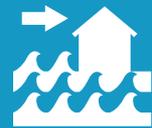


NAP Costas

Plan Nacional de
Adaptación Costera
de Uruguay

Documento preparatorio

Casos piloto. Playa Pascual(San José).





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. PLAYA PASCUAL (SAN JOSÉ)

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 Pascual. Departamento de San José. Fuente: Daniel Stonek (Wikipedia), bajo licencia CC BY 3.0.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Resumen Ejecutivo | 3 |
| Antecedentes | 7 |
| 1. Características de la zona piloto..... | 8 |
| 1.1. Descripción general | 8 |
| 2. Clima marítimo en la zona de estudio..... | 11 |
| 2.1. Dinámicas históricas | 11 |
| 2.2. Dinámicas futuras..... | 14 |
| 3. Riesgo de inundación costera..... | 16 |
| 3.1. Exposición..... | 16 |
| 3.1.1. Exposición socioeconómica | 16 |
| 3.1.2. Exposición física..... | 19 |
| 3.2. Peligrosidad | 20 |
| 3.2.1. Mapas de inundación | 20 |
| 3.3. Riesgo | 25 |
| 3.3.1. Población afectada por inundación costera | 26 |
| 3.3.2. Daños sobre activos construidos debidos a inundación costera | 29 |
| 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 | 33 |
| 4.2.1. Retroceso de la línea de costa..... | 33 |
| 4.3. Riesgo | 38 |
| 5. Conclusiones..... | 41 |
| 6. Referencias..... | 44 |

RESUMEN EJECUTIVO

DESCRIPCIÓN

- Playa Pascual es una playa semi-urbana situada en la costa de Playa Pascual, en Ciudad del Plata, en el Departamento de San José, aproximadamente a 9 kilómetros al noroeste de la desembocadura del río Santa Lucía.
- Es una playa sensiblemente rectilínea de unos 7.000 metros de longitud, cuya estabilidad está condicionada por la continuidad del transporte de sedimentos en la unidad fisiográfica.
- La playa tiene como elemento más característico una zona donde se produce un retranqueo de la línea de costa, aumentando este hecho el ángulo de incidencia del oleaje y aumentándose la capacidad de transporte.
- La mayor capacidad de transporte provoca que la arena en esa zona no sea estable, por lo que se construyeron en el pasado una serie de espigones transversales.

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 playa se enmarca en una unidad fisiográfica amplia y compleja al estar bajo la influencia del estuario del río de la Plata y recibir aportes importantes de sedimentos de otros ríos situados al Este. La hidrodinámica de la zona es igualmente compleja.
- De la observación de imágenes de satélite se infiere que la playa tiene un balance neto de sedimentos positivo. La construcción de un espigón en la central térmica de punta del Tigre así lo corrobora.

DINÁMICAS ACTUALES

- La zona de estudio se localiza en la zona intermedia del estuario del Río de la Plata, caracterizada por una dinámica fluvial de comportamiento cuasi-bidimensional con influencia de las mareas.
- En esta zona del estuario el oleaje está muy condicionado por el efecto del fondo.
- Los oleajes más frecuentes y energéticos son los que provienen del sector direccional 135°-180°.
- La altura de ola asociada al percentil 50% menor a 1 metro, y la altura de ola asociada al percentil 95% igual a 1,85 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 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°. 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:

