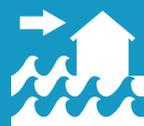


NAP Costas

Plan Nacional de
Adaptación Costera
de Uruguay

Documento preparatorio

Casos piloto. Playa La Aguada (Rocha).





IH cantabria
INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



**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. PLAYA LA AGUADA (ROCHA)

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 la Aguada. Departamento de Rocha. Fuente: turismorocha.gub.uy.

ÍNDICE

Resumen Ejecutivo	3
Antecedentes	6
1 Características de la zona piloto.....	7
1.1 Descripción general	7
2 Clima marítimo en la zona de estudio.....	11
2.1 Dinámicas históricas	11
2.2 Dinámicas futuras.....	15
2.3 Transformación del oleaje.....	16
3 Riesgo de inundación costera.....	16
3.1 Exposición.....	16
3.1.1 Exposición socioeconómica.....	16
3.1.2 Exposición física.....	20
3.2 Peligrosidad	20
3.2.1 Mapas de inundación	20
3.3 Riesgo	25
3.3.1 Población afectada por inundación costera.....	25
3.3.2 Daños sobre activos construidos debidos a inundación costera	28
4 Riesgo de erosión costera	31
4.1 Exposición.....	31
4.1.1 Exposición socioeconómica.....	31
4.1.2 Exposición física.....	32
4.2 Peligrosidad	34
4.2.1 Retroceso de la línea de costa.....	34
4.3 Riesgo	37
5 Conclusiones.....	40
6 Referencias.....	43

RESUMEN EJECUTIVO

DESCRIPCIÓN

- La Playa de la Aguada es una playa abierta ubicada entre los balnearios de La Paloma y La Pedrera, aproximadamente 2 kilómetros al norte del centro de La Paloma (Intendencia de Rocha).
- Es una playa relativamente extensa, de aproximadamente 5.000 metros de longitud, abierta al Océano Atlántico, aunque actualmente confinada en su extremo suroeste por el dique exterior del puerto.
- La playa tiene la forma en planta típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por el dique exterior del puerto de La Paloma.

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:

- La anchura de la playa en la zona adyacente al puerto es sensiblemente menor que la anchura en la zona noroeste.
- En la zona de La Pedrera la arena sobrepasa la punta, lo que señala la existencia de un transporte neto, aunque de reducida magnitud, de suroeste a nordeste.
- El puerto, además de actuar como una barrera a la llegada de la zona suroeste, provocó el giro de la playa.

DINÁMICAS ACTUALES

- La zona de estudio se localiza en la zona oceánica, donde solamente tienen influencia las dinámicas marinas.
- Playa de la Aguada una forma de “gancho” o “medio corazón” gobernada por la dirección del flujo medio de energía del oleaje ($112,5 - 157,5^\circ$).
- La altura de ola asociada al percentil 50% es menor a 2 metros, y la altura de ola asociada al percentil 95% es igual a 3,4 metros

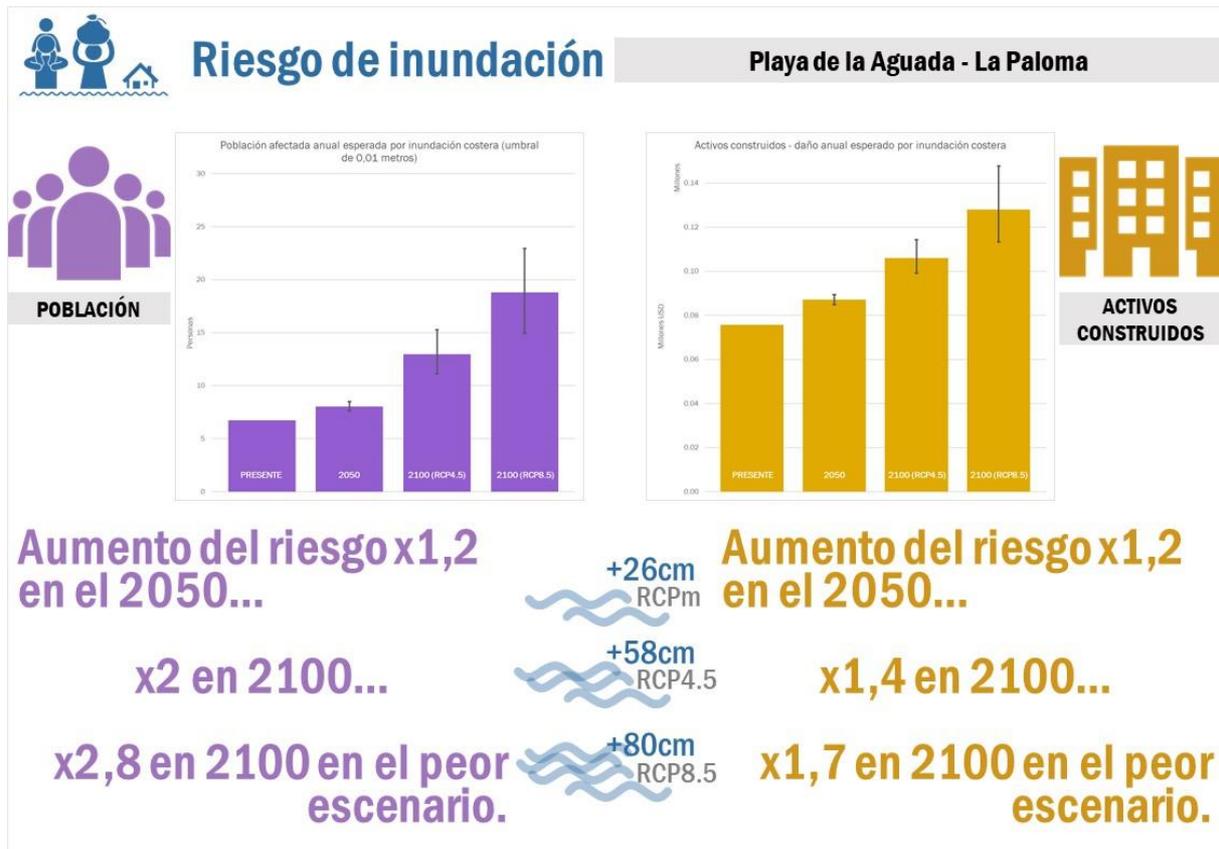
DINÁMICAS FUTURAS

- El aumento medio del nivel medio del mar esperado en 2100 en la costa de Uruguay es de 0,80 metros para el peor escenario (RCP8.5).
- La magnitud de los cambios debido al aumento de nivel medio del mar en 2100 en los parámetros del oleaje y del residuo del nivel del mar 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 $3-6^\circ$. Los cambios en el residuo del nivel del mar son del orden de 0,01-0,015 m.

INUNDACIÓN

Del análisis de riesgo por inundación costera se concluye:

- Una de las zonas más expuestas del área de estudio es la zona urbana de Costa Azul, en la zona central de la playa. En esta zona, además de producirse una mayor inundación, las edificaciones están situadas encima de la playa.
- En el presente, aparecen problemas de inundación para eventos de periodo de retorno bajo (5 años), inundándose la primera línea de edificaciones. Con eventos más extremos, en algunas zonas (Calle del Cañadón, Avenida Costanera Tabaré), la inundación penetra en la costa alcanzando edificaciones más alejadas de la primera línea.
- La extensión de inundación producida en el presente para eventos de periodo de 500 años se alcanzará en 2050 para periodos de 25 años. Las extensiones de inundación de eventos de periodo de 500 años en el presente se darán en 2100 para el RCP4.5 con más frecuencia para periodos de 5 años y en el RCP8.5 para periodos de 5 años. Aunque la extensión inundada avanzará poco, la frecuencia de los eventos aumentará considerablemente. El riesgo de inundación para eventos con probabilidad alta de ocurrencia en el futuro es equiparable al riesgo de inundación en el presente para eventos con probabilidad muy baja de ocurrencia.



EROSIÓN

Del análisis de riesgo por erosión costera:

- Se ha estimado que Playa de la Aguada está en la media del país en cuanto a valor económico proporcionado por sus servicios de protección y recreativo.
- 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 26 millones de USD anuales, 1,2 millones de USD anuales por hectárea.
- En base a imágenes históricas se ha estimado que en el presente este tramo de playa ha sufrido pérdidas de hasta el 8,6% del área de provocadas por temporales.
- En el futuro más próximo (horizonte 2050), retrocesos con la misma probabilidad de ocurrencia que las pérdidas del 8,6% del área de playa del presente provocarán pérdidas del área de playa aproximadamente tres veces mayores.
- Además, se estima que el retroceso estructural de la línea de costa provocará la pérdida permanente de entre 12 y 16 metros de anchura de playa en 2050, y de hasta 40 metros 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 Playa de La Aguada (La Paloma), uno de los casos piloto considerados para la Intendencia de Rocha a propuesta de los departamentos competentes en la gestión de playas.

1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA PILOTO

1.1 Descripción general

La Playa de la Aguada es una playa abierta ubicada entre los balnearios de La Paloma y La Pedrera, aproximadamente 2 kilómetros al norte del centro de La Paloma (Intendencia de Rocha).

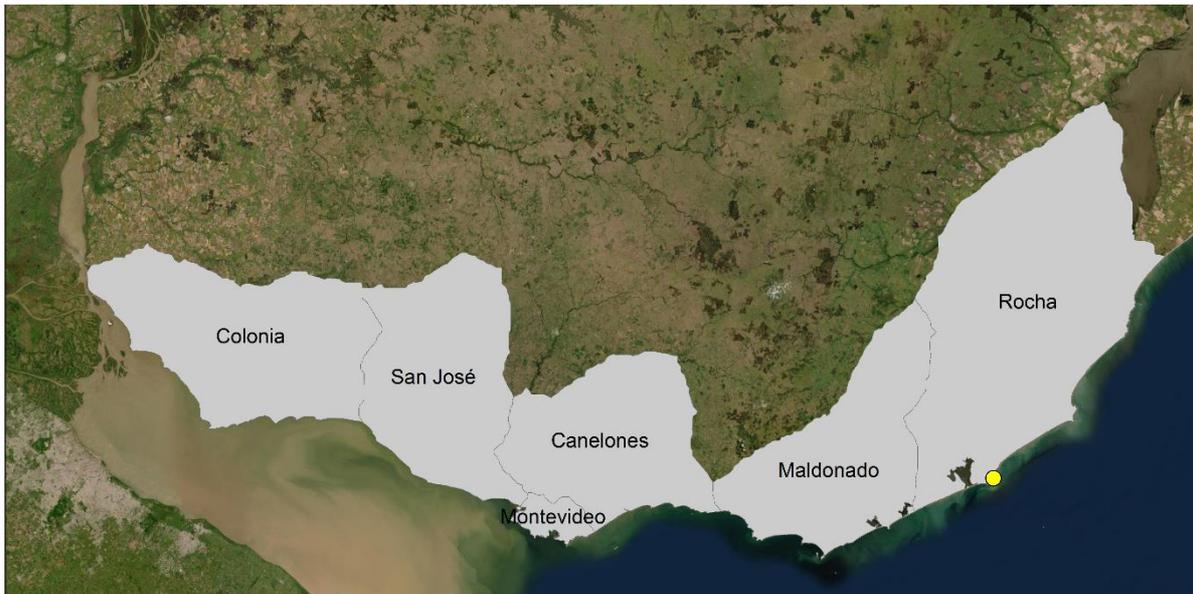


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Playa de la Aguada, Rocha).

