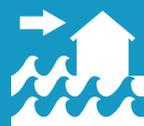


NAP Costas

Plan Nacional de
Adaptación Costera
de Uruguay

Documento preparatorio

Casos piloto. Piriápolis (Maldonado)





IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



MVOTMA

Ministerio de Vivienda
Ordenamiento Territorial
y Medio Ambiente



CTCN

CLIMATE TECHNOLOGY CENTRE & NETWORK



**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS
IMPACTOS, LA VULNERABILIDAD Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN
LA ZONA COSTERA DE URUGUAY**

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PIRIÁPOLIS (MALDONADO)

Han elaborado este informe:

Ing. Patricia González-Lamuño

Dr. Saúl Torres-Ortega

Dr. Alexandra Toimil

Prof. Raúl Medina

Ing. Moisés Álvarez Cuesta

Ing. Sara Sanz Sáenz

Además, han participado en el proyecto:

Dr. Paula Camus

Dr. Melisa Menéndez

Dr. Marta Ramírez

Tec. Sheila Abad

Dr. Pedro Díaz-Simal

Ing. Juan Ortiz

El proyecto se ha desarrollado bajo la dirección del Prof. Iñigo Losada Rodríguez.

Nota: En este documento se utiliza la coma (p.ej. 85,32) como indicador decimal, y el punto (p.ej. 250.000) como separador de miles y millones.

Fotografía de portada: Playa de Piriápolis. Departamento de Maldonado. Fuente: Marcelo Campi, bajo licencia CC BY-SA 2.0.

ÍNDICE

Resumen Ejecutivo	3
Antecedentes	7
1 Características de la zona piloto.....	8
1.1 Descripción general y diagnóstico.....	8
2 Clima marítimo en la zona de estudio.....	12
2.1 Dinámicas históricas.....	12
2.2 Dinámicas futuras.....	16
2.3 Transformación del oleaje.....	17
3 Riesgo de inundación costera.....	17
3.1 Exposición.....	17
3.1.1 Exposición socioeconómica.....	17
3.1.2 Exposición física.....	20
3.2 Peligrosidad	21
3.2.1 Mapas de inundación	21
3.3 Riesgo	26
3.3.1 Población afectada por inundación costera.....	26
3.3.2 Daños sobre los activos construidos debidos a inundación costera	29
4 Riesgo de erosión costera	32
4.1 Exposición.....	32
4.1.1 Exposición socioeconómica.....	32
4.1.2 Exposición física.....	33
4.2 Peligrosidad	34
4.2.1 Retroceso de la línea de costa.....	35
4.3 Riesgo	38
5 Conclusiones.....	41
6 Referencias.....	43

RESUMEN EJECUTIVO

DESCRIPCIÓN

- La playa de Piriápolis es una playa urbana ubicada en la ciudad de mismo nombre en el Departamento de Maldonado.
- Es una playa de aproximadamente 3.200 metros de longitud, que se encuentra confinada en su extremo este por el cerro de San Antonio y el puerto construido en su falda, no teniendo confinamiento, desde el punto de vista del transporte de sedimentos, en su extremo oeste (Playa Grande).
- La playa tiene la forma típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por los cabos y puntas exteriores existentes (Punta Negra, Cerro de San Antonio), y en última instancia por el dique exterior del puerto.

DIAGNÓSTICO

A partir de la información del riesgo percibido por los agentes locales y del análisis de imágenes históricas de la playa se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Carece de playa seca en algunos puntos, motivado por la construcción del puerto, que movió arena de la zona central a la zona este, y por la construcción de un paseo marítimo sobre las dunas existentes.
- El transporte de sedimentos, la presencia de barras y la morfología de la playa seca está muy condicionada por la presencia de espigones transversales.

DINÁMICAS ACTUALES

- La zona de estudio se localiza en la zona externa del estuario del Río de la Plata, donde tienen lugar procesos complejos debido, entre otros, a la interacción del flujo entrante hacia el continente en las zonas profundas y el flujo de descarga por las zonas someras.
- Playa de Piriápolis una forma de “gancho” o “medio corazón” gobernada por la dirección del flujo medio de energía del oleaje (135 - 180°).
- La altura de ola asociada al percentil 50% es menor a 1,5 metros, y la altura de ola asociada al percentil 95% es igual a 3 metros.
- El patrón de corrientes en la zona está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea junto con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos.

DINÁMICAS FUTURAS

- El aumento del nivel medio del mar esperado en 2100 en la costa de Uruguay es de 0,93 metros para el peor escenario (RCP8.5).
- La magnitud de los cambios en 2100 de los parámetros del oleaje es pequeña. Se esperan cambios de altura de ola significativa del orden de 0,03 - 0,04 m para los incrementos y 0,04 -

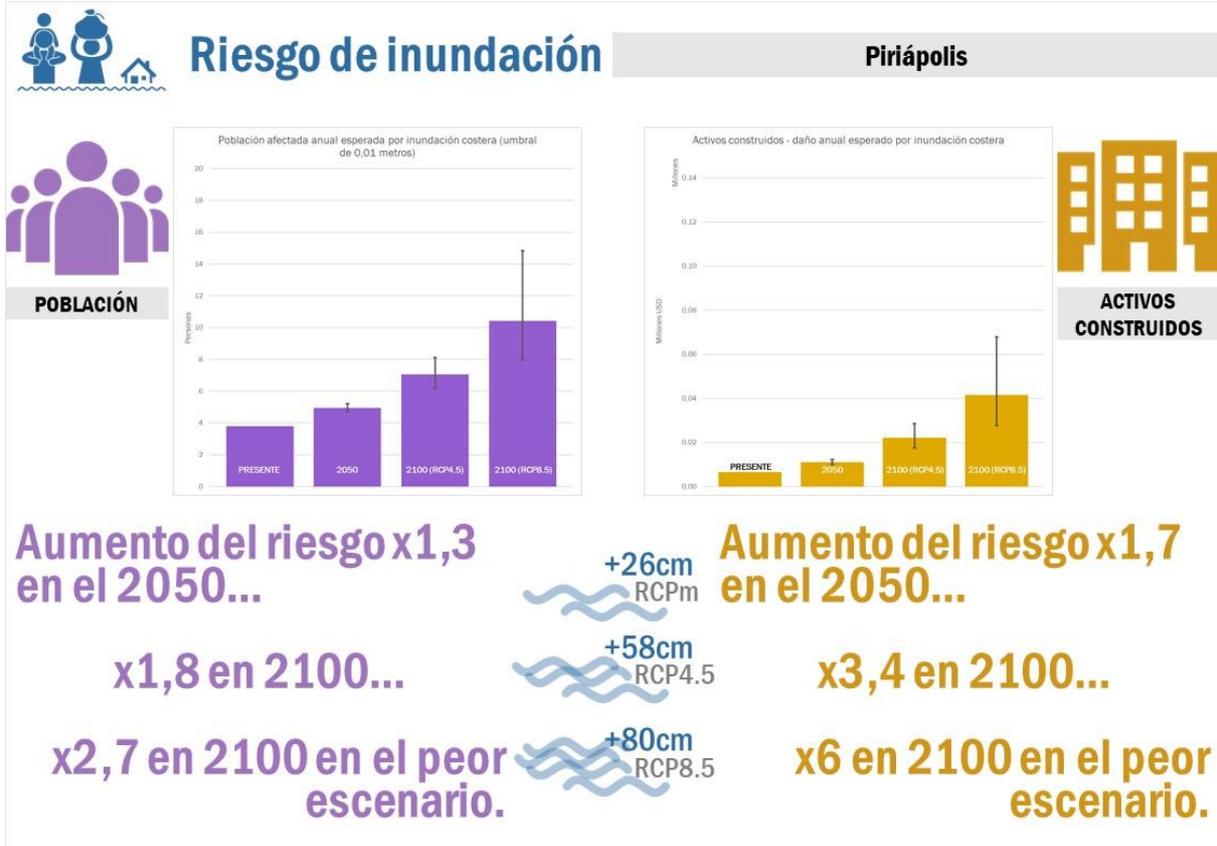
0,05 m para las disminuciones, cambios positivos de periodo de pico del orden de 0,05 s y negativos del orden de 0,1 s, y un giro antihorario del oleaje esperado entre 3-6°.

- La magnitud de los cambios en 2100 en el residuo del nivel del mar también es pequeña, del orden de 0,01-0,015 m.

INUNDACIÓN

Del análisis de riesgo por inundación costera se concluye:

- Una de las zonas más expuestas y afectadas por la inundación en el presente son las proximidades del Arroyo Zanja Honda.
- En 2050 la superficie inundada por un evento con periodo de 100 años tendrá una extensión similar a la producida en el presente por un evento de periodo de 500 años. Las extensiones de inundación con periodos de 500 años en el presente se darán en 2100 para el RCP4.5 con más frecuencia para eventos de periodos de 25 años y en el RCP8.5 para periodos de 10 años. Mostrando así también la influencia de la mitigación.
- Se observa cómo en el presente, para ambos umbrales, existe un pequeño conjunto de la población que se ve afectado incluso para eventos con periodos de retorno relativamente bajos.
- En el futuro y para los eventos con periodo de retorno por encima de 25 años, la población afectada se duplicará (periodo de retorno 50), triplicará (periodo de retorno 100) o multiplicará por 10 (periodo de retorno de 500 años).
- En el futuro y para eventos de periodo de retorno por encima de los 50 años, los daños sobre activos construidos se esperan sean del orden del doble o triple que, en la actualidad, llegando a poder dispararse por encima del millón de USD para eventos de periodo por encima de los 100 y 500 años a final de siglo en los peores escenarios previstos.
- Aunque en el presente la zona inundable se localiza en el extremo oeste, prácticamente todo el frente marino será susceptible de sufrir daños por inundación.



EROSIÓN

Del análisis de riesgo por erosión costera:

- Se ha estimado que la Playa de Piriápolis está entre las 25 más valiosas de todo el litoral uruguayo.
- El principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, multiplicando por casi 5 el valor del servicio de protección, estimándose el valor total de la playa en más de 62 millones de USD anuales, 3,1 millones de USD anuales por hectárea.
- En base a imágenes históricas se ha estimado que en el presente la playa ha podido sufrir retrocesos de hasta 14 metros provocados por temporales.
- En el futuro más próximo (horizonte 2050), se experimentarán retrocesos mayores que a los que se experimentan en el presente, pudiendo llegar a duplicarse o triplicarse.
- Además, debido al retroceso estructural de la línea de costa, se perderán de forma permanente entre 9 y 12 metros de playa en 2050, y 28 metros de playa en 2100.



ANTECEDENTES

Este documento es parte del proyecto “**Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay**”, financiado por el Climate Technology Center & Network, y corresponde a una de las evaluaciones de riesgo frente al cambio climático de los 6 sitios piloto seleccionados por el Gobierno de Uruguay. Los estudios piloto complementan el análisis de riesgo realizado a escala nacional y recogidos en los entregables D4.1 (IHCantabria, 2019c) y D4.2 (IHCantabria, 2019d) de este mismo proyecto.

Para el análisis de los sitios piloto se ha desarrollado una metodología específica que se ha recogido en el Entregable 4.4 de este proyecto (IHCantabria, 2019e). Por tanto, las bases metodológicas sobre las que se sustentan los resultados que se recogen a continuación no se describen en este documento.

Como primer paso en el análisis de los casos, durante los talleres celebrados en el marco de este proyecto en Montevideo en 2017, se hizo un análisis de los diferentes sitios piloto planteados por la administración uruguaya con los actores y agentes locales relevantes de cada una de las zonas de estudio.

Este documento analiza concretamente el caso piloto de Piriápolis, uno de los casos piloto considerados para la Intendencia de Maldonado a propuesta de los departamentos competentes en la gestión de playas.

En los talleres anteriormente mencionados, los agentes locales participantes destacaron los siguientes aspectos como característicos de la problemática de Playa Piriápolis:

- Zona de baja cota, altamente vulnerable y fuertemente dependiente del turismo
- Se ha producido pérdida de ecosistemas, daños en infraestructuras y sobre todo pérdida de ingresos por turismo.
- Es además una zona de alto riesgo por contar con sitios históricos y arqueológicos
- La construcción de la rambla produjo un retroceso importante de la línea de costa.
- Los espigones se construyeron en los años 60 y el puerto en el 88 aunque se amplió en los últimos 5 años.
- El IMFIA sostiene que la playa está en equilibrio.
- Los daños son fundamentalmente por incremento de exposición
- Tormentas en 2005, 2012 y 2016 causaron grandes daños. El hotel Argentino se vio muy afectado.

1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA PILOTO

1.1 Descripción general y diagnóstico

La zona de estudio comprende las playas urbanas Playa de la Rambla y Playa Grande y la zona adyacente de la ciudad de Piriápolis (Departamento de Maldonado). Playa de la Rambla comprende la playa de la Rinconada (extremo este de la playa), la playa de los Ángeles y la playa de los Portales. Playa Grande se encuentra separada de Playa de la Rambla por el arroyo Zanja Honda. En el presente documento se referirá a las dos playas, Playa de la Rambla y Playa Grande, como la playa de Piriápolis.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Piriápolis, Montevideo).