- La zona más expuesta e igualmente más afectada por la inundación es el barrio Autódromo, en la zona sureste de la zona de estudio.
- En 2050 la superficie inundada por un evento con cota de inundación $Tr=100$ años tiene una extensión similar a la producida en el presente por un evento con cota de inundación $Tr=500$ años. La superficie inundada por eventos de $Tr=500$ años en el presente se alcanza en 2100 para el $Tr=10$ años en el RCP4.5 y para el $Tr=5$ años en el RCP8.5. Mostrando así también la influencia de la mitigación.
- En el presente, el conjunto de personas afectadas puede alcanzar la centena para periodos de retorno de más de 100 años, reduciéndose a menos de 50 personas para periodos de retorno por debajo de los 10 años.
- En el futuro y para los eventos con periodo de retorno por encima de 25 años, la población afectada se duplicará.
- En el horizonte de 2100, se verán afectadas por eventos relativamente frecuentes (5 años de periodo de retorno) tantas personas o más como en el presente resultan afectadas por eventos extremos de periodo de retorno de 500 años.
- Para el caso de los activos construidos, ante eventos de periodo de retorno bajo (5 años), los daños que se experimenten pueden duplicarse (año 2050) o estar cerca de multiplicarse por 10 en el caso del peor escenario posible y de cara a fin de siglo (año 2100).



EROSIÓN

Del análisis de riesgo por erosión costera:

- El principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, suponiendo prácticamente el 85% del valor total. El valor total de la playa se estima en más de 2,2 millones de USD anuales, 75.300 USD anuales por hectárea.
- Se aprecia que un evento de erosión de 5 años de periodo de retorno en el presente origina una pérdida del 9% de la superficie de playa, mientras que un evento con la misma probabilidad de ocurrencia en el año 2100 originaría una pérdida esperada del 48% de la superficie en el peor escenario.
- Además, debido al retroceso estructural de la línea de costa, se perderán de forma permanente entre 6,7 y 8,9 metros de playa en 2050, y entre 16 y 30 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 Playa Pascual (Ciudad del Plata), uno de los casos piloto considerados para la Intendencia de San José a propuesta de los departamentos competentes en la gestión de playas.

En los talleres celebrados en Montevideo (2017) los agentes locales extrajeron las siguientes conclusiones acerca de la problemática existente en la intendencia de San José:

- Zona con muchas barrancas
- Paradores afectados con erosión. En concreto, el parador Chico Kiyu se encuentra especialmente afectado por la erosión.

En los talleres se proponen una zona concreta de San José para el estudio piloto: **tramo de Ciudad del Plata – Playa Pascual**. Es una zona con balnearios turísticos y muy poblada. Existe una zona crítica por el mal estado de los diques en la desembocadura del río.

Los departamentos competentes en la gestión son el Departamento de Planificación y el Departamento de Gestión Ambiental.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA PILOTO

1.1. Descripción general

La zona de estudio es Playa Pascual, en el Departamento de San José. Es una playa semi-urbana ubicada en la costa de Playa Pascual, en Ciudad del Plata, aproximadamente a 9 kilómetros al noroeste de la desembocadura del río Santa Lucía. La playa tiene aproximadamente 7.000 metros de longitud.