Principales elementos morfológicos

Es una playa de aproximadamente 5.000 metros de longitud, abierta al Océano Atlántico, aunque actualmente confinada en su extremo suroeste por el dique exterior del puerto, no teniendo sin embargo confinamiento desde el punto de vista de transporte de sedimentos en su extremo noroeste (en la zona de La Pedrera).

La playa tiene la forma en planta típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por el dique exterior del puerto de La Paloma (Figura 2).

La anchura de la playa en la zona adyacente al puerto es sensiblemente menor que la anchura en la zona noroeste, resultando llamativo el número de viviendas construidas directamente sobre la zona de dunas.

En la zona de La Pedrera (noroeste) se observa claramente que la arena sobrepasa la punta, lo que señala la existencia de un transporte neto de suroeste a nordeste. La acumulación de arena en esta punta no es excesiva, por lo que la magnitud de dicho transporte no es, a priori y actualmente, de gran relevancia.

Fuentes y sumideros de sedimentos

No existe ningún río ni aporte sedimentario de entidad en la playa de la Aguada en la actualidad. Si existen, sin embargo, diversos pequeños arroyos que desembocan en la playa, aunque su flujo natural está cortado por carreteras, viales y obras de fábrica.

En la desembocadura de la Laguna de Rocha, ubicada al suroeste de La Paloma, se forma un pequeño puntal. La disposición de la flecha del puntal corrobora la existencia del transporte con sentido suroeste – nordeste. La presencia del puerto no permite que esa arena alimente a la playa de la Aguada, al menos no en cantidades significativas.

Evolución histórica

De la observación de imágenes satélite de la playa de los últimos 10 años se observa como hecho más destacable la construcción del dique del puerto sobre la arena de la playa, generando un giro de la playa en sentido anti-horario que trasladó parte de la arena de la playa hacia el interior del puerto. Sobre esta arena cautiva en el interior de la zona portuaria posteriormente se construyó el muelle. Todas estas actuaciones dieron lugar a una pérdida neta de sedimentos, además de la ya mencionada barrera a la llegada de arena de la zona suroeste.

Comparando la situación de la zona norte de playa en 2019 con la situación en 2010 (Figura 3) se puede apreciar una pequeña acumulación de sedimento en el extremo norte de la playa. Esta área acumulada (6.622 m^2) se ha utilizado para estimar un volumen de transporte longitudinal de sedimento. Asumiendo una profundidad de cierre de 7,3 metros y una berma de 1,4 metros, se ha estimado un volumen de arena acumulado en 9 años igual a 57.611 m^3 . Esto supone una tasa anual de transporte longitudinal de $6.400 \text{ m}^3/\text{año}$.

Diagnóstico inicial

Un diagnóstico inicial conduce a concluir que la playa de la Aguada es una playa con transporte de sedimento débil ($6.400 \text{ m}^3/\text{año}$) con sentido nordeste. Al no recibir sedimento del suroeste debido a la presencia del puerto, el balance neto de sedimentos en la playa es negativo. La playa pierde arena por La Pedrera lo que provoca erosión en la zona adyacente al puerto. La pérdida de sedimento se producirá hasta que la playa alcance el equilibrio estático, que previsiblemente 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 la Aguada.



Figura 2. Situación de Playa de la Aguada en 2019, con la ciudad de La Paloma al sur de la imagen (Fuente: Google Earth)

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

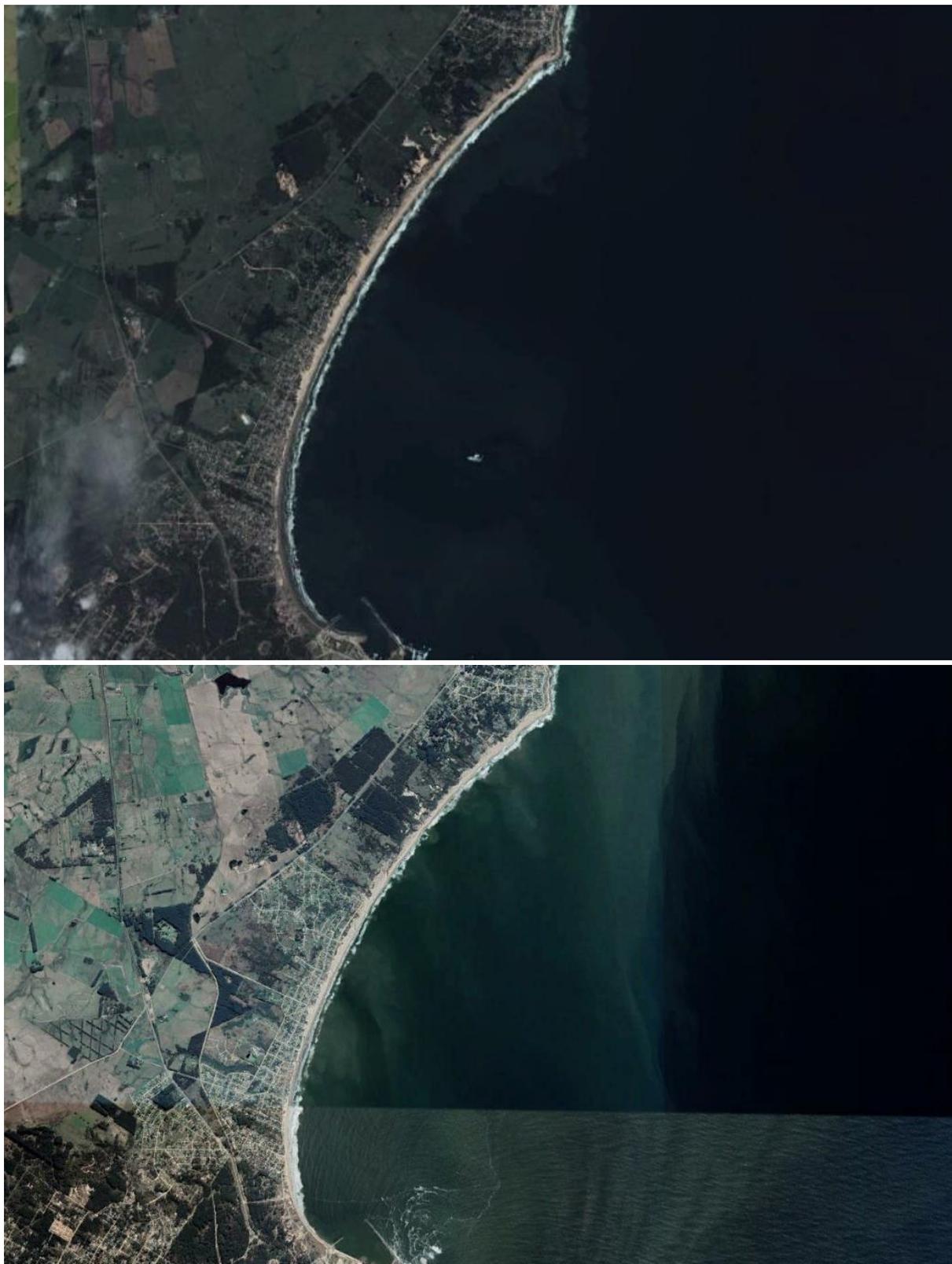


Figura 3. Comparativa de la situación de Playa de la Aguada en 2001 (arriba) y 2019 (abajo) (Fuente: Google Earth).

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. Playa de la Aguada (Rocha) se localiza en la zona oceánica (Figura 4), donde solamente tienen influencia las dinámicas marinas.

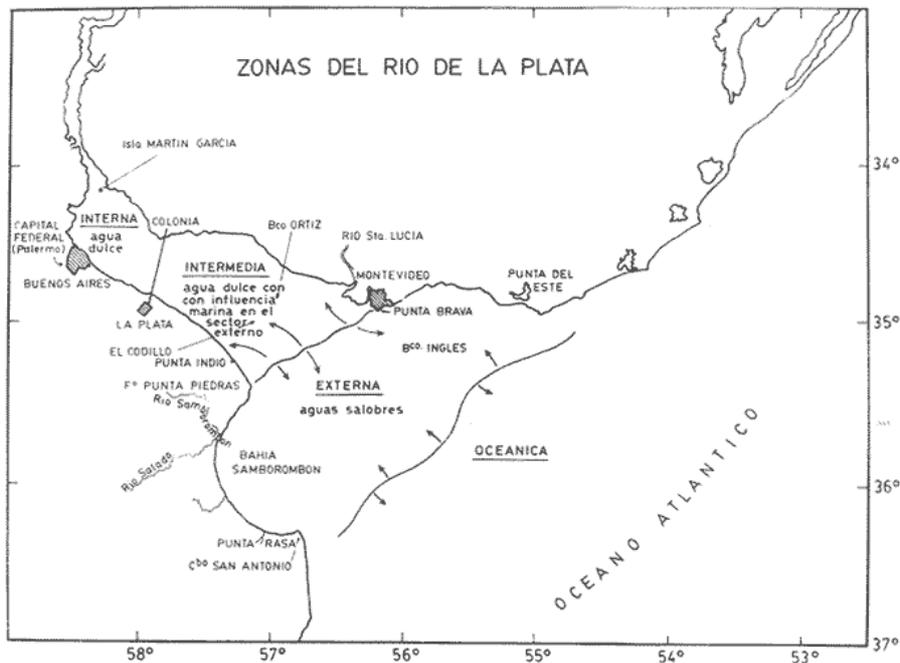


Figura 4. Morfología del Río de la Plata (Boschi, 1988).

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 La Aguada (punto 13, Figura 5). La profundidad en este punto es de aproximadamente 17 metros, por lo que el oleaje no está afectado por la rotura.

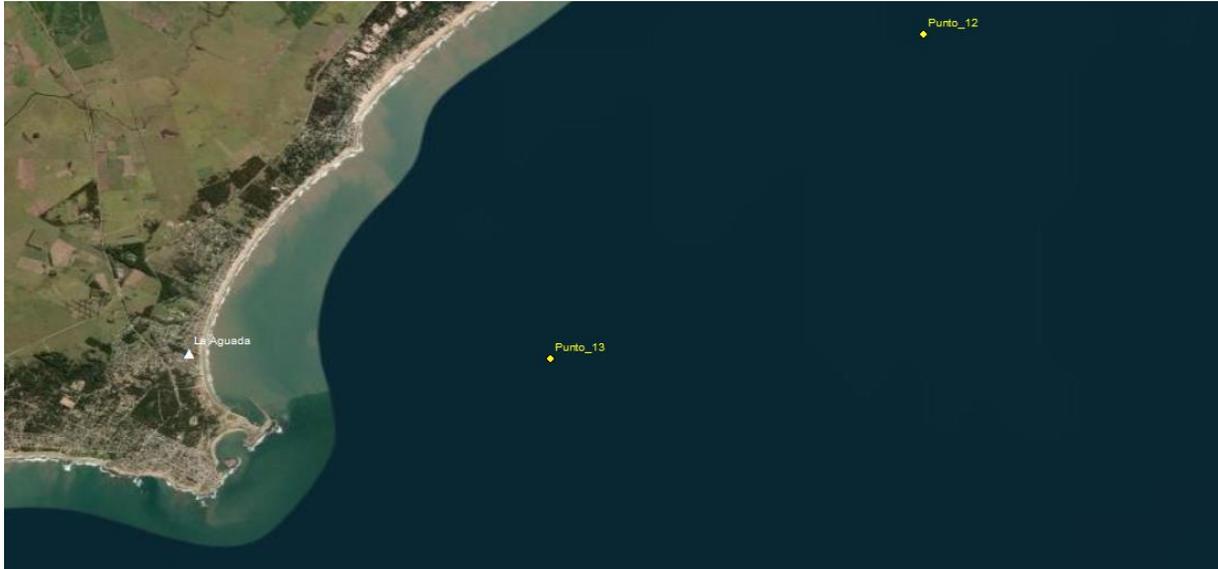


Figura 5. Localización del punto del Atlas más cercano a La Aguada.