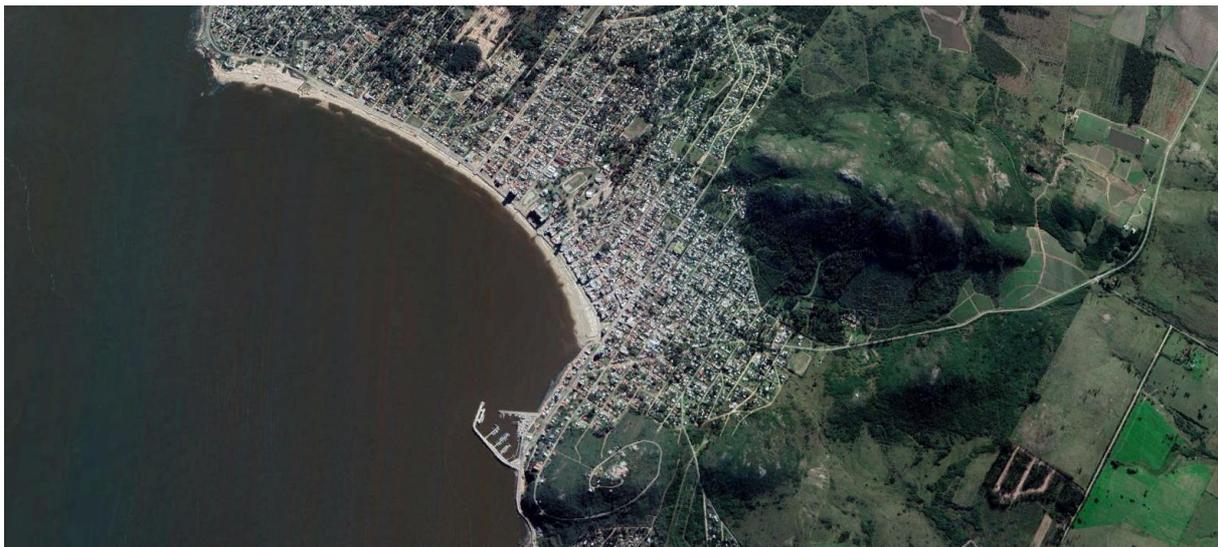


Figura 2. Situación de la Playa de Piriápolis en 2019 (Fuente: Google Earth).

Principales elementos morfológicos

La playa de Piriápolis es una playa de aproximadamente 3.200 metros de longitud, que se encuentra confinada en su extremo este por el Cerro de San Antonio y el puerto construido en su falda, no teniendo confinamiento, desde el punto de vista del transporte de sedimentos, en su extremo oeste (extremo oeste de Playa Grande).

La playa tiene la forma típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por los cabos y puntas exteriores existentes (Punta Negra, Cerro de San Antonio), y en última instancia por el dique exterior del puerto.

La anchura de la playa seca en la zona más central es sensiblemente menor que la anchura en los dos extremos este y oeste. La explicación de esta diferencia de anchura cabe encontrarla en el giro que provocó la construcción del puerto, que movió arena de la zona central a la zona este. Además, la ausencia de playa seca también está motivada por la construcción de un paseo marítimo sobre las dunas existentes.

Un elemento morfológico singular de esta playa es la existencia de numerosos espigones transversales ubicados a lo largo de toda la playa, que compartimentan la misma. La longitud de estos espigones no evita el paso de arena de un compartimento a otro, pero sí que condiciona la forma de la playa seca. La mayor anchura de playa seca en la zona este de los espigones permite concluir que existe un transporte de sedimento de este a oeste. Dicho transporte puede también observarse en las formas sedimentarias del extremo oeste de la playa (Playa Grande) y en la continuidad de la arena seca pasado el límite oeste de la playa (hacia playa Hermosa). La acumulación de arena en dicho extremo oeste de la playa no es excesiva, por lo que la magnitud de dicho transporte en la actualidad es reducida.

Fuentes y sumideros de sedimento

No existe ningún río ni aporte sedimentario de entidad en la playa de Piriápolis en la actualidad. La forma en planta de las playas de San Francisco y Punta Negra, con acumulaciones y rebases de arena en la zona oeste de dichas playas, señalan que, históricamente, antes de la construcción del puerto, la playa de Piriápolis muy probablemente se alimentaba de arena procedente del este. Esta alimentación está en la actualidad impedida por el puerto. Sí existen, sin embargo, numerosos pequeños arroyos que desembocan en la playa, siendo uno de ellos de cierta entidad, aunque su flujo natural está cortado por carreras, viales y obras de fábrica.

Evolución histórica

De la observación de imágenes satélite de la playa de los últimos 10 años se concluye que la influencia del puerto en la forma de la playa se extiende a más de dos tercios de la playa. Además, el espigón construido en el extremo oeste (Playa Grande) no evita la pérdida de arena por dicho extremo. Por último, el transporte de sedimentos, la presencia de barras y la morfología de la playa seca está muy condicionada por la presencia de espigones transversales.

En la Figura 3 se muestra el estado de la playa durante un temporal en 2016 (fotografía superior) y durante un estado de calma en 2019 (fotografía inferior). Como se puede observar, durante el

temporal la anchura de playa seca en la mayor parte de la playa es inexistente, solamente manteniendo parte de playa seca en los extremos. Durante los temporales que han tenido lugar en los últimos años (marzo 2019 y octubre 2016), se produjeron daños en el muro de la Rambla de los Ingleses y en varios puntos de la Rambla de los Argentinos, a la altura del Hotel Argentino (ECOS Uruguay, 25 de marzo 2019). Los daños provocados en la Rambla de los Argentinos vienen motivados por la ausencia de playa seca en la parte central de la playa.



Figura 3. Comparativa de la situación de la playa de Piriápolis en 2005 (arriba) y 2018 (abajo) (Fuente: Google Earth).

En base a las imágenes de satélite se ha estimado un volumen de transporte longitudinal de sedimento. Se ha medido un área acumulada entre 2005 y 2018 en la zona oeste de la playa igual a 10.000 m². Asumiendo una profundidad de cierre de 5,5 metros y una berma de 1,1 metros, se ha estimado un volumen de arena acumulada en la punta rocosa en 13 años igual a 66.000 m³. Esto supone una tasa anual de transporte longitudinal de 5.076 m³/año.

Diagnóstico inicial

Un diagnóstico inicial conduce a concluir que la playa de Piriápolis está en erosión debido a la pérdida de arena por el extremo oeste y la falta de aporte de sedimento de las playas del este y de los arroyos locales. Existe transporte de sedimento con sentido este – oeste, pero la magnitud de dicho transporte es pequeña (6.000 m³/ año). Al no recibir aporte de arena por el este, la zona de playa afectada por el dique de escollera del puerto rotará hasta alcanzar el equilibrio estático y, cuando lo alcance, el transporte longitudinal será nulo. Previsiblemente el equilibrio estático se alcanzará en unas decenas de años. Debido al alcance del presente de estudio, que tiene como fin evaluar los impactos costeros a largo plazo, se ha considerado como despreciable el transporte longitudinal en la playa de Piriápolis.

2 CLIMA MARÍTIMO EN LA ZONA DE ESTUDIO

La costa uruguaya tiene aproximadamente 672 kilómetros de largo, de los cuales 452 km corresponden al Río de la Plata y 220 km al océano Atlántico. El Río de la Plata es un estuario con una dinámica compleja debido a la acción conjunta del caudal de los ríos Uruguay y Paraná, la marea astronómica (régimen micro-mareal), la marea meteorológica y el oleaje. Piriápolis (Maldonado) se localiza en la zona externa del estuario del Río de la Plata (Figura 4), donde tienen lugar procesos complejos debido, entre otros, a la interacción del flujo entrante hacia el continente en las zonas profundas y el flujo de descarga por las zonas someras (Fossati et al., 2014).

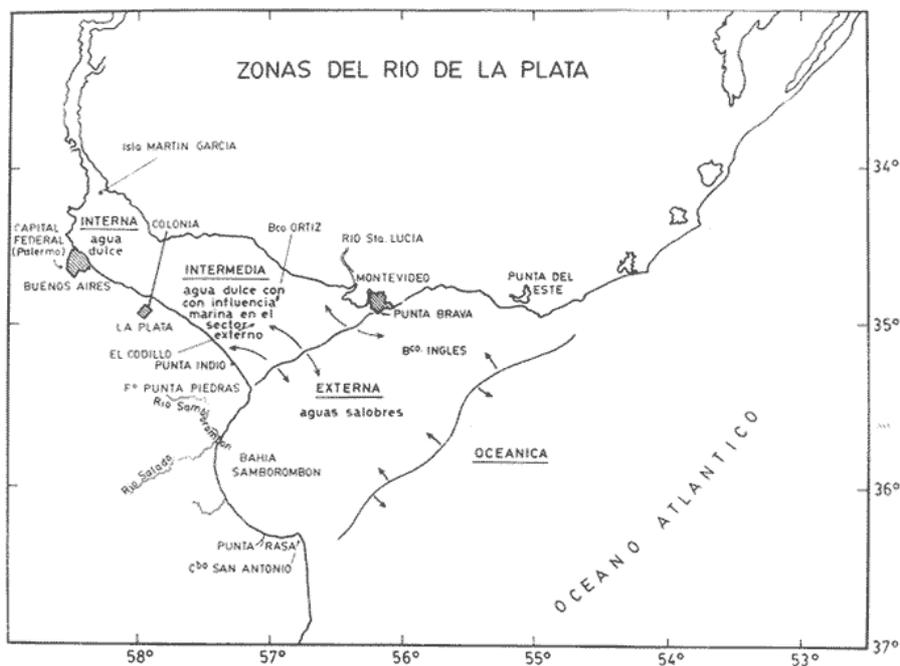


Figura 4. Morfología del Río de la Plata (Boschi, 1988).

2.1 Dinámicas históricas

Como primera aproximación para conocer y comprender las dinámicas en la zona de estudio, se han utilizado las fichas (Figura 6, Figura 7 y Figura 8) del Atlas Climático generado dentro del proyecto (IHCantabria, 2019a). Se ha escogido el punto más cercano a Piriápolis (punto 28, Figura 5). La profundidad en este punto es de aproximadamente 16 metros.

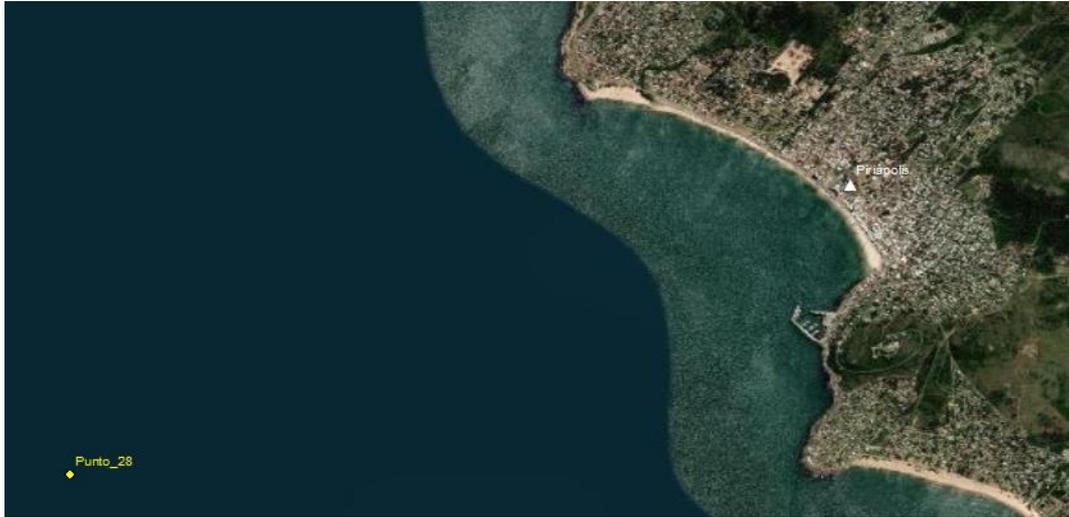


Figura 5. Localización del punto del Atlas más cercano a Piriápolis.

Como se comentaba anteriormente, Piriápolis tiene una forma de “gancho” o “medio corazón” gobernada por el patrón de difracción generado por los cabos y puntas exteriores (p.e. Punta Negra, cerro de San Antonio) y en última instancia por el dique exterior del puerto.

En esta zona, los oleajes más frecuentes y energéticos son los que provienen del sector direccional 135°-180° (Figura 6). La altura de ola asociada al percentil 50% es menor a 1,5 metros, y la altura de ola asociada al percentil 95% es igual a 3 metros. El oleaje presenta una variabilidad estacional pequeña, con cambios en la mediana de la altura de ola menores de 50 centímetros entre los meses de verano y los meses de invierno.