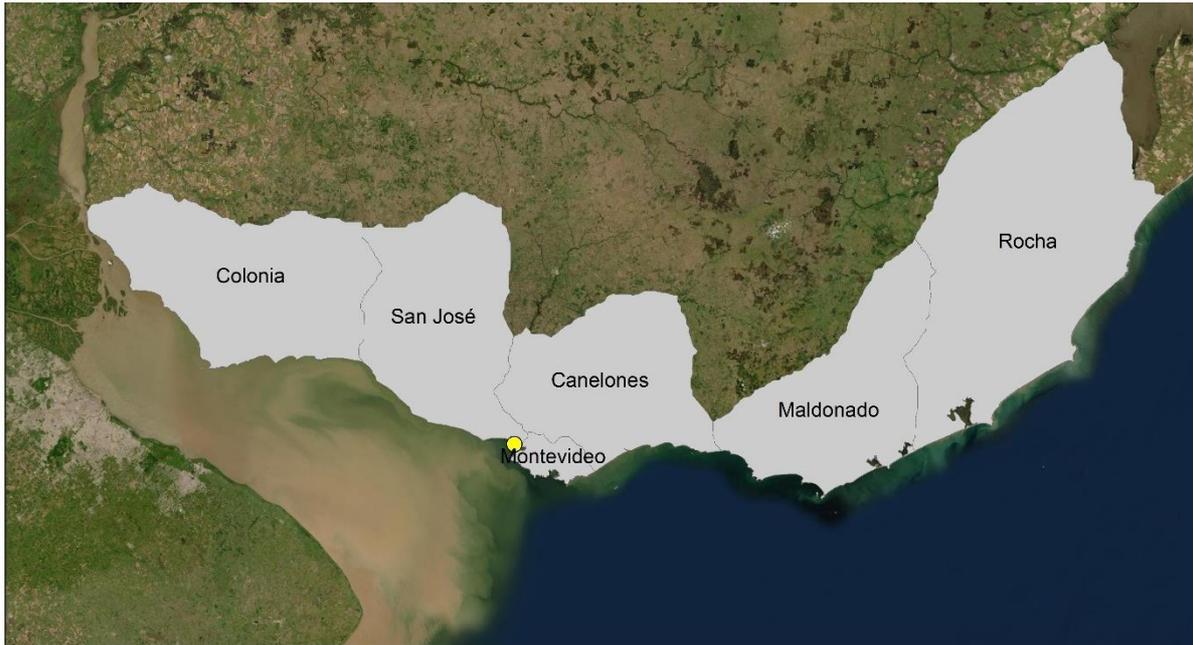


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Playa Pascual, San José).

Principales elementos morfológicos

Desde el punto de vista morfodinámico, la playa existente es una playa abierta y sin confinamientos en sus extremos. Tiene como elemento más característico una zona donde se retranquea la línea de costa, y, por lo tanto, aumenta el ángulo de incidencia del oleaje, aumentando así su capacidad de transporte. Esa mayor capacidad de transporte en dicha zona respecto a sus zonas aledañas daba lugar a que en ocasiones la playa haya desaparecido, por lo que se procedió a construir una serie de espigones transversales en la zona.

En la desembocadura del río Santa Lucía se construyó entre los años 2006 y 2010 la central de la Punta del Tigre, y desde 2016 hasta 2019 se dispuso un espigón que suponía una barrera total al paso de arenas este-oeste.

Fuentes y sumideros de sedimento

Playa Pascual se enmarca en una unidad fisiográfica mucho más amplia y compleja, el estuario del Río de la Plata, y recibe aportes de sedimentos del río Santa Lucía, que desemboca en el entorno local de la playa. No se tiene información sobre la magnitud de los aportes del río y su evolución en los últimos años por lo que a efectos de este informe no se tendrá en cuenta el aporte de sedimento del río.



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

Evolución histórica

En las imágenes siguientes se puede comparar la situación del espigón en 2018 (Figura 3) con la situación del espigón en 2016 (Figura 4), y se puede observar la acumulación de arena en el espigón, que evidencia que el transporte anual medio en esa zona es de este a oeste.