Como se comentaba anteriormente, la playa de la Aguada tiene una forma de “gancho” o “medio corazón” gobernada por el patrón de difracción generado por el dique exterior del puerto. Los oleajes más frecuentes y energéticos son los que provienen del sector direccional $112,5^{\circ}$ - $157,5^{\circ}$ (Figura 6). La altura de ola asociada al percentil 50% es menor a 2 metros, y la altura de ola asociada al percentil 95% es igual a 3,4 metros. El oleaje presenta una variabilidad grande en comparación con otros puntos de la costa, con cambios en la mediana de la altura de ola de aproximadamente 1 m entre los meses de verano y los meses de invierno.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

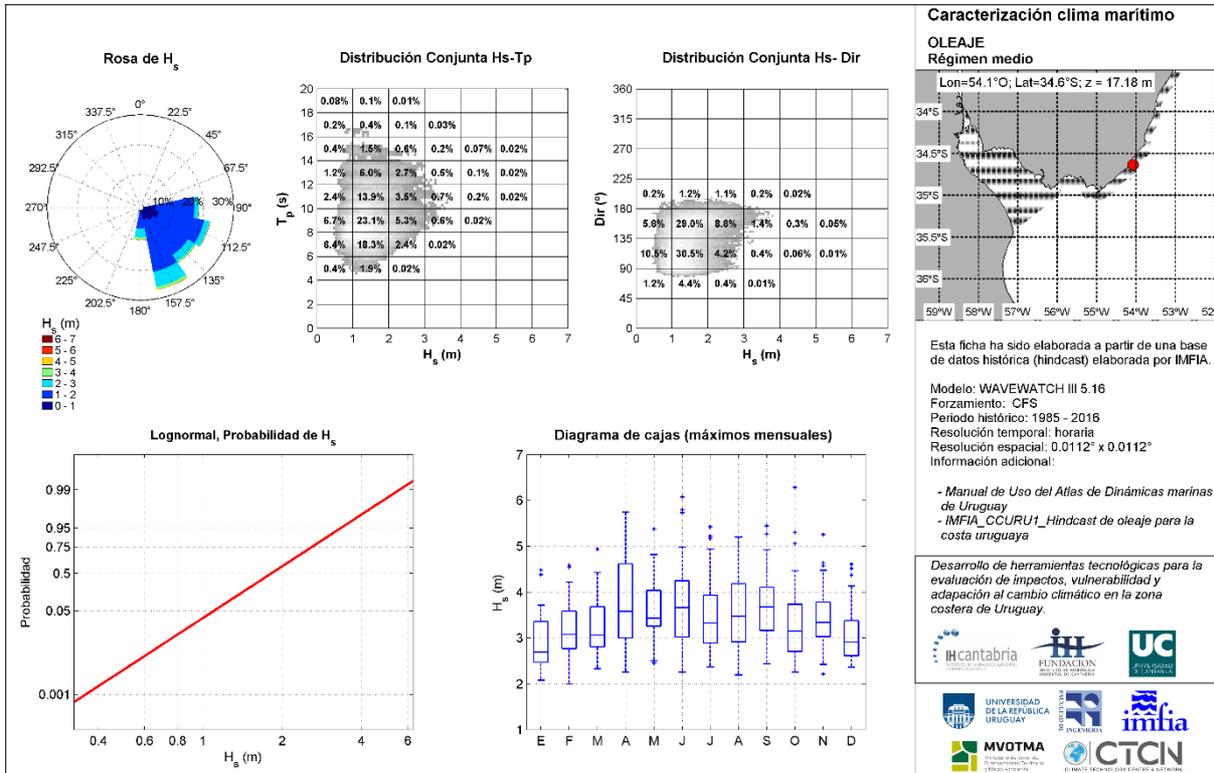


Figura 6. Caracterización del régimen medio de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

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 35 centímetros.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

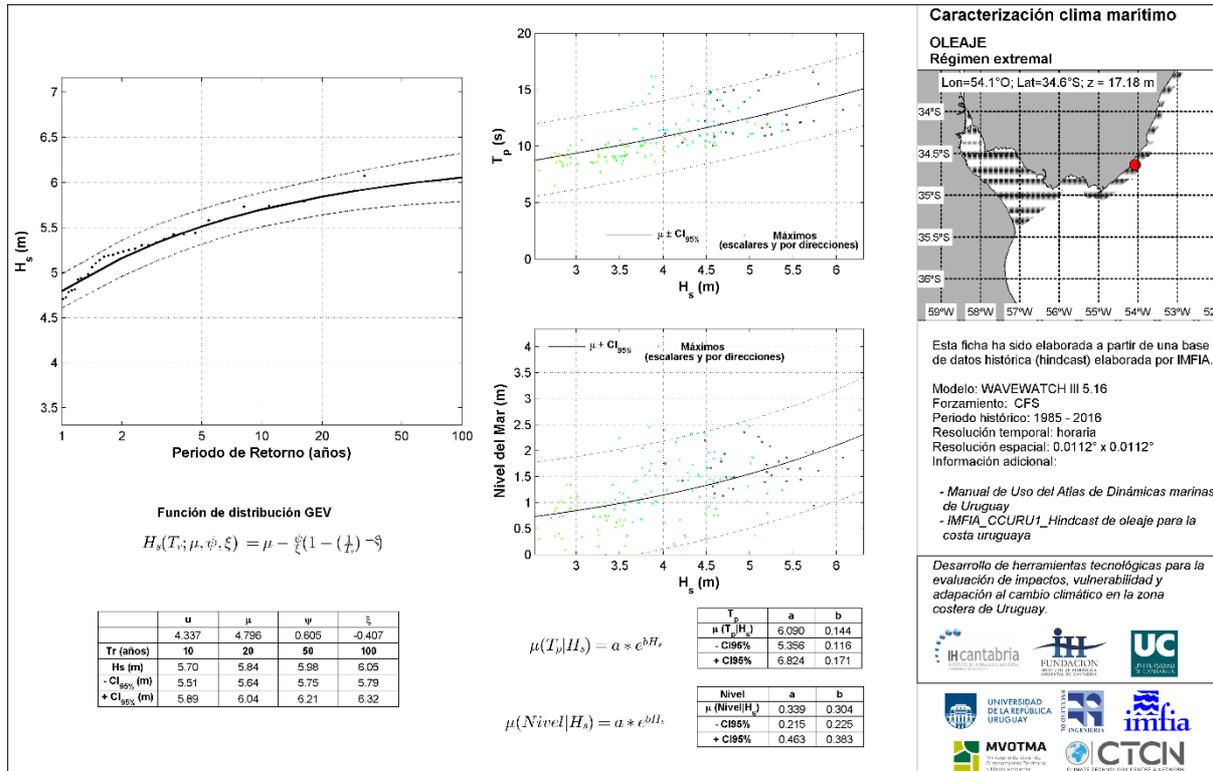


Figura 7. Caracterización del régimen extremal de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

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 [202,5° - 225°] y [22,5° - 45°]. Las corrientes provenientes del sudoeste tienen una intensidad de hasta 0,37 m/s, con intensidades máximas de hasta 1,1 m/s, mientras que las corrientes del noreste tienen una intensidad de hasta 0,37 m/s.

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 18 centímetros, 17 centímetros menor que la diferencia entre las alturas de ola asociadas a los mismos periodos de retorno (35 centímetros).

Teniendo en cuenta que la contribución del oleaje en la sobreelevación 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.

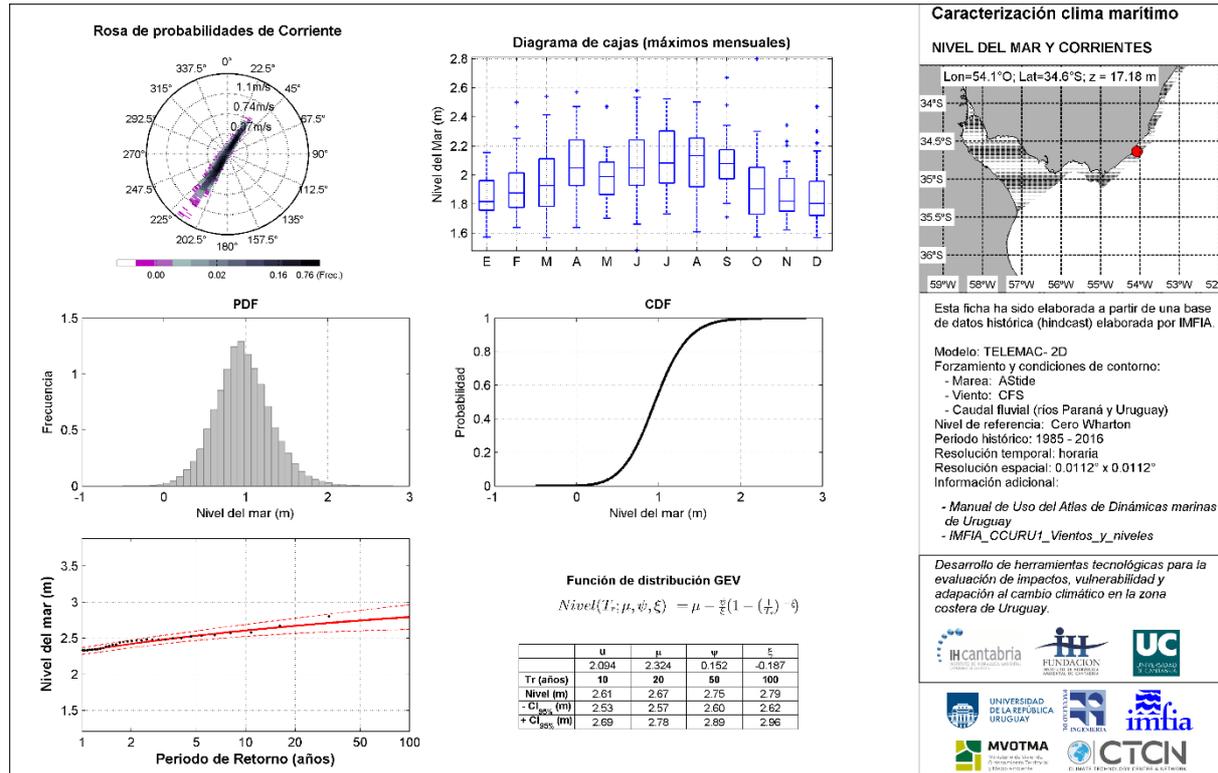


Figura 8. Caracterización del nivel del mar y corrientes en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

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 la Aguada 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 20 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.