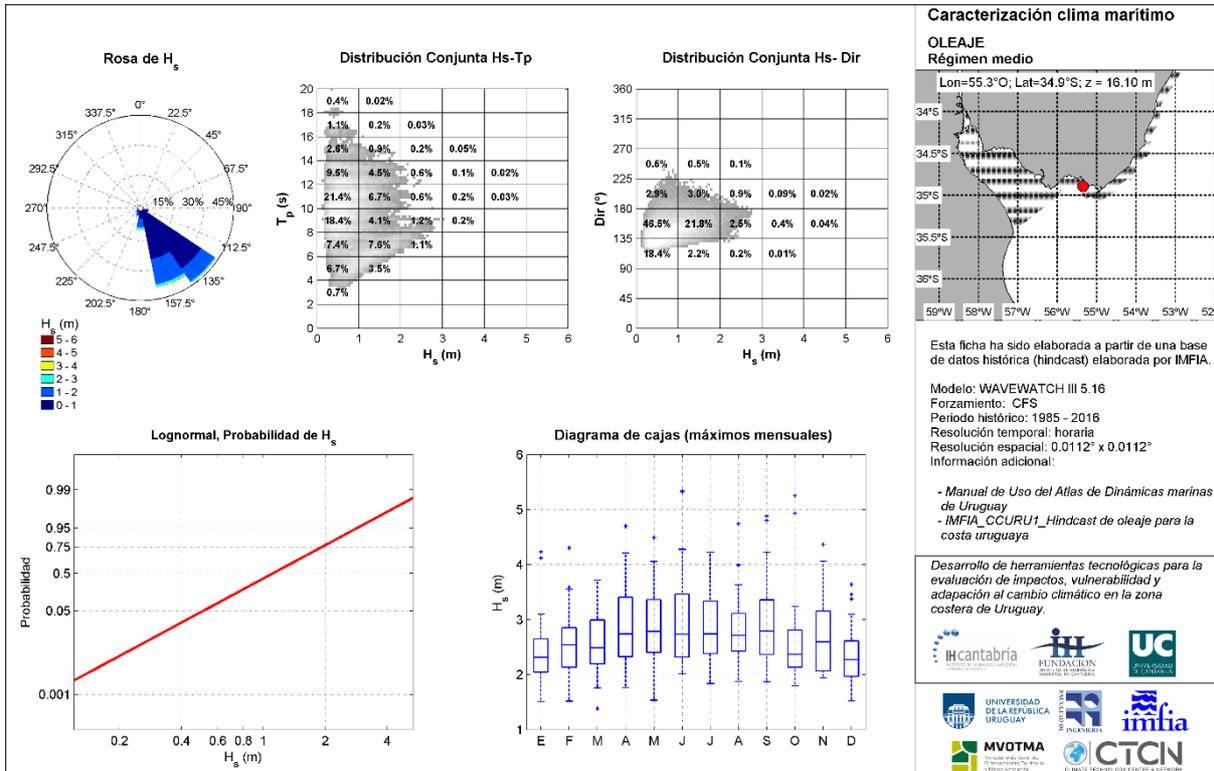


Figura 6. Caracterización del régimen medio de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

En la Figura 7 se muestra el ajuste del régimen extremal de altura de ola significativa. En la tabla ubicada en la parte inferior izquierda de la ficha se recoge la altura de ola significativa (y el intervalo de confianza del 95%) asociada a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. La diferencia entre la altura de ola asociada a un periodo de retorno de 100 años y la asociada a un periodo de retorno de 10 años es de 64 centímetros.

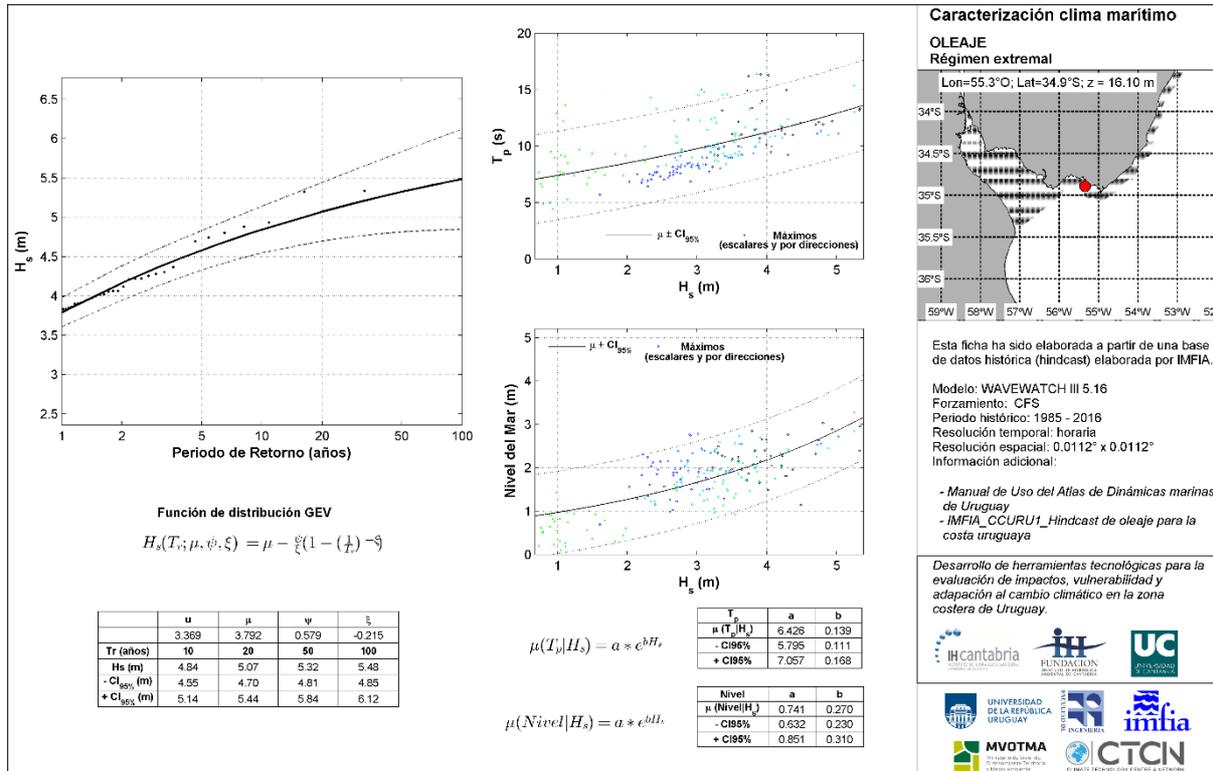


Figura 7. Caracterización del régimen extremal de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

En la tercera ficha (Figura 8) se caracterizan los regímenes medio y extremal del nivel del mar y la distribución direccional de las corrientes marinas. Cabe destacar de la rosa direccional de corrientes que las direcciones predominantes de las corrientes marinas provienen de los sectores [270° - 315°] y [90° - 135°]. Las corrientes provenientes del noroeste tienen una intensidad de hasta 0,26 m/s, con intensidades máximas de hasta 0,78 m/s, mientras que las corrientes del sudeste tienen una intensidad de hasta 0,26 m/s. El patrón de corrientes en la zona está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea junto con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos (Fossati et al., 2014).

Se aprecia la misma variabilidad estacional que en el oleaje en el nivel del mar (cambios estacionales en la marea meteorológica), con cambios en el nivel de hasta 50 centímetros en los percentiles 50% y 75% entre los meses de enero y diciembre y los meses de junio, julio y agosto.

En la parte inferior de la ficha se muestra el ajuste de extremos del nivel del mar. La tabla recoge el nivel del mar asociado a los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años. Se observa que la diferencia entre nivel del mar asociado a un periodo de retorno de 100 años y el asociado a un periodo de retorno de 10 años es de 38 centímetros, 26 centímetros menor que la diferencia entre las alturas de ola asociadas a los mismos periodos de retorno (64 centímetros).

Teniendo en cuenta que la contribución del oleaje en la sobre elevación de la lámina de agua es un porcentaje de la altura de ola, desde el punto de vista del impacto de inundación costera, donde se estudian eventos con cotas de inundación extremas, el nivel del mar en el punto climático de estudio

debe ser considerado como la dinámica predominante. La cota de inundación (CI) es un indicador para estimar el nivel total del mar, y se calcula como la suma del runup, las mareas y el aumento del nivel medio del mar, en el caso de estar calculando cotas de inundación futuras.

En este caso, un evento extremo de nivel del mar, considerando como tal la suma de marea meteorológica y marea astronómica, puede generar una sobreelevación de la lámina de agua mucho mayor que un evento extremo de oleaje.

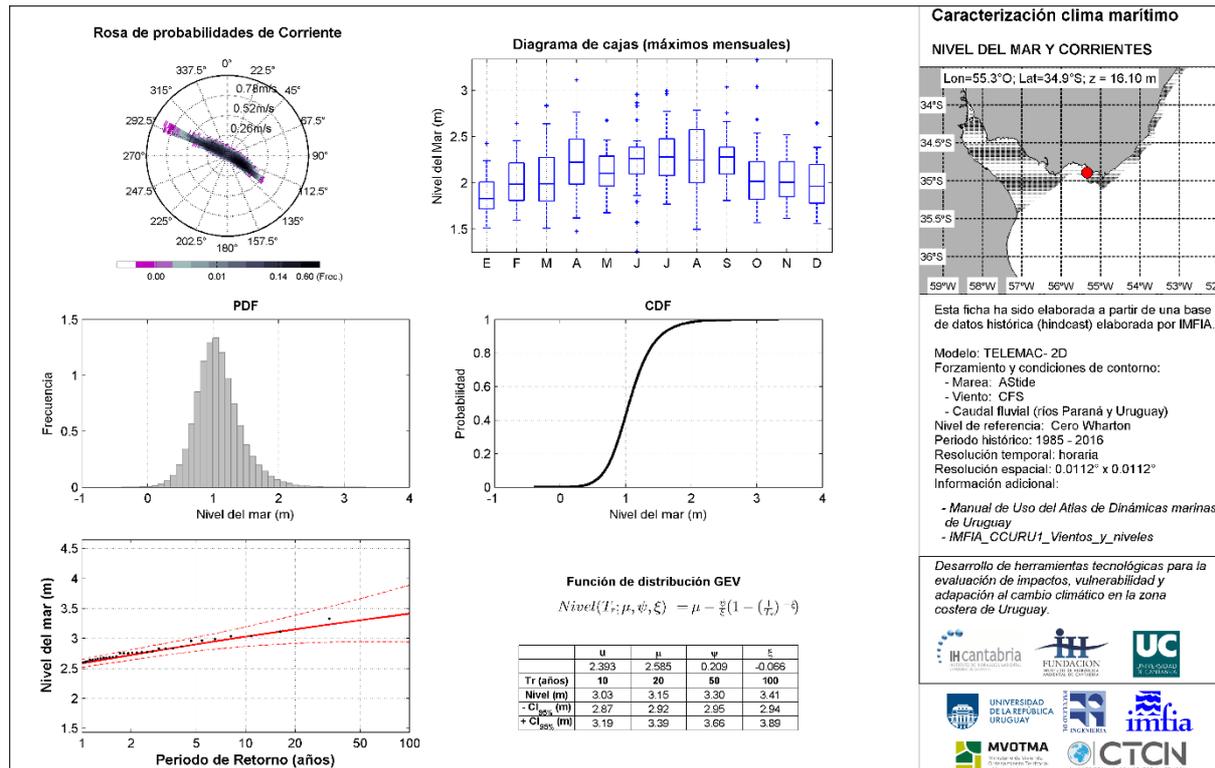


Figura 8. Caracterización del nivel del mar y corrientes en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

2.2 Dinámicas futuras

Por lo que respecta al estudio de los impactos de inundación y erosión costera, las conclusiones más importantes del estudio de las proyecciones de oleaje, residuo del nivel del mar y nivel medio del mar generadas dentro del marco del proyecto (IHCantabria, 2019b) se resumen en los siguientes puntos:

- Se esperan aumentos máximos del percentil 95% de la altura de ola significativa del 4%, una disminución máxima del periodo de pico del orden de 3%; un giro de la dirección media del oleaje hacia el E del orden de los 3-4°, y aumentos del residuo del nivel del mar menores al 1% en el Río de la Plata a fin de siglo XXI (2070-2099) para el escenario RCP8.5. La magnitud de los cambios de altura de ola significativa es del orden de 0,03-0,04 m para los incrementos y 0,04-0,05 m para las disminuciones. Los cambios positivos de periodo de pico son del orden de 0,05

s y los negativos del orden de 0,1 s. El giro antihorario del oleaje se espera entre 3-6°. Los cambios en el residuo del nivel del mar son del orden de 0,01-0,015 m.

- En cuanto al incremento del nivel medio del mar en aguas abiertas próximas a la desembocadura del Río de La Plata, la estimación media con su incertidumbre, definida por el percentil del 5% y del 95%, es de 0,26 [0,21 – 0,31] metros en 2050 para el RCP promedio, de 0,58 [0,48 – 0,67] en 2100 RCP4.5 y de 0,80 [0,66 – 0,93] metros en 2100 RCP8.5.

En términos generales, el incremento del nivel del mar intensificado con un aumento del oleaje y de la componente atmosférica del nivel del mar es susceptible de producir un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos de inundación. El cambio en la dirección de oleaje genera un cambio en el transporte de sedimentos, lo que puede conllevar un aumento de los procesos erosivos y un cambio en la orientación de las playas que puede traducirse en una pérdida de anchura de playa seca.

En este caso, y dado que en el resto de las variables los cambios son pequeños, solamente se han tenido en cuenta las proyecciones de aumento del nivel medio del mar en el modelado de los impactos de inundación y erosión en el futuro. Sin embargo, en los estudios que se vayan a realizar para la implementación de potenciales proyectos de adaptación, estos cambios en las dinámicas correspondientes al oleaje y marea meteorológica deberían ser considerados con detalle por su contribución a los criterios de diseño generalmente empleados.

2.3 Transformación del oleaje

La difracción originada por el dique exterior del puerto y que condiciona la forma en planta de la playa de Piriápolis ha sido modelizada, de manera simplificada, mediante la formulación de Goda (2000). Los cambios por difracción en la dirección del oleaje y altura de ola en rotura han sido tenidos en cuenta en el modelo de evolución de la línea de costa.

3 RIESGO DE INUNDACIÓN COSTERA

3.1 Exposición

3.1.1 Exposición socioeconómica

En el caso del impacto de inundación, la exposición se define a través de la caracterización espacial de la población y de los activos construidos (edificaciones) de las zonas potencialmente inundables existentes dentro del área de estudio. La metodología seguida para el estudio de ambos elementos socioeconómicos se recoge con detalle en el documento metodológico.

La Figura 9 muestra el mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m². Esta caracterización imputa a cada parcela catastral los datos poblacionales de la zona censal en la que se encuentra. Así, una parcela censal con una densidad de población de 0,056 personas/m² que ocupa un área de 1.000 m², representa a 56 personas residiendo en dicho polígono.