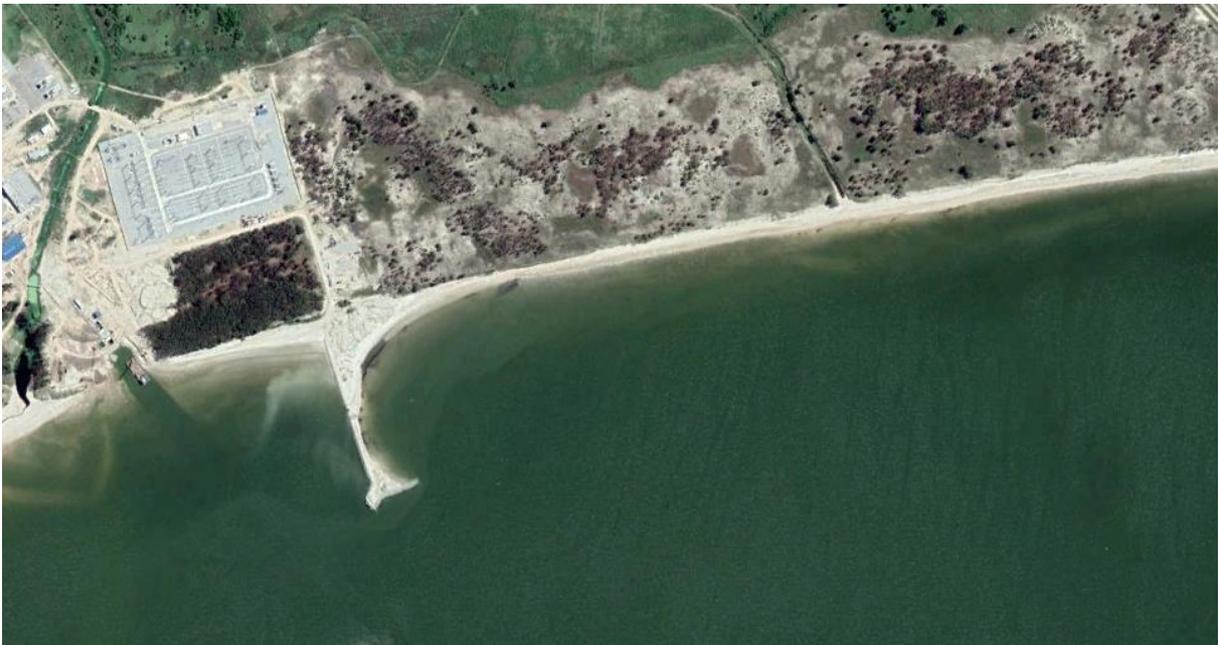


Figura 3. Situación del espigón de la central de Punta del Tigre en 2018 (Fuente: Google Earth).

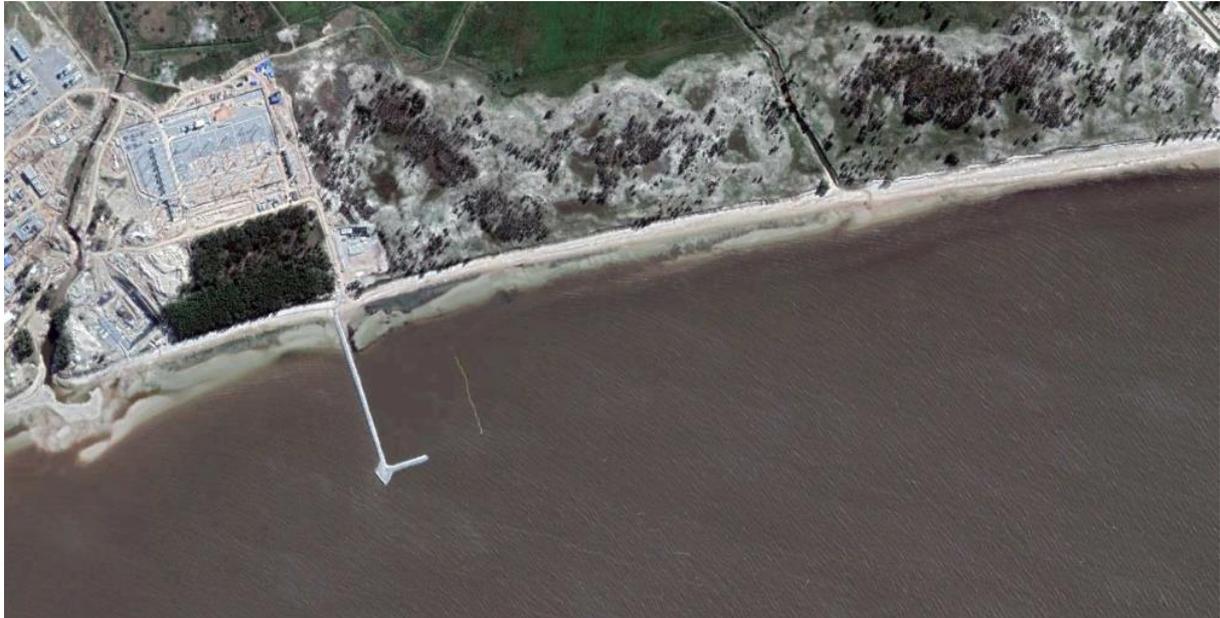


Figura 4. Situación del espigón de la central de Punta del Tigre en 2016 (Fuente: Google Earth).