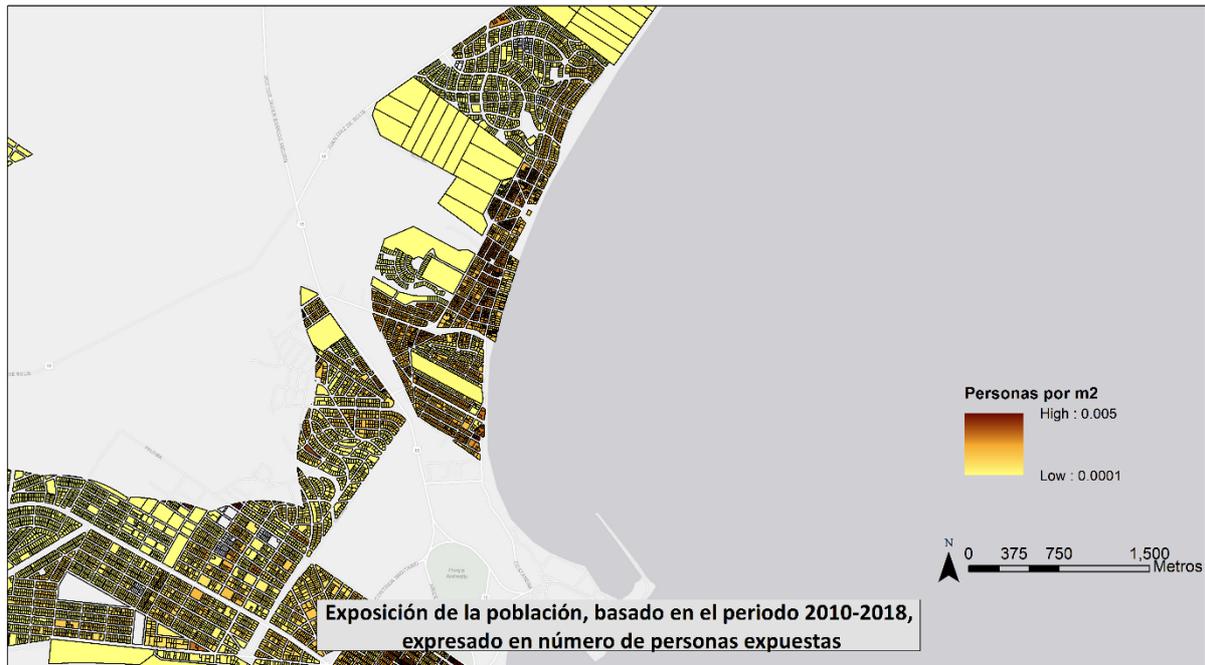


Figura 9. Mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m².

En la Figura 9 se puede observar que según los datos del Censo y del Catastro existe una gran cantidad de edificaciones en la zona de estudio, siendo especialmente destacable el hecho de que hay numerosas edificaciones situadas en la misma playa (Figura 10). La densidad de población de estas edificaciones es variada, destacando los edificios en la Costa Azul y Antoniópolis, entre La Aguada y Arachania, que cuentan con la mayor densidad de población de la zona. Esta alta densidad no viene tanto determinada por una alta concentración de población, sino por la reducida superficie de algunas de las edificaciones.



Figura 10. Edificaciones existentes en la Playa de la Aguada (Fuente: Google Earth).

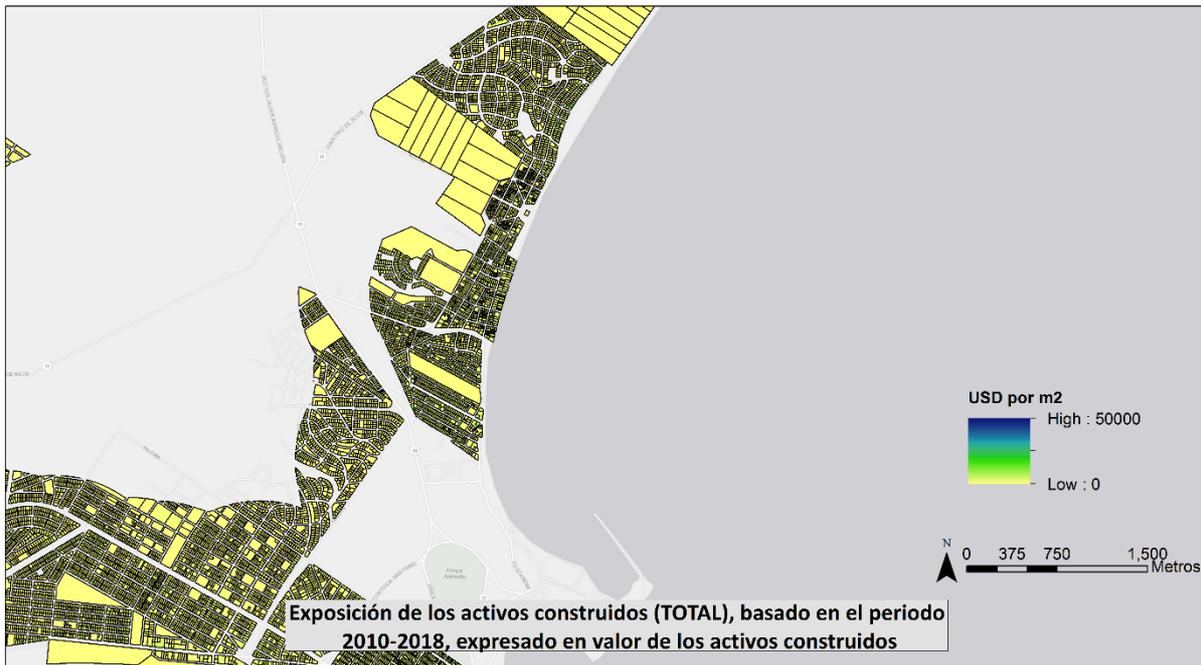


Figura 11. Mapa del valor de exposición del stock construido (total), basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de USD por m².

Por otro lado, en la Figura 10 se observa que el valor (obtenido de datos catastrales oficiales) de las edificaciones incluidas en la zona de estudio es reducido, comparado con lo que se obtiene del análisis del resto del país. Estas construcciones son principalmente viviendas unifamiliares, de una o dos

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

alturas, en una zona con escasa urbanización. Aparecen algunos casos distribuidos de edificaciones de valor nivel medio-bajo y alguna parcela frente a Playa Arachania de valor alto.

En la Figura 12 se recoge un ejemplo de la edificación existente en la zona, que concuerda con las conclusiones obtenidas de la caracterización de la exposición, 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 Playa de la Aguada (Fuente: Google).

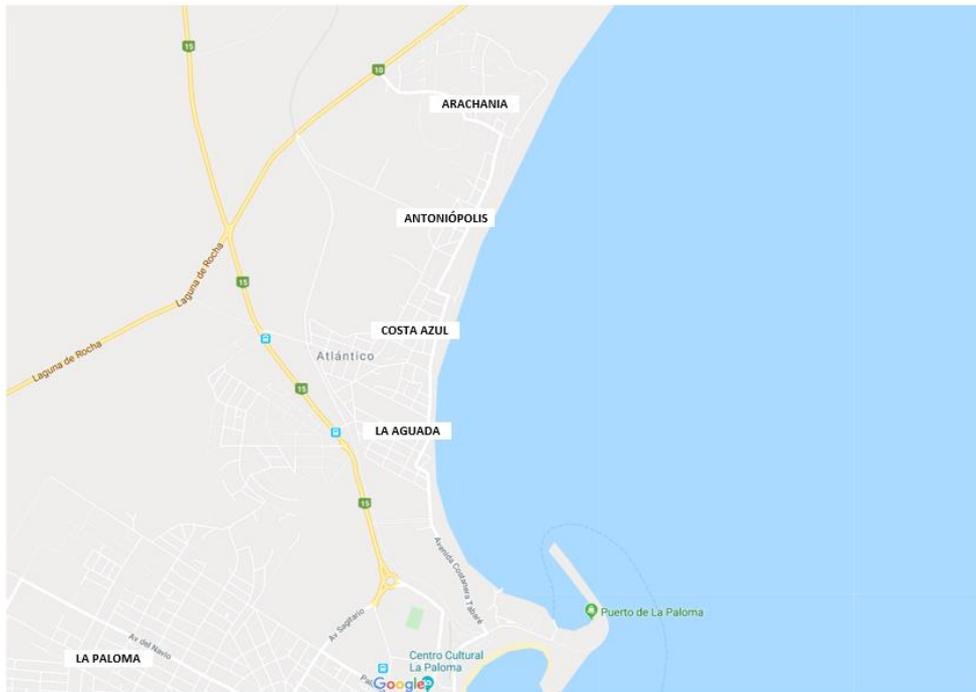


Figura 13. Ubicación de los principales elementos en La Aguada.

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.

En la Figura 14 se muestra el MDT de las zonas costeras de baja altitud adyacentes a Playa de la Aguada. Como se puede observar, solamente una franja costera de aproximadamente 300 metros de anchura de las zonas urbanizadas de La Paloma, La Aguada, Costa Azul, Antoniópolis y la Arachania se encuentran a cotas por debajo de los 10 m. Entre 0 y 4 metros en la zona más cercana a la costa (terreno sombreado en verde en la Figura 14), y entre 4 y 8 metros en la zona más interior (terreno sombreado en naranja y marrón).

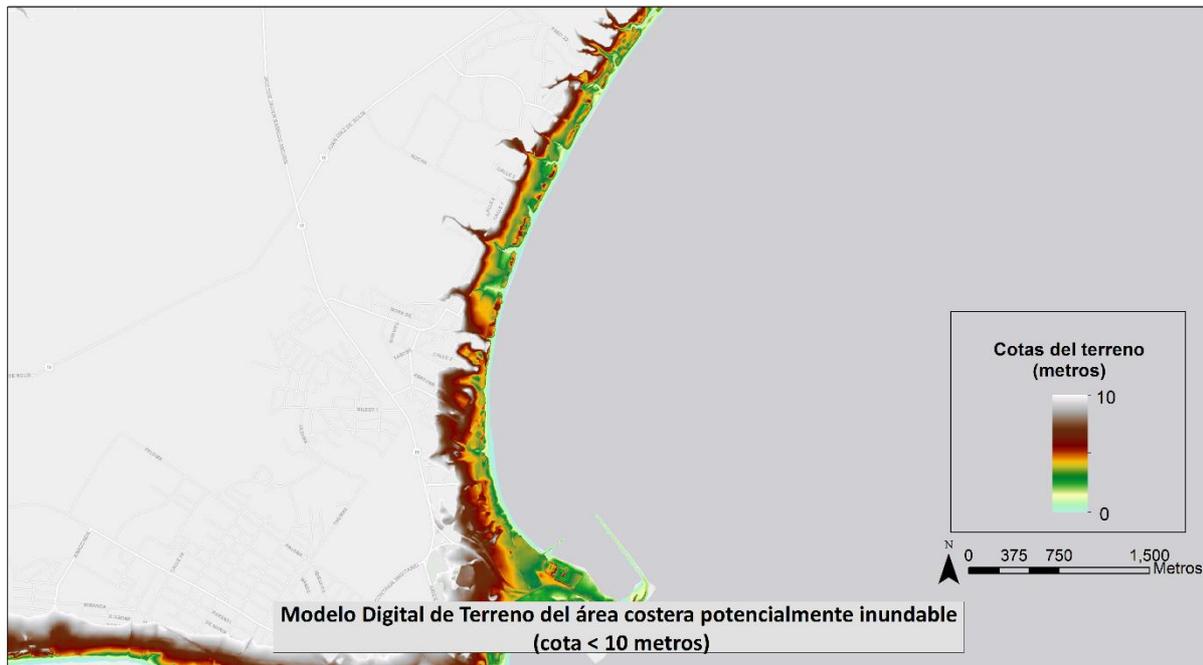


Figura 14. Modelo Digital de Terreno del área potencialmente inundable de la zona de estudio (Fuente: IDEUy).