La Figura 9 muestra la caracterización de los activos construidos, mostrando su valor económico en USD por m² (basado en datos catastrales del año 2018) y con nivel de detalle de parcela catastral.

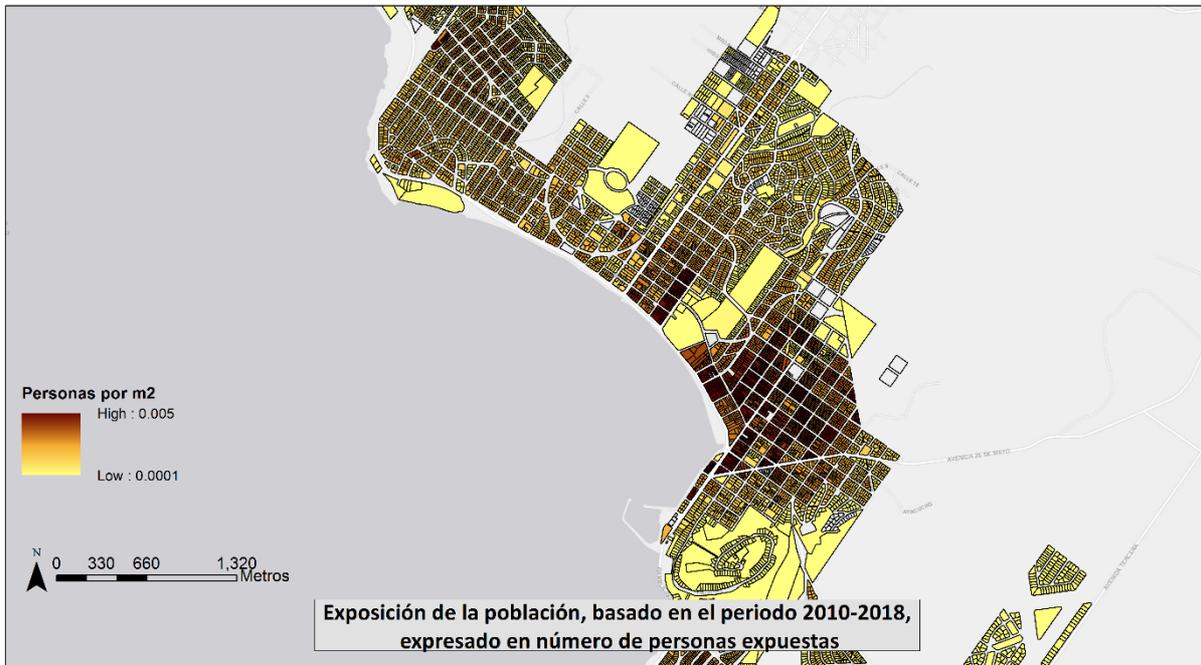


Figura 9. Mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m².

En la Figura 9 se puede observar que según los datos del Censo la zona más densamente poblada es la más próxima al extremo este de la playa (alrededores de la Plaza Artigas). Por el contrario, la zona oeste de las cercanías a la playa (Playa Grande), presenta una densidad de población algo menor.



Figura 10. Edificaciones existentes en la Piriápolis (Fuente: Google Earth).

Destacan en el área de estudio algunas edificaciones situadas en primera línea de playa, justo en la Rambla de los Argentinos. Estas edificaciones son las que presentan un mayor número de plantas, contrastando con las construcciones más abundantes que resultan ser de una o dos plantas.

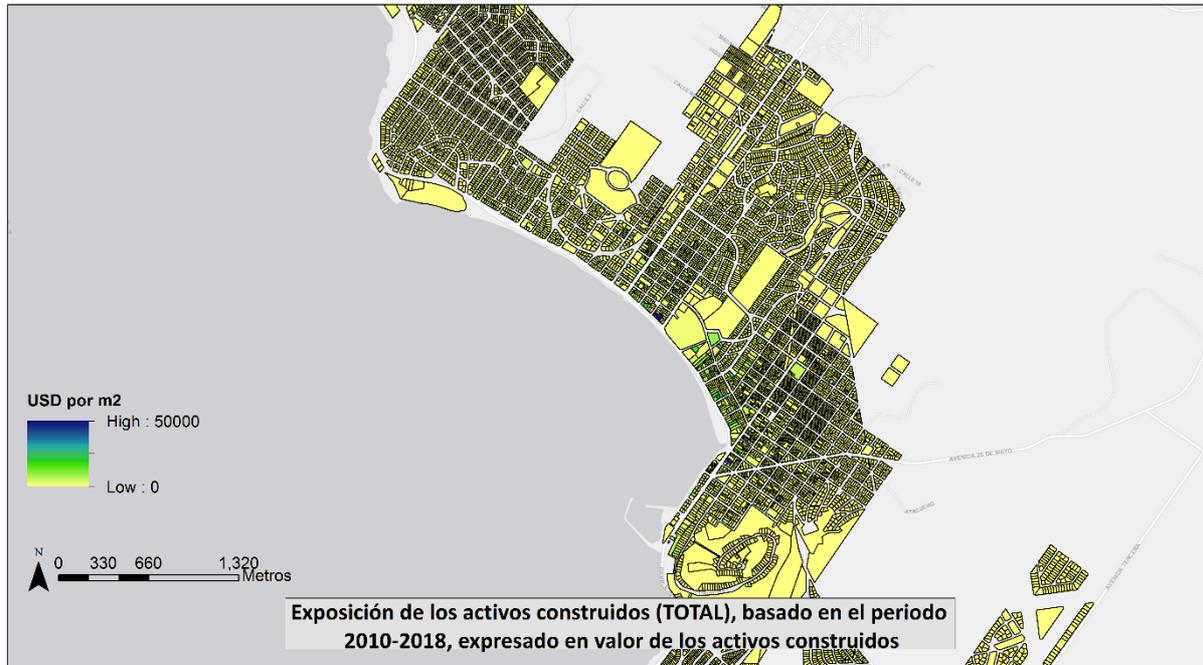


Figura 11. Mapa del valor de exposición del stock construido (total), basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de USD por m².

En la Figura 11 por otro lado se observa que el valor (obtenido de datos catastrales oficiales) de las edificaciones incluidas en la zona de estudio es bastante homogéneo, y no entra dentro de los valores más elevados comparados con el análisis del resto del país. Destacan algunas parcelas por encima de la media, correspondientes precisamente a las edificaciones más altas de Piriápolis.

En la Figura 12 se recoge un ejemplo de la edificación existente en la zona más próxima a la playa, y en la Figura 13 se identifican las calles y elementos más representativos de la zona de estudio.



Figura 12. Ejemplo de edificación existente en la zona de Piriápolis (Fuente: Google).

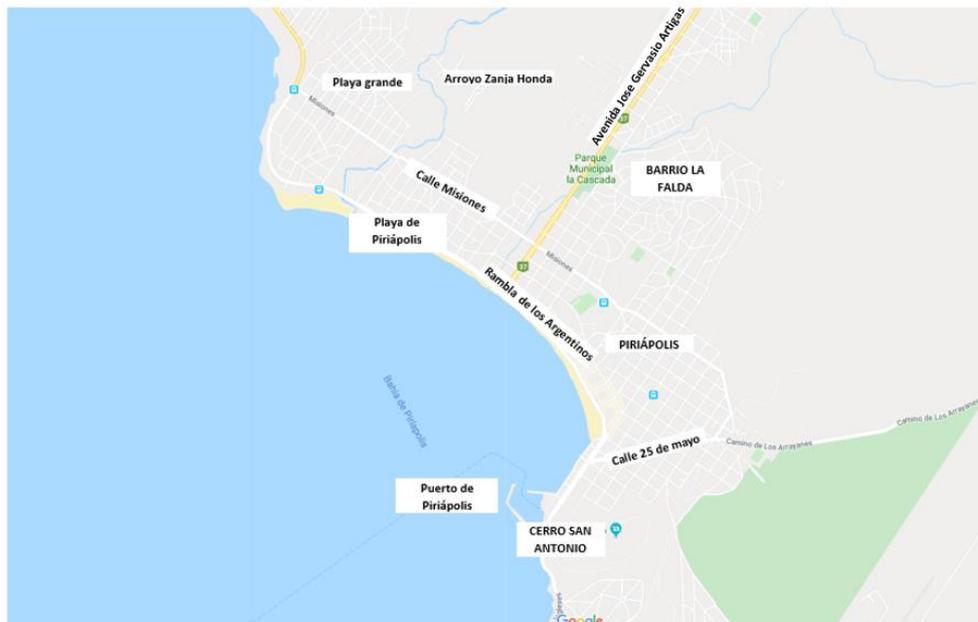


Figura 13. Ubicación de los principales elementos en Piriápolis.

3.1.2 Exposición física

El modelo de inundación utilizado crea una malla computacional basada en la topografía subyacente, para lo que se ha utilizado el Modelo Digital de Terreno (MDT) encargado por el MVOTMA y desarrollada por IDEUy.

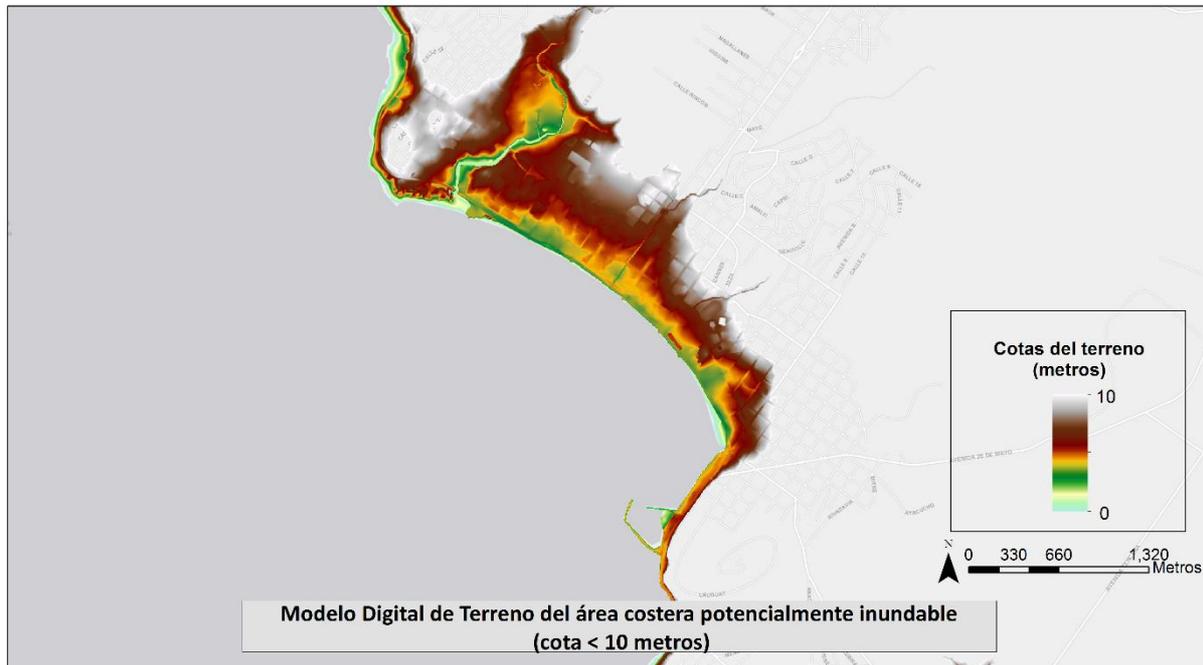


Figura 14. Modelo Digital de Terreno del área potencialmente inundable de la zona de estudio (Fuente: IDEUy).

3.2 Peligrosidad

Se ha modelado la inundación costera con un modelo hidrodinámico de procesos (Jamieson et al., 2012) sensible a la rugosidad del terreno que resuelve la inundación en tierra debida a condiciones hidrodinámicas costeras y continentales. El modelo se ha forzado con cotas de inundación extremas y se han obtenido los mapas de peligrosidad asociados. Estos mapas tienen una gran resolución espacial (4x4 metros), y representan la extensión y la profundidad de agua de la zona inundada.

3.2.1 Mapas de inundación

Los mapas generados muestran la inundación debida a una amenaza o evento extremo de cota de inundación. En los mapas que se muestran a continuación (Figura 15, , Figura 16, Figura 17 y Figura 18) se pueden identificar las zonas susceptibles de inundación, en el presente y en el futuro, para distintos niveles de amenaza: probabilidad de ocurrencia alta (periodos de retorno de $Tr= 5$ y 10 años), media ($Tr= 25$ y 50 años), baja ($Tr= 100$ años) o muy baja ($Tr= 500$ años). La Tabla 1 recoge las áreas de la superficie inundada en la zona de estudio, para todos los escenarios considerados. Se muestra también la inundación asociada a condiciones medias de oleaje y marea.

En el **presente** (Figura 15), se puede observar que la superficie de inundación que se produce en la costa de Piriápolis es pequeña. Para eventos con probabilidad de ocurrencia alta (cota de inundación $Tr= 5$ años) se produce una inundación que se extiende principalmente en las zonas oeste (Playa Grande) y este de la playa de Piriápolis, y que avanza hacia el interior de Piriápolis por el arroyo Zanja Honda y el pequeño curso de agua que desemboca a la altura de la avenida José Gervasio Artigas. Este evento afecta también al muelle del puerto. Para eventos con menor probabilidad de ocurrencia (cota de inundación $Tr= 10$ a 500 años), además de las zonas inundadas para eventos con menor periodo de

retorno, se produce la inundación de las parcelas urbanizadas en los márgenes del arroyo Zanja Honda. Para eventos con cota de inundación $Tr=500$ años se produce la inundación parcial de la Rambla de los Argentinos en el tramo comprendido entre las calles Joaquín Muñoz y Julián Álvarez, y en el tramo comprendido entre las calles Gregorio Sanabria y Atanasio Sierra. Se observa que para una amenaza con probabilidad muy baja ($Tr=500$ años) de ocurrencia, la extensión de la zona inundable (188.512 m^2) es un 44% mayor respecto al evento de $Tr=25$ años (131.280 m^2).