En base a las imágenes de satélite se ha estimado un volumen de transporte longitudinal de sedimento en la zona. Como se puede observar en las imágenes, se produjo una acumulación de arena en el espigón de aproximadamente 13.816 m^2 en 2 años. Asumiendo una profundidad de cierre de 3,9 metros y una berma de 1,4 metros, se ha estimado un volumen de arena acumulado en el espigón en 2 años igual a 73.224 m^3 . Esto supone una tasa anual de transporte longitudinal de $36.612 \text{ m}^3/\text{año}$.

Diagnóstico inicial

Un diagnóstico inicial conduce a concluir que Playa Pascual es una playa sensiblemente rectilínea cuya estabilidad está condicionada por la continuidad de sedimento en la unidad fisiográfica. La capacidad de transporte en algunas zonas de la playa no es estable, por lo que se construyeron una serie de espigones transversales. Durante el periodo 2016 – 2018 el espigón de la central térmica suponía una barrera total al paso de sedimento este – oeste.

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 Pascual (San José) se localiza en la zona intermedia del estuario del Río de la Plata (Figura 5), caracterizada por una dinámica fluvial de comportamiento cuasi-bidimensional con influencia de las mareas (Fossati et al., 2014).



Figura 5. 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 7, Figura 8 y Figura 9) del Atlas Climático generado dentro del proyecto (IHCantabria, 2019a). Se ha escogido el punto más cercano a Playa Pascual (punto 41, Figura 6). La profundidad en este punto es de aproximadamente 6 metros.



Figura 6. Localización del punto del Atlas más cercano a Playa Pascual.

Como se comentaba anteriormente, Playa Pascual es una playa abierta y sin confinamientos, desde el punto de vista de transporte de sedimentos, en sus extremos. Tiene como elemento más característico una zona donde se retranquea la línea de costa y, por tanto, aumenta el ángulo de incidencia del oleaje. En esta zona del estuario el oleaje está muy condicionado por el efecto del fondo. Los oleajes más frecuentes y energéticos son los que provienen del sector direccional 135°-180° (Figura 7). Las alturas de ola son pequeñas, siendo la altura de ola asociada al percentil 50% menor a 1 metro, y la altura de ola asociada al percentil 95% igual a 1,85 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.