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 debido 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 principalmente son los eventos de mayor ocurrencia, $Tr=5$ años, los que se propagan en Playa de la Aguada y las zonas adyacentes. Estos eventos inundan las parcelas urbanizadas del frente de playa de la localidad de la Costa Azul. Además, a través de un arroyo por la calle del Cañadón en la Costa Azul y un arroyo que atraviesa el principio de la Avenida Costanera Tabaré en el frente de costa de Antoniópolis, se propaga la inundación para eventos de $Tr= 5$ años y en menor medida para eventos de menor ocurrencia de $Tr=50$ a 500 años, principalmente en las parcelas de la Costa Azul. Se observa que para una amenaza con probabilidad muy baja ($Tr = 500$ años) de ocurrencia, la extensión de la zona inundable (194.848 m^2) es un 13% mayor respecto al evento de $Tr=25$ años (171.328 m^2).

En vista de los mapas de inundación, se podría considerar que, en el presente, las únicas zonas susceptibles de inundación serían las parcelas urbanizadas que bordean los arroyos en el frente de playa de la Costa Azul y de Antoniópolis.

En **2050** (Figura 16), y en ausencia de adaptación, se extiende el área inundada en las parcelas mencionadas en el escenario presente. Donde se daban los eventos de $Tr=50$ años, en este escenario se propagan eventos de 5 a 10 años. Además, los eventos de menor ocurrencia, de 50 a 500 años, avanzan inundando más parcelas. En 2050, la superficie inundable asociada al evento $Tr=25$ años (195.008 m^2) es superior a la superficie inundable asociada al evento $Tr=500$ años en el presente. Asimismo, la superficie inundable asociada al $Tr=500$ años en 2050 (217.408 m^2) aumenta un 12% 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 una superficie de inundación en 2050 ligeramente mayor que en el presente.

En **2100** (Figura 17 y Figura 18), se puede observar que la extensión inundada aumenta para el RCP4.5 y el 8.5, ligeramente superior para el escenario 8.5. Los eventos de $Tr=5$ años se extienden considerablemente y los de $Tr=$ entre 10 y 500 años también, aunque en menor medida. Para el RCP4.5, en la zona del arroyo en Antoniópolis se extiende la inundación exclusivamente por eventos de menor ocurrencia entre 10 y 500 años, mientras que para el RCP8.5 también se produce la extensión con el $Tr= 5$ años.

En términos de extensión de la superficie inundada, en 2100 y para el RCP4.5 el evento con $Tr=5$ años (203.376 m^2) tiene una superficie mayor que el evento $Tr=500$ años en el presente (194.848 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 $Tr=5$ años (222.480 m^2).

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

Se puede concluir que, además de la adaptación, la senda de mitigación tendrá influencia sobre la superficie inundable en esta zona a partir de mitad de siglo.

De la misma manera se observa que la extensión de inundación no avanza significativamente. Sin embargo, la frecuencia de los eventos sí que aumenta considerablemente. La superficie del periodo de retorno de 500 años en el presente se alcanza para el de 5 años en ambos escenarios.

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	14.448	27.760	30.320	33.264	44.096	50.192	56.256	55.616	64.112	72.992
Tr=5	154.304	170.944	175.072	179.600	195.136	203.376	211.872	211.024	222.480	237.136
Tr=10	162.944	180.080	184.688	189.328	204.192	212.624	220.976	219.984	234.400	249.200
Tr=25	171.328	190.784	195.008	199.328	214.400	222.736	233.744	232.432	247.216	263.696
Tr=50	177.952	197.136	201.248	205.376	220.496	231.024	241.088	239.744	255.712	273.344
Tr=100	183.728	202.464	206.672	211.056	227.040	237.664	248.928	247.584	264.032	282.224
Tr=500	194.848	213.312	217.408	221.840	240.192	251.440	263.616	262.352	280.480	301.648

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA



Figura 15. Inundación en el presente para distintos eventos.

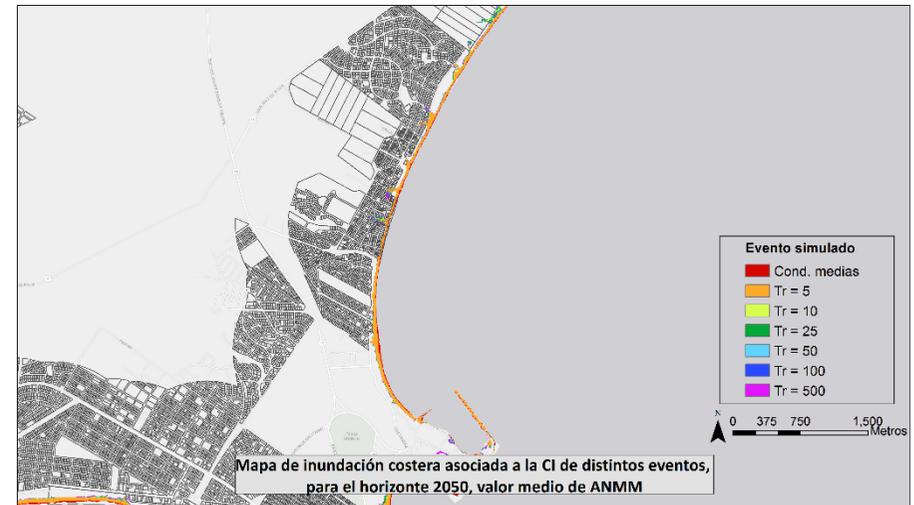


Figura 17. Inundación en 2100 (RCP4.5) para distintos eventos.

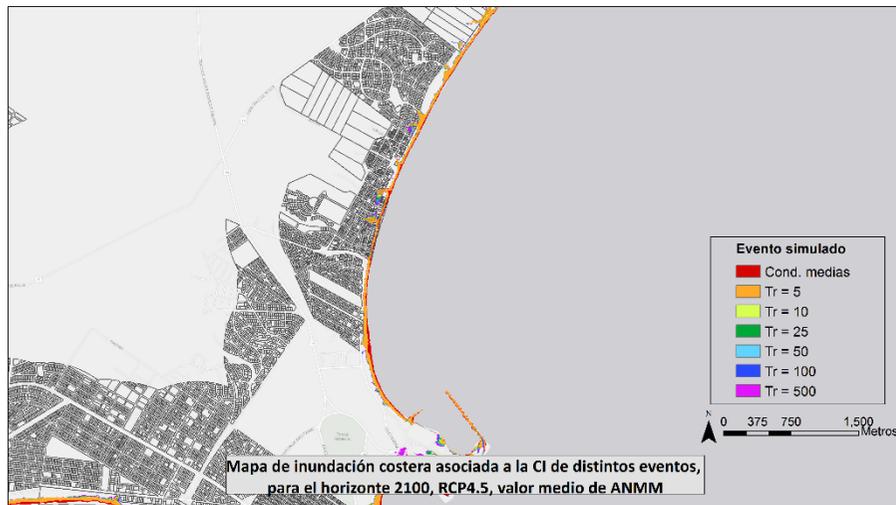


Figura 16. Inundación en 2050 para distintos eventos.

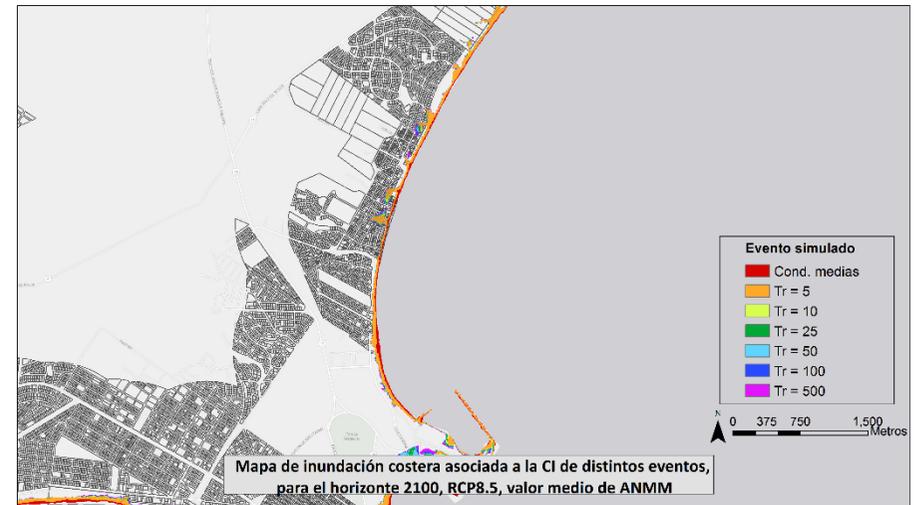


Figura 18. Inundación en 2100 (RCP8.5) para distintos eventos.

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 4.208 m² y 4.384 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 16.448 m² y 18.192 m², respectivamente. La Tabla 2 recoge las diferencias entre las diferentes simulaciones realizadas.

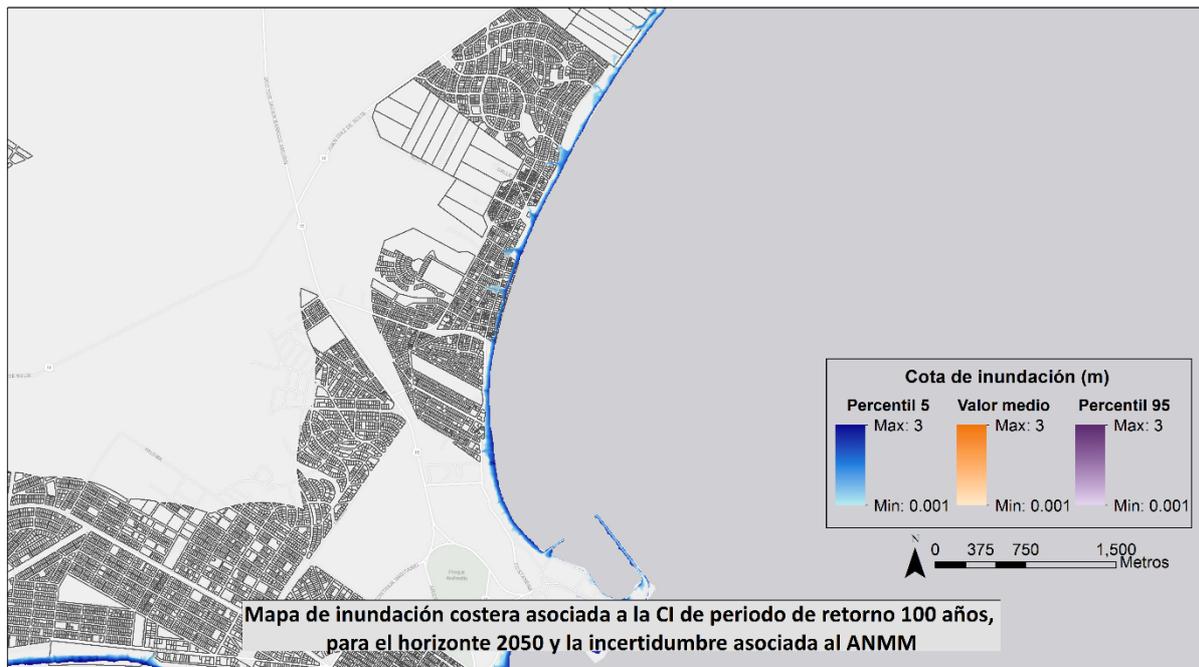


Figura 19. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2050.