En vista de los mapas de inundación se podría considerar que, en el presente, las únicas zonas susceptibles de inundación son la rambla, en los tramos mencionados, las parcelas que bordean el arroyo Zanja Honda y el muelle del puerto.

En **2050** (Figura 16), y en ausencia de adaptación, en las zonas de la rambla susceptibles de inundación identificadas en el presente, para un evento con cota de inundación con $Tr=50$ años se produce el rebase de la rambla y la inundación de parcelas urbanizadas al otro lado de la misma. Además, se incrementa la extensión de la inundación en los márgenes del arroyo Zanja Honda y en la zona este de la playa. Para este evento se identifican en la rambla nuevos tramos en riesgo, como el tramo comprendido entre las calles Lázaro Gadea y Santiago Vázquez. En 2050, la superficie inundable asociada al evento $Tr=100$ años (186.640 m^2) alcanza prácticamente a la superficie inundable asociada al evento $Tr=500$ años en el presente. Asimismo, la superficie inundable asociada al $Tr=500$ años en 2050 (239.184 m^2) aumenta un 27% respecto a la superficie inundable para el mismo periodo en el presente.

Por tanto, para el horizonte 2050 se observan dos cuestiones fundamentales. Por un lado, las superficies inundables que en el presente se producen para altos periodos de retorno, se producirán en 2050 con mayor frecuencia, es decir para periodos de retorno más bajos. Por otro lado, para un mismo periodo de retorno, los eventos extremos producirán mucho mayor superficie de inundación en 2050 que en el presente.

En **2100** (Figura 17 y Figura 18), se puede observar que la rambla se encuentra inundada prácticamente en su totalidad por eventos de periodos de retorno entre 25 y 500 años principalmente. En las parcelas bordeando el Arroyo Zanja Honda se mantiene similar al escenario de 2050 y el arroyo junto a la Avenida José Gervasio Artigas la inundación por eventos de 500 años llega a alcanzar las parcelas en el caso del RCP 8.5. Para el RCP 4.5, se incrementa el área inundada de las parcelas en el frente de costa para periodos de 50 a 500 años en el extremo oeste y por eventos de periodo de 500 años en el extremo este y en el centro. En el caso del RCP 8.5, incrementa la extensión en las parcelas en el frente de costa para eventos de periodos de 50 a 500 años en el extremo oeste, en el centro y en el este.

En términos de extensión de la superficie inundada, en 2100 y para el RCP4.5 el evento con $Tr=25$ años (190.680 m^2) tiene una superficie mayor que el evento $Tr=500$ años en el presente inundable (188.512 m^2). En 2100 y para el RCP8.5 el evento con superficie inundable más cercana al evento $Tr=500$ años en el presente es el evento de $Tr=10$ años (189.760 m^2). La diferencia en la cota máxima de agua de la superficie inundada entre el evento $Tr=500$ años en el presente y en 2050 es de aproximadamente 30 centímetros, y en 2100 para el RCP8.5 de aproximadamente 80 cm.

Se puede concluir que, además de la adaptación, la senda de mitigación jugará un papel importante sobre la superficie inundable en esta zona a partir de mitad de siglo.

Esto es especialmente reseñable en 2100 año en que, para los casos considerados, el periodo de retorno de 500 años en el presente se divide por un factor de 20 para el RCP4.5 y de 50 para el RCP8.5.

Tabla 1. Extensión de la superficie inundada en la zona de estudio, para cada escenario climático de inundación.

Área (m ²)	Presente	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
		P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
Cond. medias	2.656	8.304	9.600	11.200	16.320	19.056	21.792	21.568	25.504	30.848
Tr=5	104.336	116.320	119.728	122.656	133.904	142.704	152.672	151.360	166.096	180.464
Tr=10	116.320	129.408	132.816	136.832	153.504	164.256	174.464	173.296	189.760	217.392
Tr=25	131.280	149264	154.016	159.136	178.448	190.688	210.192	207.888	236.672	273.744
Tr=50	143.424	164.352	170.496	175.840	200.480	221.952	241.744	239.264	277.008	328.496
Tr=100	156.048	180.432	186.640	193.648	229.568	250.304	279.280	275.424	327.648	372.384
Tr=500	188.512	228.336	239.184	249.104	301.120	341.696	374.528	370.576	417.632	468.576

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PIRIÁPOLIS

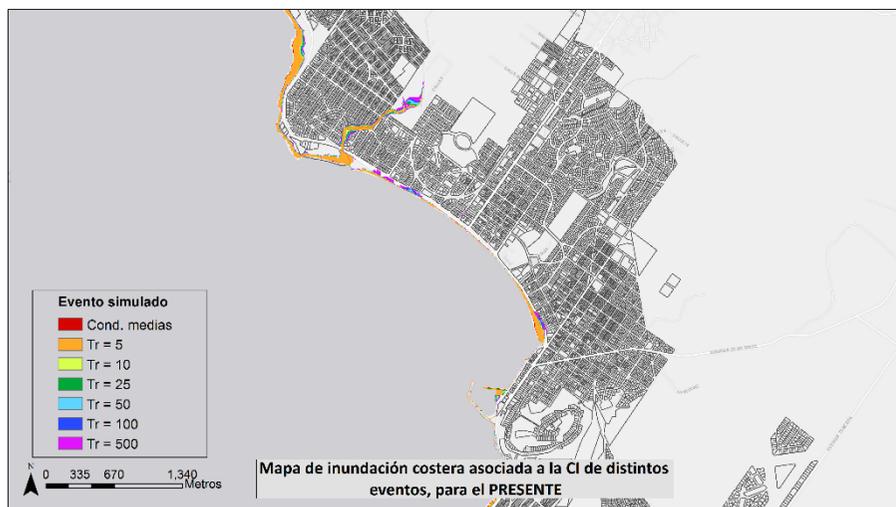


Figura 15. Inundación en el presente para distintos eventos.

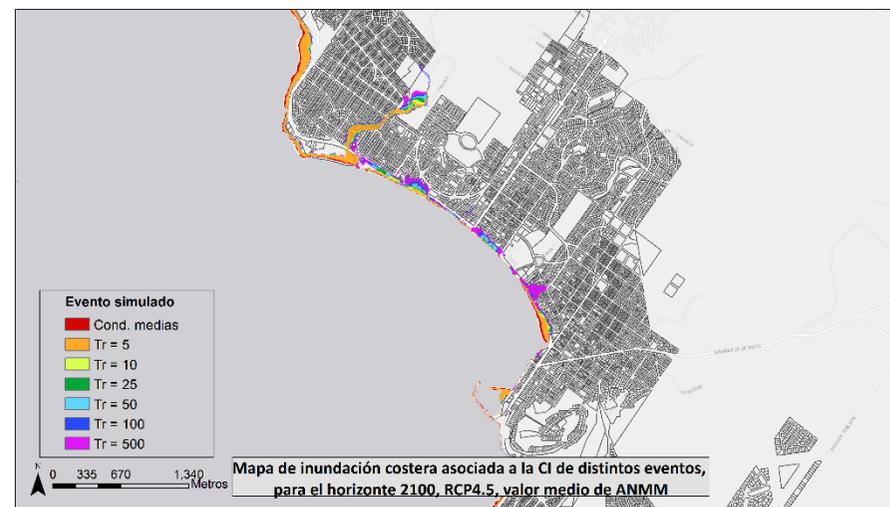


Figura 17. Inundación en 2100 (RCP4.5) para distintos eventos.



Figura 16. Inundación en 2050 para distintos eventos.



Figura 18. Inundación en 2100 (RCP8.5) para distintos eventos.

La consideración de la incertidumbre en el aumento del nivel medio del mar en el estudio de inundación costera permite acotar la extensión y la cota máxima de agua de la superficie inundada. En los mapas siguientes se muestra la superposición de la inundación asociada a un evento extremo para cada uno de los valores considerados de la distribución de aumento de nivel medio del mar, en 2050 (Figura 19) y 2100 RCP8.5 (Figura 20).

En el mapa de inundación en 2050 (Figura 19) las diferencias entre la inundación producida con el ANMM medio y el percentil 5% y 95% son de 6.208 m² y 7.008 m², respectivamente. Por otro lado, en el mapa de inundación en 2100 (Figura 20) se mantiene la extensión de inundación. En 2100, la diferencia de ANMM entre los tres valores considerados es de aproximadamente 14 centímetros, y la diferencia en la superficie inundada del valor medio y los percentiles es de 52.224 m² y 44.736 m², respectivamente. La Tabla 2 recoge las diferencias entre las diferentes simulaciones realizadas.



Figura 19. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2050.



Figura 20. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2100 (RCP8.5).

Tabla 2. Cuantificación de la incertidumbre debida al ANMM en la inundación costera.

	2050			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
ANMM (m)	0,21	0,26	0,31	0,66	0,80	0,93
Superficie inundada (m²)	180.432	186.640	193.648	275.424	327.648	372.384
Cota máx (m)	3,62	3,67	3,72	4,07	4,20	4,33

3.3 Riesgo

El riesgo de inundación se obtiene como la integración de la información de peligrosidad con la exposición y la vulnerabilidad. En este apartado se muestran los resultados cuantitativos del daño sobre la población y los activos construidos de manera numérica en tablas e histogramas para la zona de estudio.

3.3.1 Población afectada por inundación costera

En la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan las consecuencias sobre la población, tanto para el umbral de afección (que puede considerarse como un equivalente a la función de daño) de 0,30 metros como para el de 0,01 metros. Obsérvese que, en el segundo caso, el umbral de afección es tan pequeño que el resultado de riesgo obtenido sería prácticamente equivalente a lo que en este estudio se ha llamado exposición.

En las tablas se recoge el número de personas que resultarían afectadas para cada periodo de retorno en cada uno de los escenarios analizados. Es importante señalar que para este análisis se ha utilizado la distribución de población correspondiente al presente. Proyecciones de población futuras conducirían a resultados diferentes.

Tabla 3. Consecuencias sobre la población (umbral de 0,30m), expresado en número de personas afectadas. La peligrosidad varía entre el presente y diferentes escenarios. La población sobre la que se proyecta el riesgo es la presente.

	Probabilidad	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,002	
Umbral 0,30m	Periodo de retorno	TR=5	TR=10	TR=25	TR=50	TR=100	TR=500	DAE
PRESENTE	Valor medio	8	9	12	15	16	21	3
2050	Percent. 5%	9	11	15	17	19	24	3
	Valor medio	9	12	16	18	20	25	4
	Percent. 95%	10	13	17	19	21	25	4
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	12	16	19	22	24	33	5
	Valor medio	14	17	21	23	25	47	5
	Percent. 95%	15	18	22	25	27	73	6
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	15	18	22	24	27	69	5
	Valor medio	17	20	24	27	41	140	6
	Percent. 95%	19	23	27	44	79	208	8

Tabla 4. Consecuencias sobre la población (umbral de 0,01m), expresado en número de personas afectadas. La peligrosidad varía entre el presente y diferentes escenarios. La población sobre la que se proyecta el riesgo es la presente.

	Probabilidad	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,002	
Umbral 0,01m	Periodo de retorno	TR=5	TR=10	TR=25	TR=50	TR=100	TR=500	DAE
PRESENTE	Valor medio	10	13	17	19	21	25	4
2050	Percent. 5%	13	16	20	22	24	35	5
	Valor medio	14	17	20	23	25	41	5
	Percent. 95%	14	18	21	24	26	46	5
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	17	20	24	27	37	92	6
	Valor medio	18	22	25	34	48	156	7
	Percent. 95%	19	23	30	44	70	213	8
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	19	23	29	43	66	208	8
	Valor medio	22	25	42	69	141	279	10
	Percent. 95%	24	35	69	148	220	364	15

Se observa cómo en el presente, para ambos umbrales, existe un pequeño conjunto de la población que se ve afectado incluso para eventos con periodos de retorno relativamente bajos. Este conjunto de personas afectadas no representa una cantidad elevada, y se sitúan principalmente en las proximidades del Arroyo Zanja Honda.

En los escenarios futuros, sin embargo, la afección sobre la población se prevé que aumente considerablemente. Así, en el horizonte de 2100, se verán afectadas por eventos relativamente frecuentes (5 años de periodo de retorno) tantas personas como en el presente resultan afectadas por eventos extremos de periodo de retorno de 500 años.

En el futuro y para los eventos con periodo de retorno por encima de 25 años, la población afectada se duplicará (periodo de retorno 50), triplicará (periodo de retorno 100) o multiplicará por 10 (periodo de retorno de 500 años).

A continuación, se representan las gráficas (Figura 21) que recogen el riesgo expresado como el número de personas afectadas expresado en términos de daño anual esperado, para los dos umbrales considerados en el estudio.