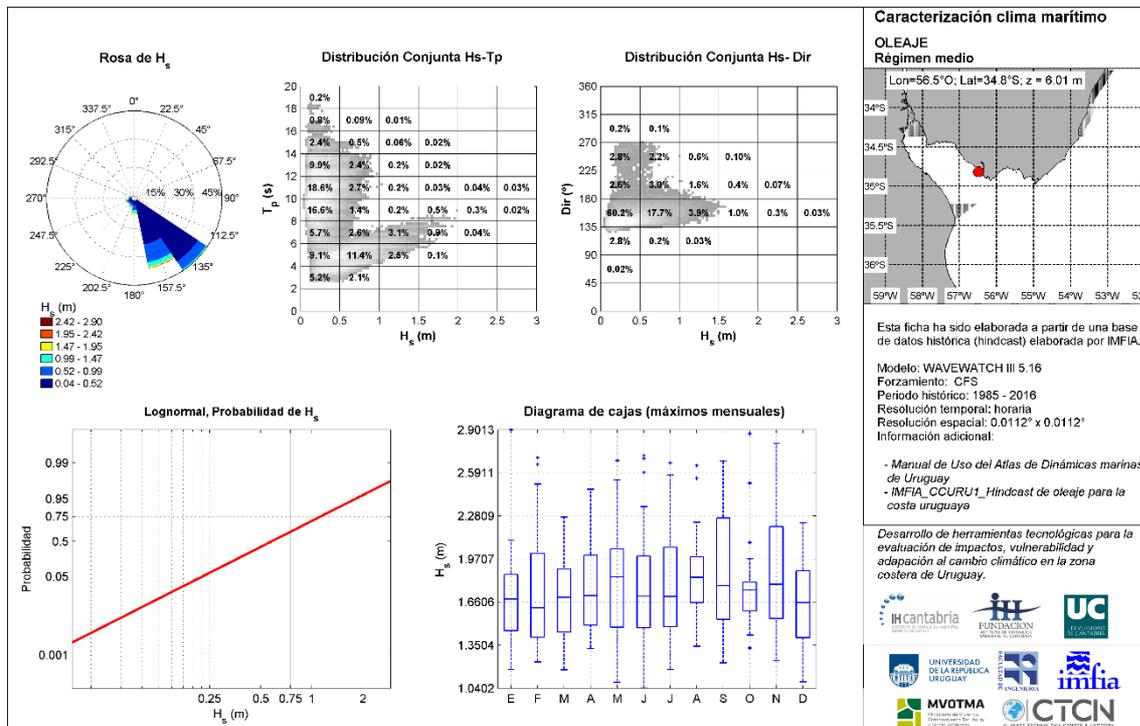


Figura 7. Caracterización del régimen medio de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

En la Figura 8 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 15 centímetros.

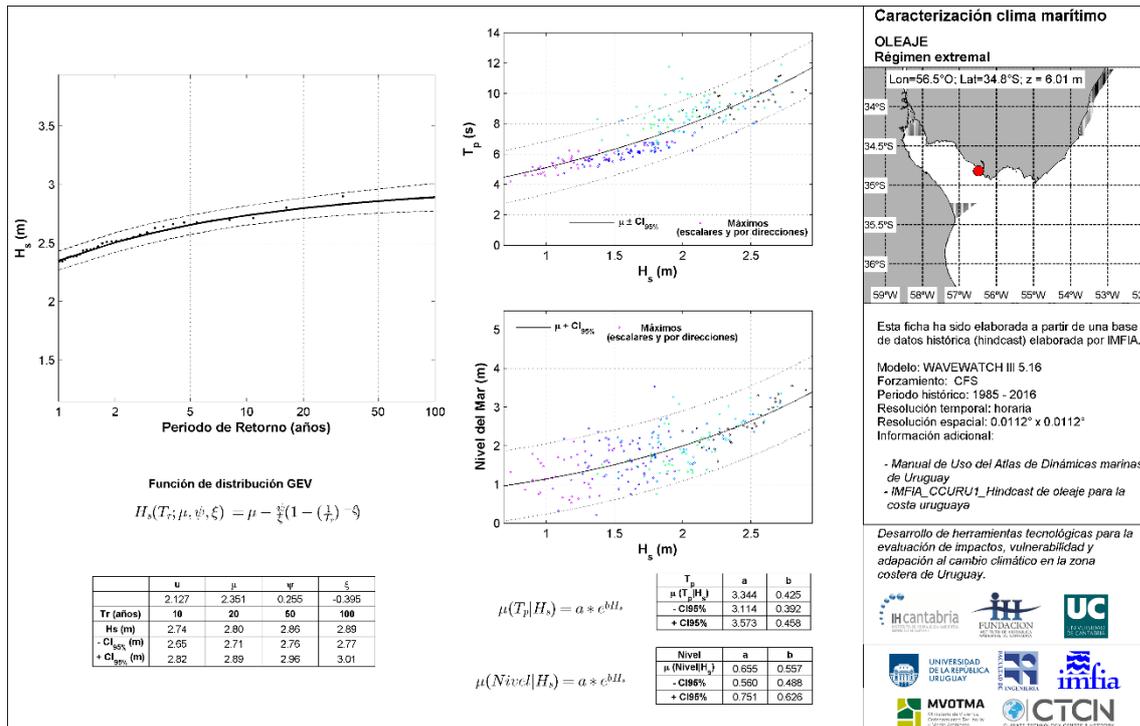


Figura 8. Caracterización del régimen extremal de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