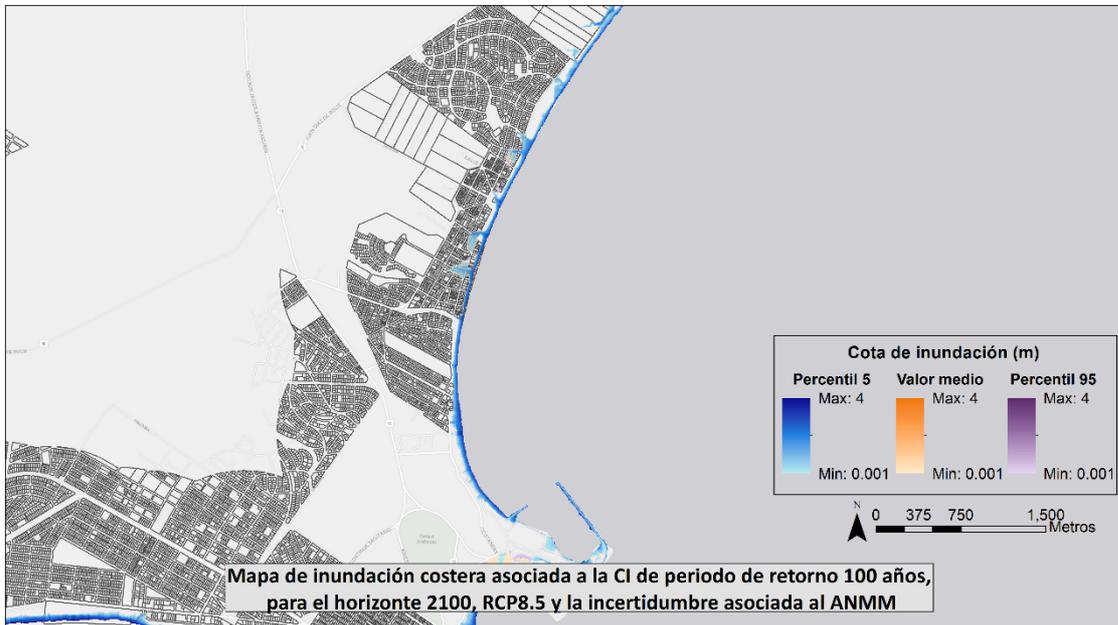


Figura 20. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2100 (RCP8.5).

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)	202.464	206.672	211.056	247.584	264.032	282.224
Cota máx (m)	3,10	3,16	3,21	3,57	3,69	3,80

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 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.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

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	19	20	21	22	23	24	6
2050	Percent. 5%	21	22	23	24	25	29	7
	Valor medio	21	23	24	25	26	31	7
	Percent. 95%	22	23	25	26	28	33	7
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	24	26	29	33	36	44	8
	Valor medio	25	29	34	37	41	52	9
	Percent. 95%	28	33	39	44	50	62	10
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	28	32	38	43	49	61	10
	Valor medio	34	39	49	55	62	74	12
	Percent. 95%	41	50	61	69	76	88	15

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	22	23	23	24	26	32	7
2050	Percent. 5%	23	25	29	33	36	45	8
	Valor medio	24	26	32	35	39	49	8
	Percent. 95%	25	28	34	38	42	53	9
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	32	37	46	52	58	71	11
	Valor medio	37	43	54	61	69	81	13
	Percent. 95%	42	52	64	72	79	91	15
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	41	51	63	71	78	89	15
	Valor medio	54	65	77	84	91	103	19
	Percent. 95%	68	79	90	97	105	121	23

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

Se observa cómo existe una mínima afección sobre la población en la zona de estudio, tanto para la situación presente como para los distintos escenarios futuros. Esto se traduce en que en el presente se ven afectadas, con alturas de agua de más de 30 centímetros, entre 20 y 25 personas, en función del periodo de retorno considerado. En el futuro, estas cantidades pueden aumentar hasta más de 75 en el peor escenario posible.

Si se considera un umbral de afección aún menor (1 centímetro de altura de agua), estas estimaciones de personas en riesgo pueden aumentar hasta por encima del centenar en el horizonte de 2100 y para el peor de los escenarios posibles.

A continuación, se representan las figuras (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.

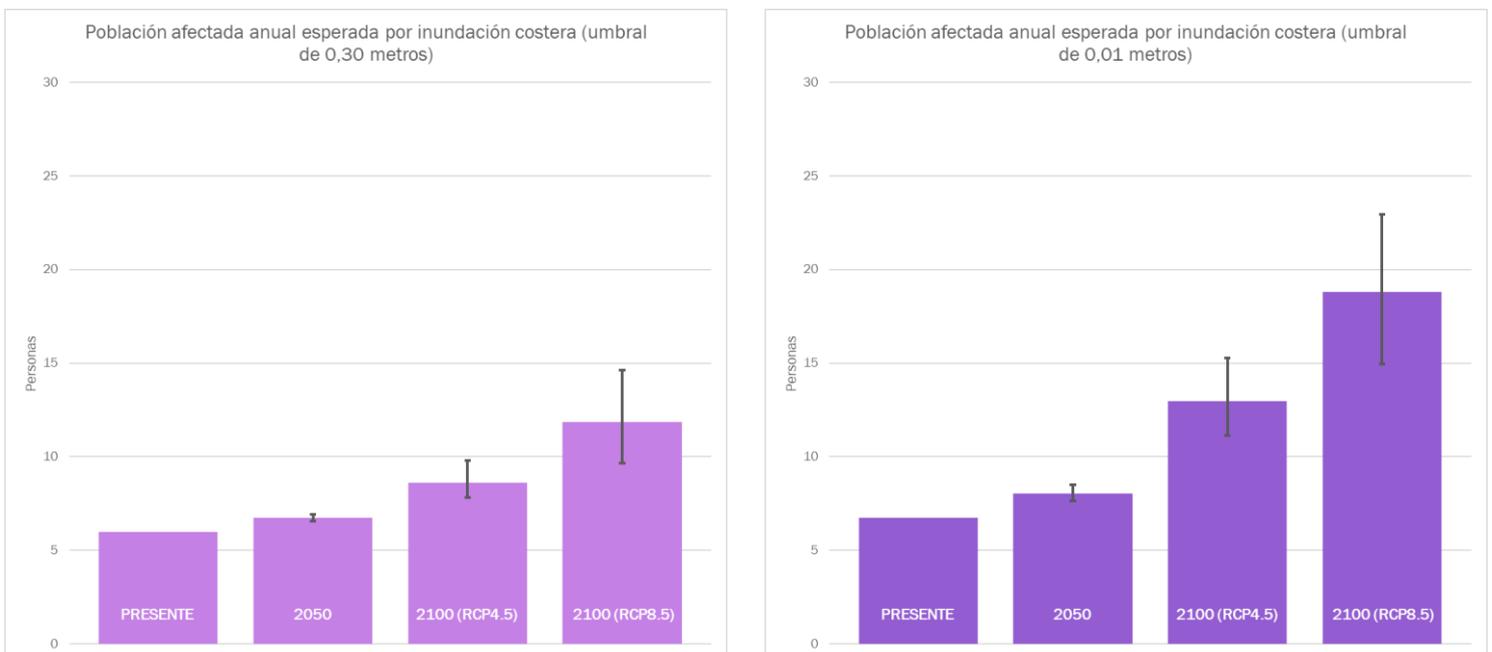


Figura 21. Riesgo de inundación sobre la población, expresado como población anual esperada en número de personas afectadas. A la izquierda, personas afectadas con más de 30 centímetros de altura de agua. A la derecha, personas afectadas con más de 1 centímetro de altura de agua.

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 moderado, a una afección esperada futura que podrá llegar a duplicar el riesgo actual (si se considera un umbral de 30 centímetros) o casi triplicarlo (si utilizamos un umbral de 1 centímetro de altura de inundación).

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 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	241.931	256.577	271.734	281.396	290.730	309.725	75.762
2050	Percent. 5%	271.679	285.846	303.357	315.783	327.804	354.967	84.861
	Valor medio	278.402	293.384	311.762	325.228	338.373	368.924	87.101
	Percent. 95%	285.323	301.211	320.914	335.454	349.872	384.514	89.451
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	312.727	332.861	359.838	381.272	403.350	456.976	99.109
	Valor medio	331.116	355.159	389.094	416.085	444.612	512.059	105.935
	Percent. 95%	352.880	383.220	425.857	461.003	496.483	575.257	114.308
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	350.311	379.799	421.209	455.311	490.169	567.722	113.291
	Valor medio	388.748	429.309	487.626	532.783	575.724	668.534	128.009
	Percent. 95%	441.883	498.358	573.005	626.114	678.663	801.571	147.777

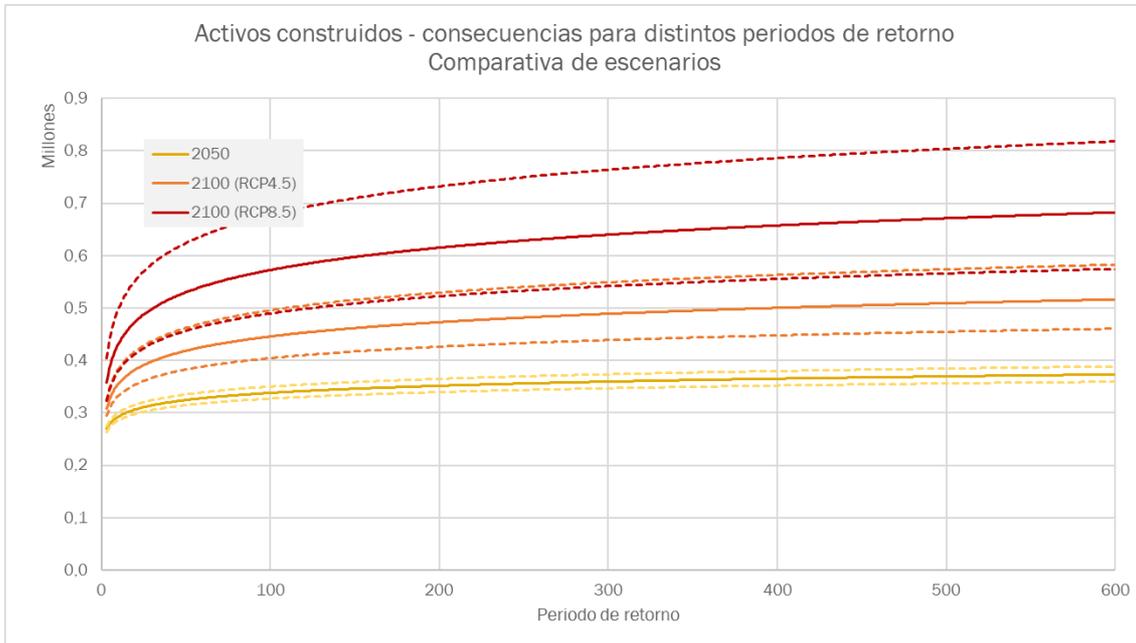


Figura 22. Consecuencias sobre los activos construidos para distintos periodos de retorno para los horizontes 2050 y 2100 (estimación en base a datos catastrales). Las líneas continuas representan el valor medio, mientras que las líneas discontinuas representan los percentiles del 5% y del 95%.