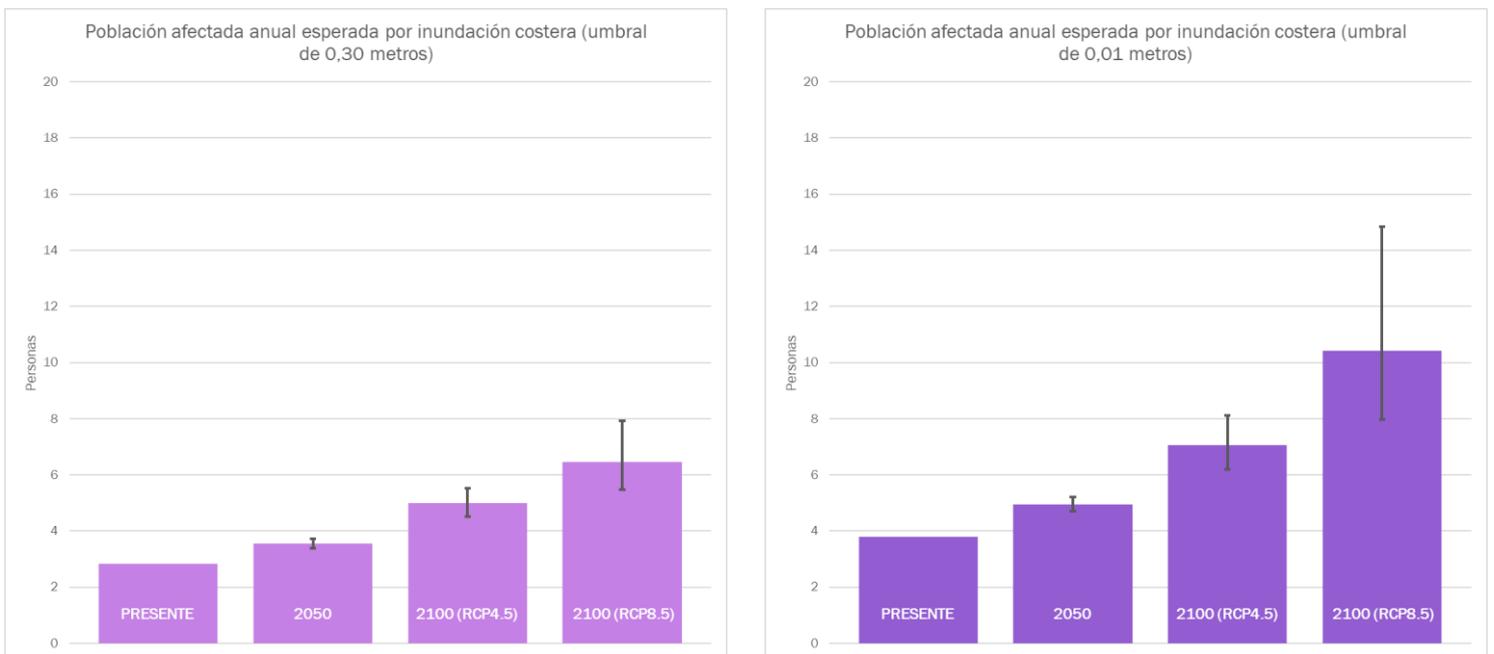


Figura 21. Riesgo de inundación sobre la población, expresado como población anual esperada en número de personas afectadas. A la izquierda, personas afectadas con más de 30 centímetros de altura de agua. A la derecha, personas afectadas con más de 1 centímetro de altura de agua.

Del análisis de estas figuras y de las tablas anteriores, se concluye que el nivel de riesgo aumentará en todos los escenarios futuros, siendo especialmente preocupante la situación a final de siglo. De esta forma se pasará de un riesgo presente reducido, a una afección esperada futura que podrá llegar a duplicar el riesgo actual en 2050 o casi triplicarlo en el horizonte de 2100.

El mismo número de personas que actualmente se ven afectadas bajo eventos con muy baja probabilidad (periodo de retorno de 500 años), a final de siglo se verán afectadas con eventos mucho más frecuentes (periodo de retorno de 5 años).

No obstante lo anterior, estos resultados precisan ser matizados. En primer lugar, la población de base utilizada ha sido la presente. Evidentemente, un incremento de la población en la zona incrementará el riesgo para cualquiera de los escenarios de peligrosidad considerados. Asimismo, la base de datos de población actual no tiene en cuenta la estacionalidad en la distribución de la población por lo que es altamente probable que en esta zona el riesgo aumente por el incremento de población en la época de vacaciones. Finalmente, es también necesario mencionar que los órdenes de exposición de la población expuesta ante los escenarios de peligrosidad considerados, parecen evidenciar que las consecuencias negativas podrán ser abordadas a través de la adaptación.

3.3.2 Daños sobre los activos construidos debidos a inundación costera

En la Tabla 5 se presentan las consecuencias sobre los activos construidos. Se recoge el daño sobre las edificaciones expresado en USD para cada periodo de retorno en cada uno de los escenarios analizados.

Tabla 5. Consecuencias sobre los activos construidos, expresado en USD dañados (estimación en base a datos catastrales).

	Probabilidad	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,002	
	Periodo de retorno	TR=5	TR=10	TR=25	TR=50	TR=100	TR=500	DAE
PRESENTE	Valor medio	11.617	19.943	37.770	51.514	64.329	92.231	6.569
2050	Percent. 5%	18.275	33.998	55.484	69.919	84.276	126.681	9.994
	Valor medio	21.012	37.873	59.611	74.534	89.284	148.856	11.083
	Percent. 95%	24.079	41.977	63.904	79.289	94.546	178.123	12.279
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	36.812	56.990	80.150	97.960	133.233	404.945	17.575
	Valor medio	45.170	65.311	90.428	120.142	189.601	753.491	22.140
	Percent. 95%	53.958	74.410	105.689	168.628	299.207	1.262.833	28.548
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	52.950	73.373	103.098	161.696	281.816	1.197.469	27.688
	Valor medio	64.867	87.606	157.741	297.125	649.534	2.063.510	41.605
	Percent. 95%	78.172	118.858	291.421	695.984	1.334.880	3.147.885	67.936

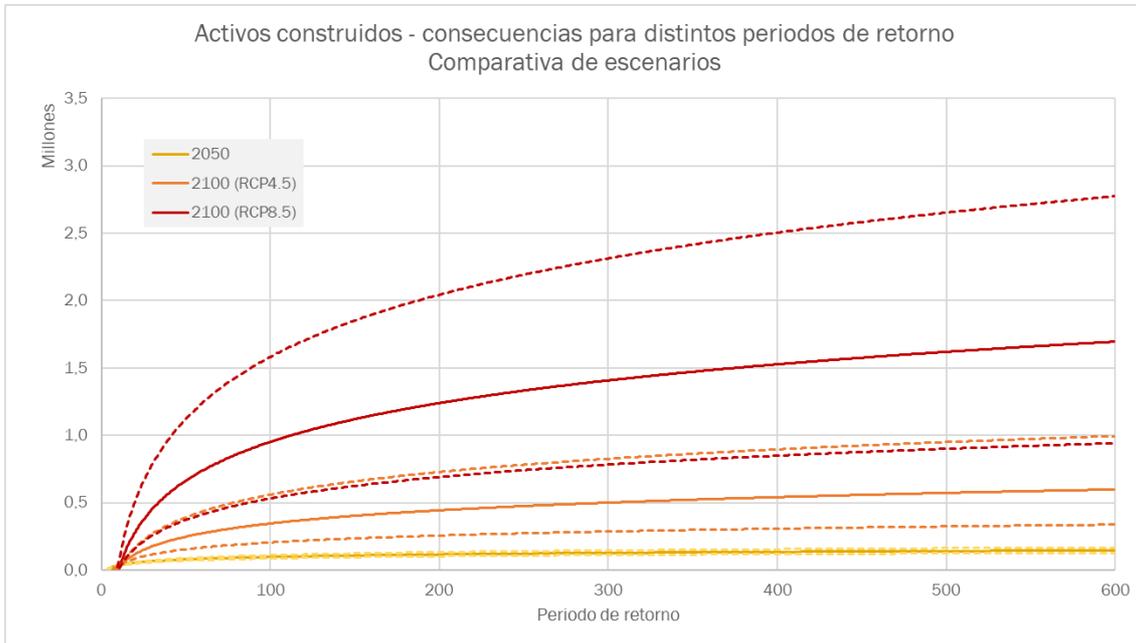


Figura 22. Consecuencias sobre los activos construidos para distintos periodos de retorno para los horizontes 2050 y 2100 (estimación en base a datos catastrales). Las líneas continuas representan el valor medio, mientras que las líneas discontinuas representan los percentiles del 5% y del 95%.

Los daños que se experimentan en el presente resultan relativamente reducidos, por debajo de los 100.000 USD incluso para eventos extremos de periodo de retorno elevado. La existencia de un paseo marítimo y de una avenida limitante con la playa sirve sin duda para limitar los daños que pueden ocasionarse por inundaciones.

En el futuro, sin embargo, la situación cambia para los dos escenarios considerados en el horizonte de 2100 y para el 2050. Ante eventos de periodo de retorno bajo (5 años), los daños que se experimenten se prevé sean similares a los actuales. Sin embargo, y al igual que sucedía con la población, para eventos de periodo de retorno por encima de los 50 años, los daños empiezan a ser considerablemente mayores (del orden del doble o triple que en la actualidad), llegando a poder dispararse por encima del millón de USD para eventos de periodo por encima de los 100 y 500 años a final de siglo en los peores escenarios previstos.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PIRIÁPOLIS

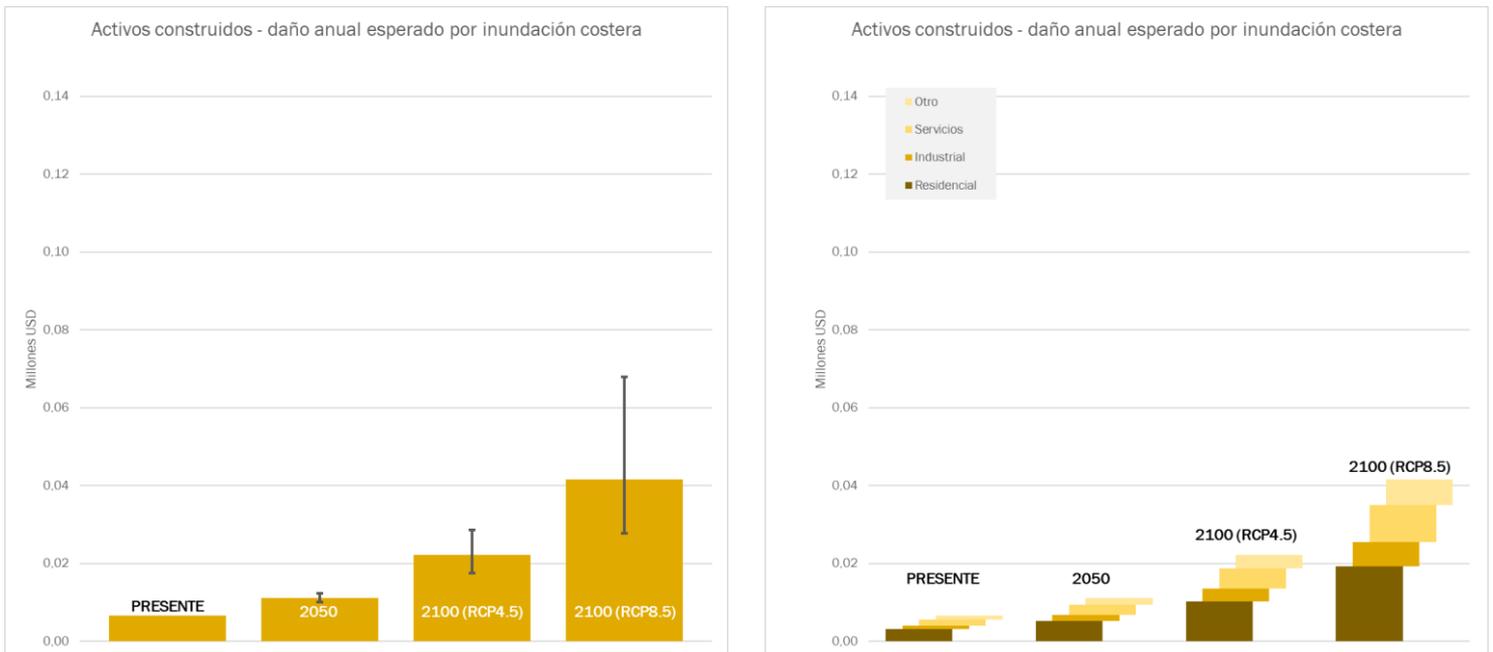


Figura 23. Riesgo de inundación sobre los activos construidos, expresado como daño anual esperado en millones de USD (estimación en base a datos catastrales). A la izquierda, el total de daño esperado. A la derecha, la distinción en categorías de activos construidos (residencial, industrial, servicios y otros).

Analizando el valor del daño anual esperado como indicador de riesgo de la zona de estudio, se observa que este indicador aumentará alrededor de un 65% en el año 2050 y podrá multiplicarse por 3 incluso por 6 en el año 2100, en función del escenario que se considere.

Por último, los daños sobre los activos construidos principalmente los sufrirán edificaciones residenciales (alrededor del 50%) mientras que el resto de las categorías de activos (industrial, servicios y otros) experimentarán cuantías de daños similares, siendo si acaso algo mayores las debidas por la afección a las construcciones dedicadas a servicios.

4 RIESGO DE EROSIÓN COSTERA

4.1 Exposición

4.1.1 Exposición socioeconómica

En el análisis de la erosión costera, se han considerado las playas como los activos expuestos. El valor de exposición de una playa se puede definir a través de criterios ambientales y/o sociales, considerando factores que tengan en cuenta las características, calidad y servicios de cada playa. En concreto en este estudio se ha caracterizado el valor de exposición de las playas por medio de la cuantificación del valor de dos de los servicios principales proporcionados: el valor de protección frente a inundación (de regulación) y el valor recreativo (cultural).

