., Bértola, G., Farenga, M., Serra, S., 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., 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., Albisetti, C.F., 2017. Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited. *Ocean and Coastal Management* Vol. 156: 107-116.

- López, R., 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., 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., López, R., 2008. Erosión y manejo costero de Villa Gesell. Libro, Buenos Aires: Unión por Gesell.
- Marcomini, S., 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., 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., 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., 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., Isla, F., 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.
- Natenzon, C.E., 2007. La vulnerabilidad social como dimensión del riesgo. Análisis de la zona costera del Río de la Plata. En: M.V Fernández Caso (Ed.). *Geografía y territorios en Transformación. Nuevos Temas Para Pensar La Enseñanza*, (85-111). Buenos Aires: NOVEDUC.
- Natenzon, C.E., Seattone Passe, J., 2015. Vulnerabilidad social, Amenaza y Riesgo frente al Cambio Climático. Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de La Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Perillo, G., Pérez, D., Piccolo, M., Palma, E., 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., López, R., 2012. Vulnerabilidad a la erosión costera entre las localidades de Mar de Cobo y Mar Chiquita, provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Santoró, 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., Loschacoff, S., 2012. Rompeolas aislados como estructuras de protección costera, recuperación de playas. VII Congreso argentino de Ingeniería Portuaria – AADIP, 2012.

- SHN, 1975a. Carta Náutica H 250, Rada Mar del Plata. Buenos Aires, Argentina. Servicio de Hidrografía Naval, Departamento de Artes Gráficas, escala 1:50.000, 1 hoja.
- SHN, 1975b. Carta Náutica H 251, Puerto de Mar del Plata. Buenos Aires, Argentina. Servicio de Hidrografía Naval, 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, Servicio de Hidrografía Naval, p. 4, Buenos Aires.
- SHN, 2009a. Tablas de Marea. Servicio de Hidrografía Naval, Armada Argentina.
- SHN, 2009b. Tablas de marea. Servicio de Hidrografía Naval, 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., 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., 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., 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.