En el presente se observan unos daños relativamente reducidos, del orden de los 250.000 – 300.000 USD. Sin embargo, se aprecia de los resultados que estos daños se verán sin duda incrementados en los distintos horizontes y escenarios futuros. Así, se puede llegar a experimentar daños sobre los activos construidos por encima de los 300.000 USD en el 2100 cuando tengan lugar eventos de extremos con un periodo de retorno de 5 años. Estos daños pueden alcanzar los 650.000 USD con eventos de periodo de retorno de 500 años. Estas cantidades significan que en el futuro, los daños que actualmente se sufren con eventos de baja probabilidad, sucederán con eventos mucho más frecuentes.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

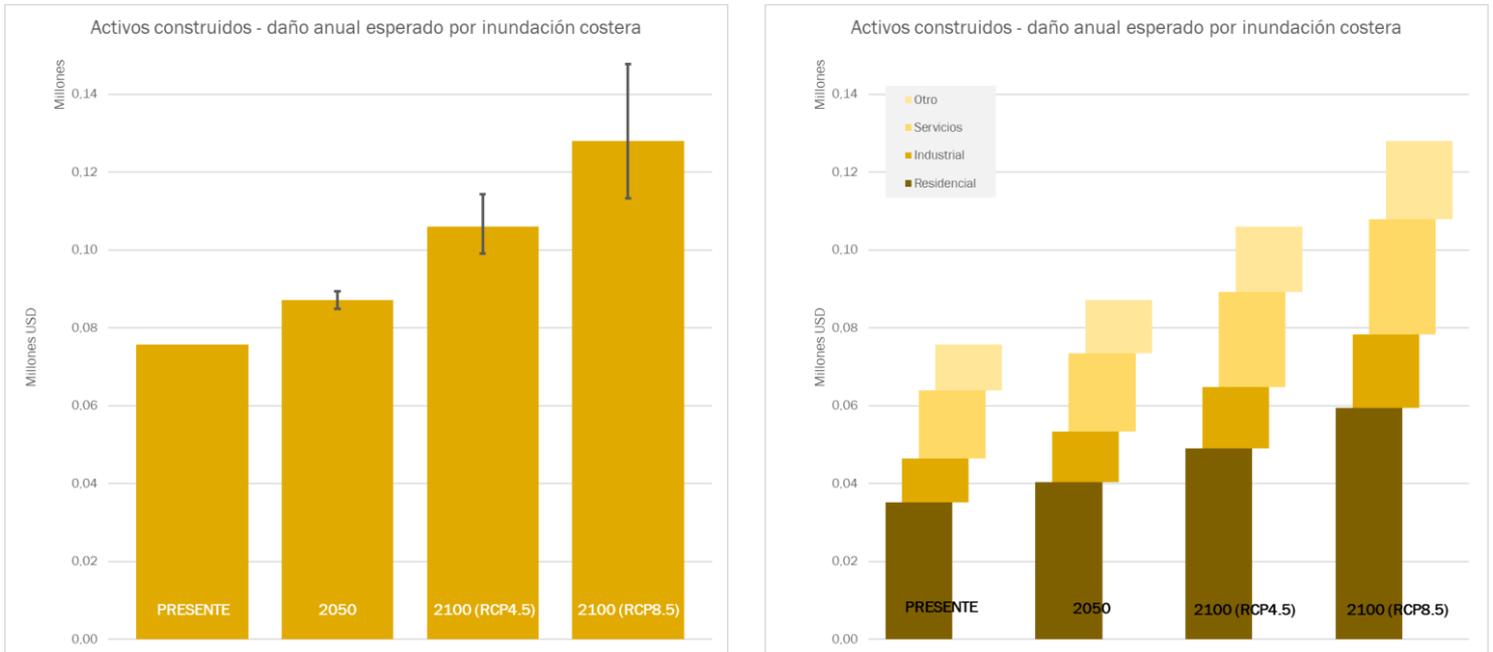


Figura 23. Riesgo de inundación sobre los activos construidos, expresado como daño anual esperado en millones de USD (estimación en base a datos catastrales). A la izquierda, el total de daño esperado. A la derecha, la distinción en categorías de activos construidos (residencial, industrial, servicios 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 15% en el año 2050 y entre un 40% y un 70% 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 categorías (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 8 millones de USD, en la franja entre los 100 y 200 metros de 2,2 millones de USD, y en la zona comprendida entre los 200 y 300 metros cercanos a la playa de 6,6 millones de USD. Estos valores se sitúan en una zona media entre los activos cercanos a las playas de todo el litoral del país.

Considerando el valor de estas edificaciones y los factores de daño descritos anteriormente, se ha estimado un valor total de protección de Playa de la Aguada igual a 4.775.000 USD anuales (137.669 USD anuales por hectárea), lo que sitúa a la playa en el puesto 30 (sobre 212) en el ranking de playas uruguayas en cuanto a su valor de protección (en cuanto a valor agregado y valor por hectárea).

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

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 la Aguada que el valor recreativo de la misma es de 21,4 millones de USD anuales (1.085.000 USD anuales por hectárea). Atendiendo a este resultado, la playa se sitúa en el puesto 90 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 64 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 26 millones de USD anuales, 1,2 millones de USD anuales por hectárea.

4.1.2 Exposición física

Para el estudio de la evolución morfodinámica de la playa de la Aguada, 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 la Aguada se ha discretizado en un total de 20 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.

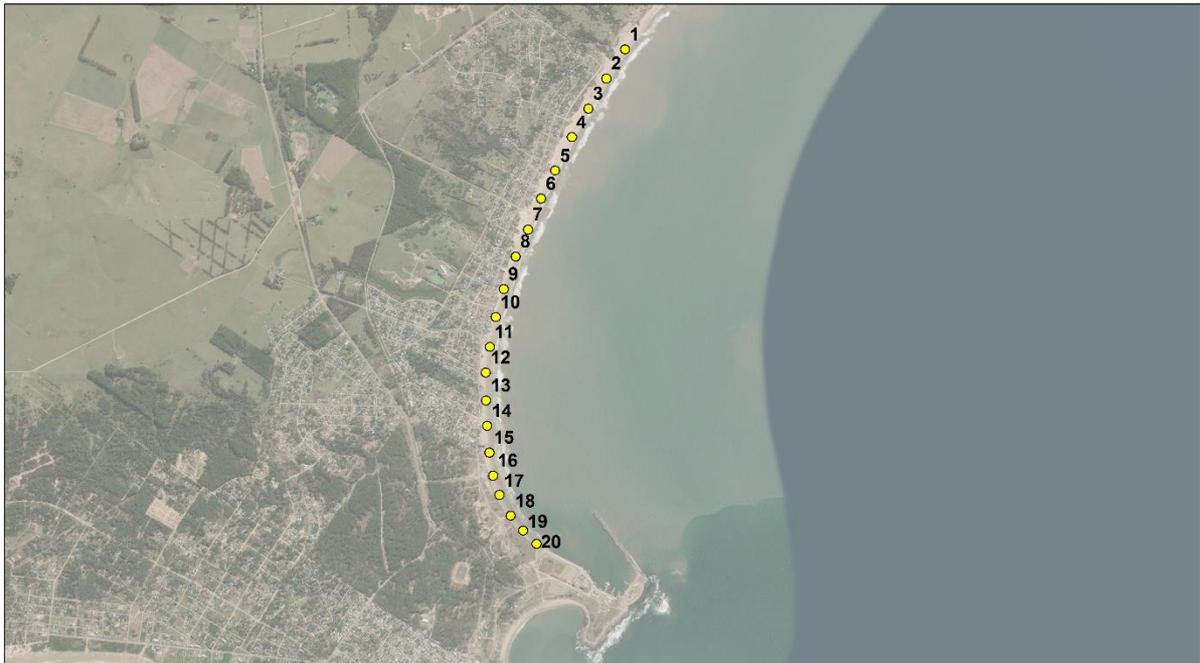


Figura 24. Transectos de estudio en la playa de la Aguada

Para caracterizar los parámetros morfológicos de los transectos se ha inferido el tamaño de sedimento y la pendiente del Informe Técnico Freplata A10.4b. (López Laborde, 2003). Se ha definido un ancho potencialmente erosionable de playa igual al ancho de playa seca más la mitad del ancho de dunas en el caso de que no existan construcciones antrópicas que limiten el área potencialmente erosionable. Los rangos de los parámetros morfológicos utilizados en la caracterización física de la playa son los siguientes:

- Orientación respecto al norte: [30 - 123°]
- Pendiente de la zona de rompientes: 0,017
- Tamaño de sedimento (D50): 0,16 milímetros
- Ancho de playa seca: [0 - 73] metros
- Ancho de campo de dunas: [0 - 89] metros

4.2 Peligrosidad

En este estudio, la evolución de la línea de costa en la playa de la Aguada 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 la Aguada, 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 las viviendas e infraestructuras adyacentes.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA



Figura 25. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en la playa de la Aguada. 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 ampliado de la playa de la Aguada. 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.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

A partir de los retrocesos en la línea de costa calculados en todos los transectos (Tabla 7), se ha estimado el área de playa erosionada debido al ANMM, en 2050 y 2100 (Tabla 8). La superficie erosionada debido al ANMM se considera como superficie de playa no recuperable, ya que al estar limitada por las viviendas y la carretera la playa no puede adaptarse a las nuevas condiciones de dinámicas y retranquearse hacia el interior.

En la Tabla 7 se muestra el retroceso estructural en la playa de la Aguada (La Paloma) en el transecto 12. Se aprecia que el retroceso ligado al ANMM en el año 2050 se encuentra en un intervalo entre 12,14 y 16,62 metros, mientras que en el año 2100 (RCP8.5), la celda se erosionaría por completo.

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

Retroceso estructural (metros)	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
	12,14	14,28	16,62	36,34	42,12	47,00	47,00	47,00	47,00

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 I. En 2050 se espera una pérdida permanente de la superficie de playa entre 56.923 y 77.320 m², mientras que en 2100 puede llegar hasta 242.210 m² (65% del total de la playa). Como se ha mencionado anteriormente, esta superficie de playa no es recuperable, salvo que se implementen medidas de adaptación.

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

Área erosionada (m ²)	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
	56.923	67.132	77.320	159.066	181.185	200.168	202.689	223.374	242.210

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 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 10% de la superficie de la playa; el mismo evento en el año 2100 RCP8.5 originaría un valor esperado de pérdida del 46% de la superficie de la playa.