Valor de protección

El valor de protección frente a inundación proporcionado por la playa se ha asimilado a la suma de todos los activos existentes en un polígono delimitado por el borde de la playa, una paralela a ésta situada a 300 metros de la anterior, y las perpendiculares a la línea de costa en los extremos de la playa. El planteamiento propuesto plantea que, si no existiese la playa, todos esos activos situados en la franja de 300 metros se verían de una u otra forma afectados, en un porcentaje (factor de daño) que viene determinado por los factores de la Tabla 6.

Tabla 6. Factor de corrección aplicado según la distancia a la playa

Distancia a la playa (metros)	Factor de daño
0 – 100	0,40
100 – 200	0,15
200 – 300	0,05

El valor de los activos construidos en el entorno de 100 metros alrededor de la playa tiene un valor de 19 millones de USD, en la franja entre los 100 y 200 metros de 15,9 millones de USD, y en la zona comprendida entre los 200 y 300 metros cercanos a la playa de 13,6 millones de USD.

Considerando el valor de estas edificaciones y los factores de daño descritos anteriormente, se ha estimado un valor total de protección de Playa de Piriápolis igual a 10.676.000 USD anuales (830.000 USD anuales por hectárea), lo que sitúa a la playa en el puesto 14 (sobre 212) en el ranking de playas uruguayas en cuanto a su valor de protección (en cuanto a valor agregado y puesto 19 en valor por hectárea).

Su valor de protección se encuentra muy por encima de la media del país, situada en los 4 millones de USD anuales, mientras que su valor por hectárea es muy similar al valor por hectárea medio de las playas de Uruguay (890.000 USD anuales/ha).

Es necesario añadir que esta estimación del valor de protección es en todo caso una cota inferior. En el caso concreto de Playa Piriápolis, la playa protege por ejemplo un paseo marítimo y una infraestructura de transporte importante (como es la Rambla de los Argentinos) que sería la primera que sufriría importantes daños en caso de pérdida de la playa. La cuantificación de estas infraestructuras no se ha realizado (no sólo hablaríamos de valor constructivo, sino de todo el servicio de transporte, movilidad y recreativo), pero sin duda incrementaría el valor de protección proporcionado por la playa.

Valor recreativo

El valor recreativo proporcionado por las playas viene se estima en base a la valoración subjetiva que realizan sus usuarios del tiempo de ocio pasado en ellas. Esta valoración viene a su vez determinada por el uso que cada uno de los individuos realiza de la playa. Para realizar esta valoración se tiene en consideración la población cercana a la playa, el turismo receptivo en la zona (visitantes, estadía media, gasto, turismo interno), las características de los alojamientos cercanos y las características propias de la playa (tamaño, calidad).

La aplicación de este procedimiento nos permite obtener un valor representativo y único para cada playa, resultando para el caso concreto de Playa de Piriápolis que el valor recreativo de la misma es de 51,7 millones de USD anuales (2.700.000 USD anuales por hectárea). Atendiendo a este resultado, la playa se sitúa en el puesto 27 con respecto al total de las playas uruguayas atendiendo a su valor total recreativo (ligeramente por encima del valor medio del país, situado en 20 millones USD anuales), y asciende al puesto número 22 si la clasificación se realiza considerando el valor por hectárea (justo en la media de las playas de Uruguay, que ronda el millón de USD anual por hectárea).

En términos generales, se puede concluir que el principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, multiplicando por casi 5 el valor del servicio de protección, y que el valor total de la playa se estima en más de 62 millones de USD anuales, 3,1 millones de USD anuales por hectárea.

4.1.2 Exposición física

Para el estudio de la evolución morfodinámica de la playa de Piriápolis, se considera que el transporte longitudinal es nulo y la evolución de la línea de costa está condicionada por el transporte transversal del perfil y por el ANMM. Para la construcción de la línea de costa futura, la playa de Piriápolis se ha discretizado en un total de 21 transectos (Figura 24) en los que se aplica un modelo de equilibrio al que se incluye la contribución del ANMM. A partir de la evolución temporal en cada transecto, se reconstituye la línea de costa en la playa.



Figura 24. Transectos de estudio en la playa de Piriápolis

Se ha definido un ancho potencialmente erosionable de playa igual al ancho de playa seca, debido a que el paseo marítimo está construido sobre las dunas. Los rangos de los parámetros morfológicos utilizados en la caracterización física de la playa son los siguientes:

- Orientación respecto al norte: [179 - 267°]
- Pendiente de la zona de rompientes: 0,017
- Tamaño de sedimento (D50): 0,22 milímetros
- Ancho de playa seca: [0 - 143] metros
- Ancho de campo de dunas: [0 - 46] metros

4.2 Peligrosidad

En este estudio, la evolución de la línea de costa en la playa de Piriápolis se ha simulado con un modelo de una línea basado en transectos que permite predecir los cambios a corto y largo plazo de la posición de la línea de costa producidos por el oleaje, la marea, las corrientes marinas y el ANMM. El modelo acopla un modelo de equilibrio para resolver el transporte transversal y un modelo de una línea para resolver el gradiente de transporte longitudinal.

La playa objeto de estudio está apoyada al este por un puerto, que afecta a su morfodinámica tanto en el transporte neto longitudinal de sedimentos, al ejercer como barrera, como en su forma en planta, por la difracción del oleaje incidente. El modelado riguroso de la zona objeto de estudio requeriría el uso de modelos numéricos de área 2DH que consten de un módulo hidrodinámico acoplado a un módulo de transporte y de evolución de la batimetría. Se deberían incluir en el modelado la interacción ola-corriente, los aportes fluviales y condiciones de contorno realistas. Este tipo de modelos requieren datos de observaciones para fijar las condiciones de contorno y para calibrar los diferentes parámetros

libres de las formulaciones. Por otro lado, el coste de cómputo es elevado, lo que unido a que el modelado de la recuperación de la playa tras temporales está aún en desarrollo, hace inviable la aplicación de este tipo de modelos en la escala temporal del cambio climático. Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo utilizado representa el mejor compromiso entre la escala espacio-temporal del estudio, los procesos considerados y el tiempo de cálculo.

Como se ha justificado al principio del documento, debido al alcance del estudio y a la reducida magnitud de transporte de sedimento observado en las imágenes de satélite, se ha considerado como despreciable el transporte longitudinal en la playa de Piriápolis, y que la morfodinámica de la playa está condicionada por el transporte transversal en el perfil. De este modo, se ha desactivado el módulo de una línea al considerarse nulo el gradiente del transporte longitudinal.

4.2.1 Retroceso de la línea de costa

A partir de la evolución de la línea de costa obtenida con el modelo de erosión, se han obtenido dos tipos de resultados. Por un lado, se ha estimado el retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 (Tabla 7) y por otro, se han obtenido las superficies de playa erosionadas en diferentes horizontes temporales asociados a diferentes periodos de retorno.

En la Figura 25 se representa la línea de costa inicial de la playa (línea marrón), y las líneas futuras de costa (línea verde y línea morada); se ha considerado como línea de costa inicial el límite entre la arena seca y la arena mojada de la playa.

En la Figura 26 se representa una imagen ampliada de la zona de estudio en la que se aprecia que la línea de costa en el horizonte 2100 bajo un escenario RCP8.5 llega al límite con la carretera adyacente. En el año 2100 (RCP8.5) únicamente se mantiene una pequeña porción de playa situada en los extremos oriental y occidental, llegando a desaparecer la zona central de la playa, actualmente emergida y compartimentada por los espigones transversales.

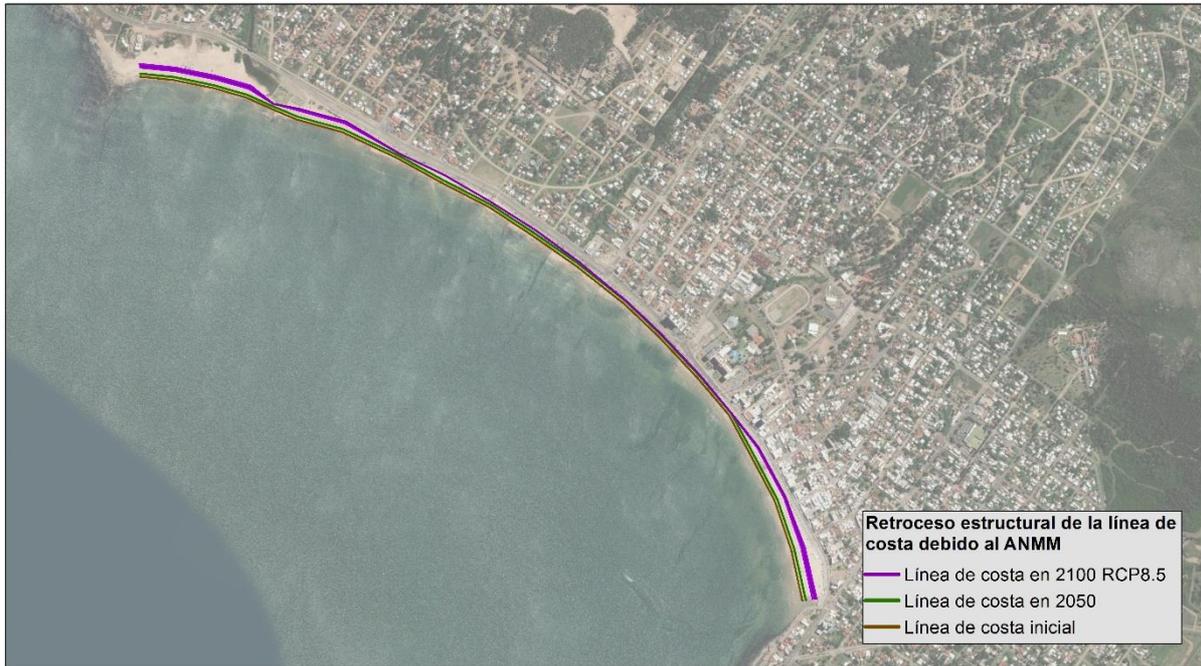


Figura 25. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en la playa de Piriápolis. La línea marrón representa la línea de costa inicial, la línea verde (2050, RCP promedio) y moradas (2100, RCP8.5) representan la línea de costa en el futuro debido al ANMM.



Figura 26. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en la playa de Piriápolis. La línea marrón representa la línea de costa inicial, la línea verde (2050, RCP promedio) y moradas (2100, RCP8.5) representan la línea de costa en el futuro debido al ANMM.

Se ha establecido una frontera no erosionable a partir de la anchura de la playa seca hasta la línea formada por el vial y las construcciones existentes. De este modo, los retrocesos obtenidos con el modelo de erosión se han limitado a la anchura máxima erosionable.

A partir de los retrocesos en la línea de costa calculados en los transectos, se ha estimado el área de playa erosionada debido al ANMM, en 2050 y 2100

En la Tabla 7 se muestra el retroceso estructural en el transecto 12 de la playa de la Piriápolis. Se aprecia que el retroceso ligado al ANMM en el año 2050 se encuentra en un intervalo entre 9,24 y 12,51 metros, mientras que en el año 2100 (RCP8.5), la playa se erosionaría 28 metros.

Tabla 7. Retroceso estructural (m) de la línea de costa debido al ANMM en la playa de Piriápolis

Retroceso estructural (metros)	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
	9,24	10,87	12,51	22,61	26,81	28,00	28,00	28,00	28,00

En la Tabla 8 se recoge la superficie erosionada debido al retroceso estructural de la línea de costa, estimada a partir de los retrocesos obtenidos en los transectos. En 2050 se espera una pérdida permanente de la superficie de playa entre 29.046 y 38.827 m², mientras que en 2100 puede llegar hasta 87.704 (62% del total de la playa).

Tabla 8. Área erosionada (m²) debido al ANMM en la playa de Piriápolis.

Área erosionada (m ²)	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
	29.046	34.043	38.827	61.188	67.862	74.003	74.846	82.945	87.704

En la Tabla 9 se recogen los resultados de área erosionada asociada al retroceso de la línea de playa de periodos de retorno 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años en los diferentes horizontes (presente, 2050 RCP medio y 2100 RCPs 4.5 y 8.5). Mientras que, en el presente, un evento de 5 años de periodo de retorno origina erosiones del 16% de la superficie playa; el mismo evento en el año 2100 RCP8.5 originaría un valor esperado de pérdida de la mitad de la superficie de la playa.

Tabla 9. Área erosionada (m²) asociada a distintos periodos de retorno en la playa de Piriápolis.

Área erosionada (m ²)	Presente	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
		P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
Tr=5	22.727	45.726	50.900	55.112	64.106	70.832	77.322	70.515	77.864	83.935
Tr=10	28.636	51.873	56.203	60.306	69.719	76.723	82.983	78.742	85.237	89.935
Tr=25	35.456	57.601	62.156	66.584	75.192	82.214	86.481	85.453	91.220	96.818
Tr=50	39.416	61.598	66.260	70.734	78.520	84.471	88.380	88.751	95.266	101.158
Tr=100	43.119	65.275	69.989	74.815	81.142	86.012	89.910	91.792	98.581	103.924
Tr=500	50.218	72.988	78.048	82.497	84.502	88.588	92.434	97.448	103.702	107.361

4.3 Riesgo

El riesgo de erosión, al igual que se realizaba con el de inundación, se obtiene como la integración de la información de peligrosidad con la exposición y la vulnerabilidad. En este apartado se muestran los resultados cuantitativos de las consecuencias sobre el valor económico de los servicios ecosistémicos de protección y recreativo proporcionado por la Playa de Piriápolis.