Esta área de playa es erosionada durante eventos extremos y, si no se toman medidas, puede no ser recuperable en su totalidad. Ante la falta de aportes y depósitos de arena, los temporales provocarán la erosión permanente de una parte importante de la playa de la Aguada, comenzando por la zona de la playa situada al Suroeste, más próxima al puerto.

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

Área erosionada (m ²)	Presente	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
		P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
Tr=5	32.131	84.058	99.170	114.347	152.078	176.150	197.554	175.094	199.379	218.786
Tr=10	39.816	96.075	112.371	128.863	171.967	195.575	215.229	202.401	225.014	245.075
Tr=25	49.426	108.985	126.477	143.790	190.091	212.253	229.902	226.250	249.977	266.312
Tr=50	56.484	117.233	135.244	152.229	200.341	220.295	238.058	240.650	262.938	275.051
Tr=100	63.431	124.497	142.370	158.333	207.851	226.850	244.055	252.299	270.092	276.714
Tr=500	79.264	137.468	153.651	168.812	219.066	237.468	252.882	267.340	276.714	276.714

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 Playa de la Aguada.

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 0,2 y 1,2 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 USD anuales dañados.

	Periodo de retorno	TR=5	TR=10	TR=25	TR=50	TR=100	TR=500	DAE
PRESENTE	Valor medio	192.797	296.048	456.193	595.779	751.338	1.173.249	91.243
2050	Percent. 5%	1.319.460	1.723.707	2.218.068	2.566.491	2.894.386	3.528.909	503.201
	Valor medio	1.836.531	2.358.034	2.987.197	3.415.651	3.785.083	4.408.717	686.546
	Percent. 95%	2.441.692	3.100.970	3.860.977	4.327.475	4.681.442	5.321.630	897.102
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	4.318.859	5.522.396	6.747.788	7.495.083	8.067.562	8.961.645	1.580.413
	Valor medio	5.794.340	7.142.778	8.412.878	9.062.481	9.609.872	10.530.465	2.041.636
	Percent. 95%	7.288.038	8.650.442	9.870.150	10.582.880	11.122.844	11.941.891	2.486.663
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	5.725.095	7.650.020	9.559.048	10.814.587	11.886.896	13.346.511	2.175.715
	Valor Medio	7.423.302	9.454.933	11.669.135	12.910.614	13.622.714	14.298.826	2.710.114
	Percent. 95%	8.938.770	11.215.947	13.244.060	14.127.527	14.298.826	14.298.826	3.165.651

Estas cantidades se verán incrementadas con los efectos del cambio climático, de tal forma que los 0,2 millones que se experimentan en el presente para eventos de periodo de retorno de 5 años se multiplicarán por más de 45, sobrepasando los 8,9 millones de USD anuales, en el peor de los

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

escenarios posibles, y que los 1,2 millones de un periodo de retorno de 500 años en la actualidad podrán multiplicarse por más de 10, llegando a 14,3 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%	605.088
	Valor medio	841.587
	Percent. 95%	1.116.408
2100 (RCP4.5)	Percent. 5%	4.724.911
	Valor medio	6.130.346
	Percent. 95%	7.482.166
2100 (RCP8.5)	Percent. 5%	7.671.858
	Valor medio	9.317.591
	Percent. 95%	10.955.301

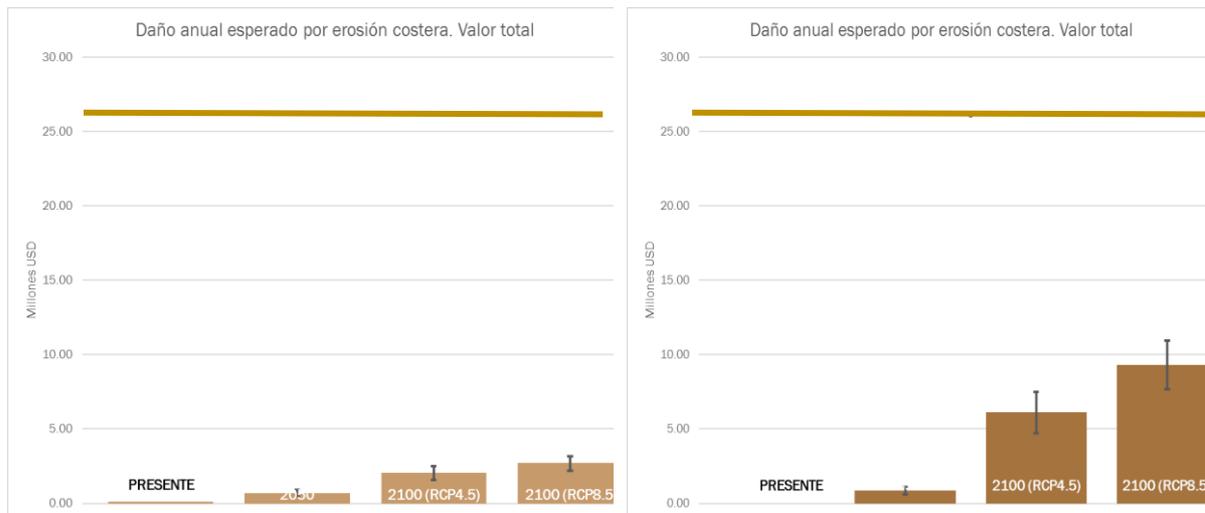


Figura 27. Daño anual esperado por erosión sobre el valor total de la playa (obtenido de los servicios de protección y recreativo proporcionados por la playa). La figura de la izquierda representa el daño por eventos extremos de erosión, mientras que la figura de la derecha el daño por el retroceso estructural.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

El daño anual esperado, actualmente en el entorno de los 90.000 USD anuales, se multiplicará por 7 para el año 2050 (hasta los 690.000 USD anuales) y al menos se multiplicará por 16 el año 2100 (1,5 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 la Aguada debido al ANMM (Tabla 11) añadirá

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

un daño extra que se prevé alcance los 0,8 millones de USD anuales en 2050 y que variará entre los 4,7 y los 10,9 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, duplicando en 2050 y triplicando en el horizonte de 2100 las consecuencias debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 6,17 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 7,41 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 5,17 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 23,52 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 30,75 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

5 CONCLUSIONES

La Playa de la Aguada es una playa abierta ubicada entre los balnearios de La Paloma y La Pedrera, aproximadamente 2 kilómetros al norte del centro de La Paloma (Intendencia de Rocha). Es una playa de aproximadamente 5.000 metros de longitud, abierta al Océano Atlántico, confinada en su extremo suroeste por el dique exterior del puerto, no teniendo sin embargo confinamiento desde el punto de vista de transporte de sedimentos en su extremo noroeste (en la zona de La Pedrera). Debido a la ubicación de la playa en la zona oceánica del Río de la Plata, en la zona de estudio actúan principalmente las dinámicas costeras.

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 playa tiene la forma en planta típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por el dique exterior del puerto de La Paloma.
- La anchura de la playa en la zona adyacente al puerto es sensiblemente menor que la anchura en la zona noroeste.
- Se observa en la zona de La Pedrera que la arena sobrepasa la punta, lo que señala la existencia de un transporte neto de suroeste a nordeste.
- El puerto, además actuar como una barrera a la llegada de la zona suroeste, provocó el giro de la playa.

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 de la Aguada 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 vista de los mapas de inundación, se podría considerar que, en el presente, las únicas zonas en riesgo potencial de inundación son las parcelas urbanizadas que bordean los arroyos en el frente de playa de la Costa Azul y de Antoniópolis.

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. La extensión de inundación producida en el presente para eventos de periodo de 500 años se alcanzará en 2050 para periodos de 25 años. Las extensiones de inundación de eventos de periodo de 500 años en el presente se darán en 2100 para el RCP4.5 con más frecuencia para periodos de 5 años y en el RCP8.5 para periodos de 5 años. Aunque la extensión inundada avanza poco, la frecuencia de los eventos aumenta considerablemente.

La afección de la inundación costera sobre la población es mínima, tanto para la situación presente como para los distintos escenarios futuros. En el presente se ven afectadas entre 20 y 25 personas, en función del periodo de retorno considerado, y en el futuro el número de personas afectadas puede aumentar hasta más de 75 en el peor escenario.

En el presente, se observan daños sobre los activos construidos relativamente reducidos, del orden de los 250.000 – 300.000 USD. Estos daños se verán incrementados en los distintos horizontes y escenarios futuros. De este modo, se podrán llegar a experimentar daños sobre los activos construidos por encima de los 300.000 USD en el 2100 cuando tengan lugar eventos de extremos con alta probabilidad de ocurrencia. Estos daños podrán alcanzar los 650.000 USD con eventos con muy baja probabilidad de ocurrencia. En el futuro, los daños que actualmente se sufren con eventos de baja probabilidad, sucederán con eventos mucho más frecuentes.

- Riesgo de erosión costera

Se ha estimado un valor total de protección de Playa de la Aguada igual a 4.775.000 USD anuales (137.669 USD anuales por hectárea), lo que sitúa a la playa en el puesto 30 (sobre 212) en el ranking de playas uruguayas en cuanto a su valor de protección (en cuanto a valor agregado y valor por hectárea).

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

El valor recreativo de la playa es de 21,4 millones de USD anuales (1.085.000 USD anuales por hectárea). Atendiendo a este resultado, la playa se sitúa en el puesto 90 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 64 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 26 millones de USD anuales, 1,2 millones de USD anuales por hectárea.

Se aprecia que el retroceso ligado al ANMM en el año 2050 se encuentra en un intervalo entre 9,78 y 13,07 metros, mientras que en el año 2100 (RCP8.5), la playa se erosionaría de entre 36,08 y 45,37 metros. La anchura promedio de playa erosionable es de 63,20 metros.

En 2050 se espera una pérdida permanente de la superficie de playa entre 56.923 y 77.320 m², mientras que en 2100 puede llegar hasta 242.210 m² (65% del total de la playa). Esta superficie erosionada de playa no es recuperable, salvo que se implementen medidas de adaptación.

Ante la falta de aportes y depósitos de arena, los temporales provocarán la erosión permanente de una parte importante de la playa de la Aguada, comenzando por la zona de la playa situada al Suroeste, más próxima al puerto. Mientras que, en el presente, un evento de 5 años de periodo de retorno

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA DE LA AGUADA

origina erosiones del 26% de la superficie de la playa; el mismo evento en el año 2100 RCP8.5 originaría un valor esperado de pérdida del 53% de la superficie de la playa, a sumar a la erosión permanente.

Además de esta variación en las consecuencias que se experimentarán por los efectos del cambio climático, la erosión estructural que sufrirá la Playa de la Aguada debido al ANMM (Tabla 11) añadirá un daño extra que se prevé alcance los 0,8 millones de USD anuales en 2050 y que variará entre los 4,7 y los 10,9 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, duplicando en 2050 y triplicando en el horizonte de 2100 las consecuencias debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 6,17 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 7,41 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 5,17 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 23,52 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 30,75 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.

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.

López Laborde, J. (2003). Caracterización y Diagnóstico del Litoral Costero sobre el Río de la Plata y el Océano Atlántico (Nueva Palmira a Chuy). Universidad de Mar del Plata. Informe Técnico Freplata A10.4b.