Basando el estudio en el valor económico total de los servicios, y en los datos de erosión obtenidos y reflejados en las tablas anteriores, se obtiene que las consecuencias de la erosión que sufrirá la zona de estudio varían en el presente entre los 1,6 y 7,9 millones de USD anuales para eventos extremos de periodos de retorno entre los 5 y los 500 años de periodo de retorno (Tabla 10).

Tabla 10. Consecuencias debidas a eventos extremos de erosión sobre el valor anual de los servicios proporcionados por la playa, expresado en UO.

SD anuales dañados.

	Probabilidad	0,2	0,1	0,04	0,02	0,01	0,002	
	Periodo de retorno	TR=5	TR=10	TR=25	TR=50	TR=100	TR=500	DAE
PRESENTE	Valor medio	1.626.743	2.582.665	3.959.311	4.893.122	5.855.529	7.942.509	766.864
2050	Percent. 5%	6.585.191	8.474.628	10.449.609	11.949.951	13.419.269	16.777.825	2.450.867
	Valor medio	8.159.529	9.948.407	12.167.349	13.827.217	15.427.348	19.185.008	2.929.490
	Percent. 95%	9.565.873	11.454.009	13.962.702	15.757.560	17.628.253	21.434.604	3.390.466
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	12.943.089	15.308.876	17.806.569	19.417.608	20.735.855	22.488.973	4.446.279
	Valor medio	15.801.147	18.539.200	21.287.357	22.472.253	23.300.104	24.716.150	5.350.452
	Percent. 95%	18.829.590	21.687.486	23.554.397	24.600.517	25.459.601	26.909.310	6.207.395
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	15.660.424	19.527.539	22.998.012	24.807.548	26.536.650	29.907.728	5.561.761
	Valor Medio	19.094.519	22.881.856	26.207.032	28.583.169	30.607.043	33.869.692	6.582.697
	Percent. 95%	22.188.090	25.473.734	29.522.051	32.228.256	34.014.611	36.302.130	7.481.758

Estas cantidades se verán incrementadas con los efectos del cambio climático, de tal forma que los 1,6 millones que se experimentan en el presente para eventos de periodo de retorno de 5 años se

multiplicarán por 14, sobrepasando los 22 millones de USD anuales, en el peor de los escenarios posibles, y que los 7,9 millones de un periodo de retorno de 500 años en la actualidad podrán multiplicarse por 4, llegando a alcanzarse daños por valor de 36 millones de USD anuales.

Tabla 11 Consecuencias permanentes sobre el valor anual de los servicios proporcionados por la playa, expresado en USD anuales dañados.

Horizonte futuro	ANMM	Consecuencias debido al retroceso estructural (USD)
2050	Percent. 5%	2.657.110
	Valor medio	3.650.076
	Percent. 95%	4.747.894
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	11.791.447
	Valor medio	14.503.910
	Percent. 95%	17.247.682
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	17.642.768
	Valor medio	21.667.657
	Percent. 95%	24.225.621

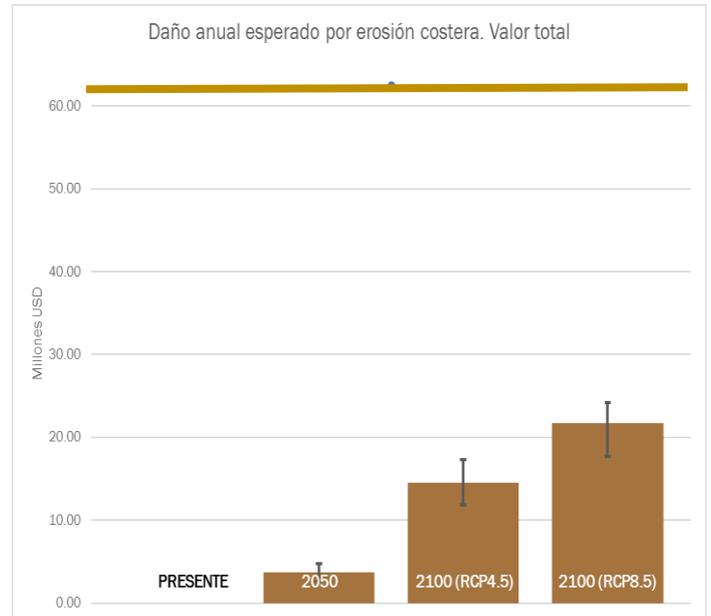
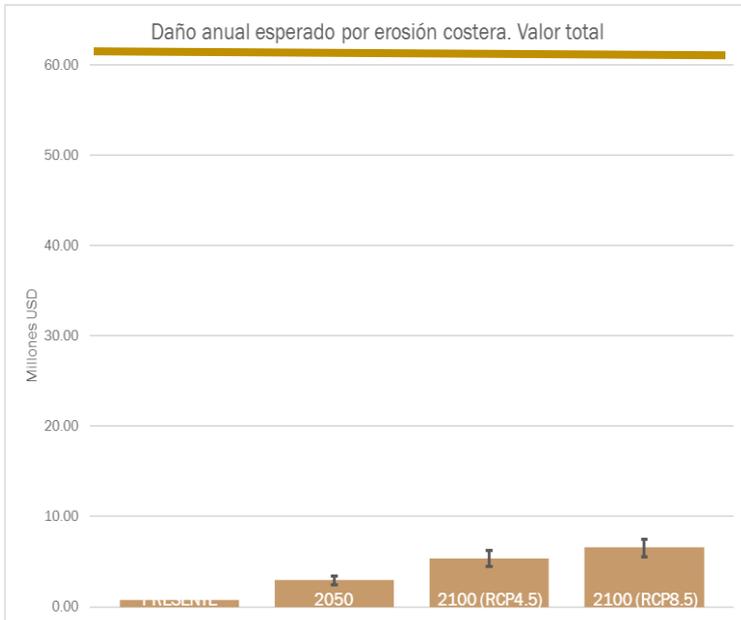


Figura 27. Daño anual esperado por erosión sobre el valor total de la playa (obtenido de los servicios de protección y recreativo proporcionados por la playa). La figura de la izquierda representa el daño por eventos extremos de erosión, mientras que la figura de la derecha el daño por el retroceso estructural. En ambos casos, la línea continua representa el valor total de la playa.

El daño anual esperado, actualmente en el entorno de los 0,8 millones de USD anuales, se multiplicará por 4 para el año 2050 (hasta los 3 millones de USD anuales) y al menos se multiplicará por 5,5 para el año 2100 (4,4 millones de USD anuales en el mejor de los escenarios).

Además de esta variación en las consecuencias que se experimentarán por los efectos del cambio climático, la erosión estructural que sufrirá la Playa de Piriápolis debido al ANMM (Tabla 11) añadirá un daño extra que se prevé alcance los 3,6 millones de USD anuales en 2050 y que variará entre los 11,8 y los 24,3 millones de USD anuales en 2100, por lo que es la aparición de esta erosión estructural la que realmente introduce una componente de riesgo importante, con respecto a las pérdidas debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 26,79 millones de USD (valor presente de los daños, percentil 50%, con una tasa de descuento del 4%). Este valor está condicionado por la tasa de descuento empleada, y variaría entre los 32,18 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 22,46 millones de USD si la tasa a aplicar es del 5% (percentil 50% de los daños).

El valor acumulado desde el presente hasta final de siglo (2100), se estima en 74,66 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 90,91 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

5 CONCLUSIONES

Playa Piriápolis (Intendencia de Maldonado) comprende las playas urbanas Playa de la Rambla y Playa Grande. Es una playa de aproximadamente 3.200 metros de longitud, que se encuentra confinada en su extremo este por el cerro de San Antonio y el puerto construido en su falda, no teniendo confinamiento, desde el punto de vista del transporte de sedimentos, en su extremo oeste. La playa tiene la forma típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por los cabos y puntas exteriores existentes (Punta Negra, Cerro de San Antonio), y en última instancia por el dique exterior del puerto.

A partir de la información del riesgo percibido por los agentes locales y del análisis de imágenes históricas de la playa se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La anchura de la playa seca en la zona central de la playa es menor que la anchura de playa seca en los extremos oeste (Playa Grande) y este (extremo este de Playa de la Rambla) de la playa como consecuencia de la construcción del puerto y de la construcción de la rambla sobre las dunas.
- Los espigones en la zona central compartimentan la playa y condicionan el transporte y forma de la playa seca.
- La playa tiene un transporte de sedimentos con sentido este – oeste, pero la magnitud del mismo es pequeña.
- El balance neto de sedimentos de la playa es negativo.

El aumento del nivel medio del mar esperado en 2050 en la costa de Uruguay es de 0,26 metros para el RCP promedio, y el aumento del nivel medio del mar esperado en 2100 es de 0,58 metros para el RCP4.5, y de 0,80 metros para el RCP8.5. Se han modelado los impactos de inundación y erosión costera en el presente y en el futuro en Playa Piriápolis y la zona urbana adyacente, y se ha cuantificado el riesgo debido al aumento del nivel medio del mar en términos monetarios. De este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones, que sustentan en la mayor parte las conclusiones anteriores:

- Riesgo de inundación costera

En el presente, las únicas zonas en riesgo potencial de inundación son la Rambla de los Argentinos en el tramo comprendido entre las calles Joaquín Muñoz y Julián Álvarez, y en el tramo comprendido entre las calles Gregorio Sanabria y Atanasio Sierra, las parcelas que bordean el arroyo Zanja Honda y el muelle del puerto.

En el futuro, se incrementa el riesgo potencial de la rambla, siendo potencialmente inundada en su totalidad por eventos con probabilidad de ocurrencia media – baja.

En el futuro, se prevé un aumento en la intensidad de los eventos extremos debido al aumento del nivel medio del mar. De esta manera, el riesgo de inundación para eventos con probabilidad alta de ocurrencia en el futuro será equiparable al riesgo de inundación en el presente para eventos con probabilidad muy baja de ocurrencia. En 2050 la superficie inundada por un evento con periodo de

100 años tendrá una extensión similar a la producida en el presente por un evento de periodo de 500 años. Las extensiones de inundación con periodos de 500 años en el presente se darán en 2100 para el RCP4.5 con más frecuencia para eventos de periodos de 25 años y en el RCP8.5 para periodos de 10 años. Mostrando así también la influencia de la mitigación.

La afección de la inundación costera sobre la población es pequeña (menor a 500 personas). No obstante, el riesgo de inundación sobre la población pasará de afectar a 25 personas a más de 300 personas.

Respecto al riesgo sobre los activos construidos, los daños que se experimentan en el presente resultan relativamente reducidos, por debajo de los 100.000 USD incluso para eventos extremos de periodo de retorno elevado. La existencia de un paseo marítimo y de una avenida limitante con la playa sirve sin duda para limitar los daños que pueden ocasionarse por inundaciones. En el futuro, para eventos de periodo de retorno por encima de los 50 años, los daños empiezan a ser considerablemente mayores (del orden del doble o triple que en la actualidad), llegando a poder dispararse por encima del millón de USD para eventos de periodo por encima de los 100 y 500 años a final de siglo en los peores escenarios previstos.

- Riesgo de erosión costera

Se ha estimado que la Playa de Piriápolis está entre las 25 más valiosas de todo el litoral uruguayo. El principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, multiplicando por casi 5 el valor del servicio de protección, estimándose el valor total de la playa en más de 62 millones de USD anuales, 3,1 millones de USD anuales por hectárea.

En el futuro más próximo (horizonte 2050), se experimentarán pérdidas de playa mayores que a los que se experimentan en el presente, pudiendo llegar a multiplicarse por 7. Debido al retroceso estructural de la línea de costa, se perderán de forma permanente entre 9 y 12 metros de playa en 2050, y 28 metros de playa en 2100.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 26,79 millones de USD (valor presente de los daños, percentil 50%, con una tasa de descuento del 4%). Este valor está condicionado por la tasa de descuento empleada, y variaría entre los 32,18 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 22,46 millones de USD si la tasa a aplicar es del 5% (percentil 50% de los daños).

El valor acumulado desde el presente hasta final de siglo (2100), se estima en 74,66 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 90,91 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

6 REFERENCIAS

Boschi, E.E. (1988). El ecosistema estuarial del Río de la Plata (Argentina y Uruguay). Anuario del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Autónoma de México, Vol. 15, pp. 159 – 182.

Fossati, M., Santoro, P., Mosquera, R., Martínez, C., Ghiardo, F., Ezzati, P., Pedocchi, F., Piedra-Cueva, I. (2014). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. Revista Iberoamericana del Agua (1), pp. 48-63.

Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 15, World Scientific Publishing, Singapore.

IHCantabria (2019a). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D3.1: Atlas de Dinámicas Marinas de Uruguay.

IHCantabria (2019b). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D3.2: Proyecciones de cambio climático. Oleaje, residuo del nivel del mar y nivel medio del mar en Uruguay.

IHCantabria (2019c). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D4.1: Informe técnico sobre los resultados del proyecto. Escala nacional.

IHCantabria (2019d). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D4.2: Informe técnico sobre la metodología aplicada en el proyecto. Escala nacional.

IHCantabria (2019e). Desarrollo de herramientas tecnológicas para la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D4.4: Informe técnico sobre la metodología aplicada en el proyecto. Escala piloto.

Jamieson, S.R., Lhomme, J., Wright, G., Gouldby, B. (2012). Highly efficient 2D inundation modelling with enhanced diffusion-wave and sub-element topography. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management, 165 (10), pp. 581-595.

ECOS Uruguay (2019, 25 de marzo) Hundimiento en la rambla de Piriápolis tras el temporal. *ECOS Uruguay*.