En la tercera ficha (Figura 9) 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 [292,5° - 337,5°] y [112,5° - 157,5°]. Las corrientes provenientes del noroeste y del sudeste tienen una intensidad de hasta 0,8 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 35 centímetros, 20 centímetros mayor que la diferencia entre las alturas de ola asociadas a los mismos periodos de retorno (15 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.

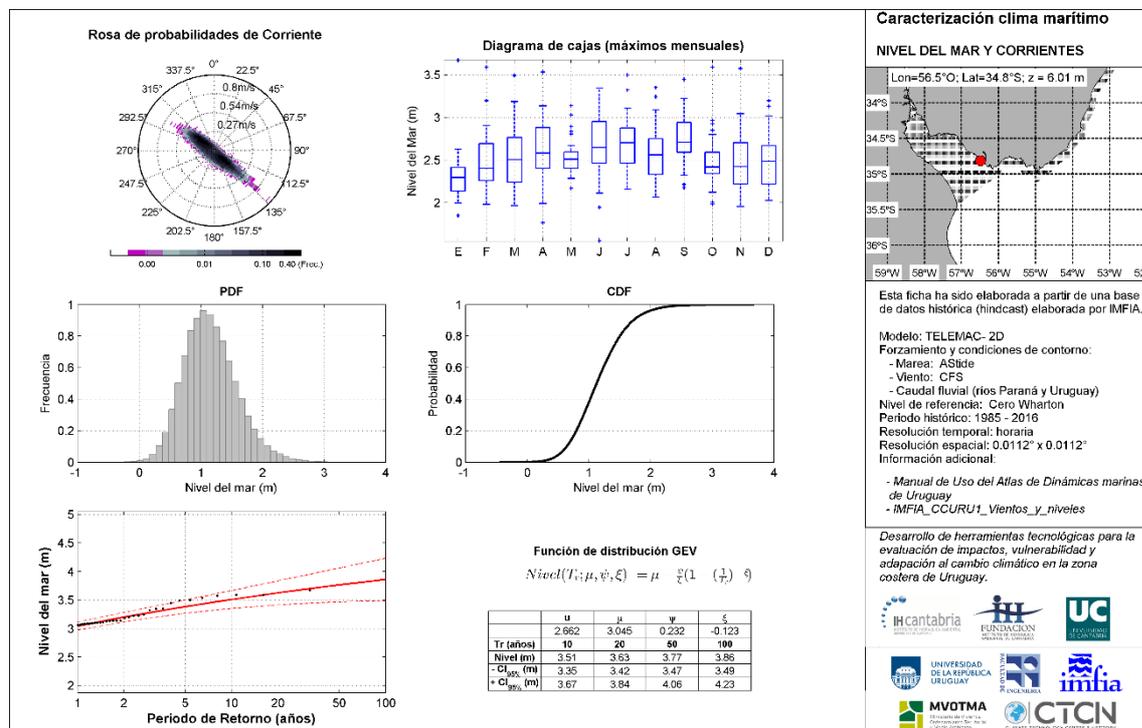


Figura 9. Caracterización del nivel del mar y corrientes en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

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 Hs 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 Tp 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.

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.

Las edificaciones existentes en la zona, como se comprueba en la Figura 9, son mayoritariamente de una única altura, con una alta dispersión en las parcelas catastrales. Es decir, no existe una alta densidad de edificaciones en la zona.



Figura 10. Edificaciones existentes en Playa Pascual (Fuente: Google).

La Figura 11 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 12 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.

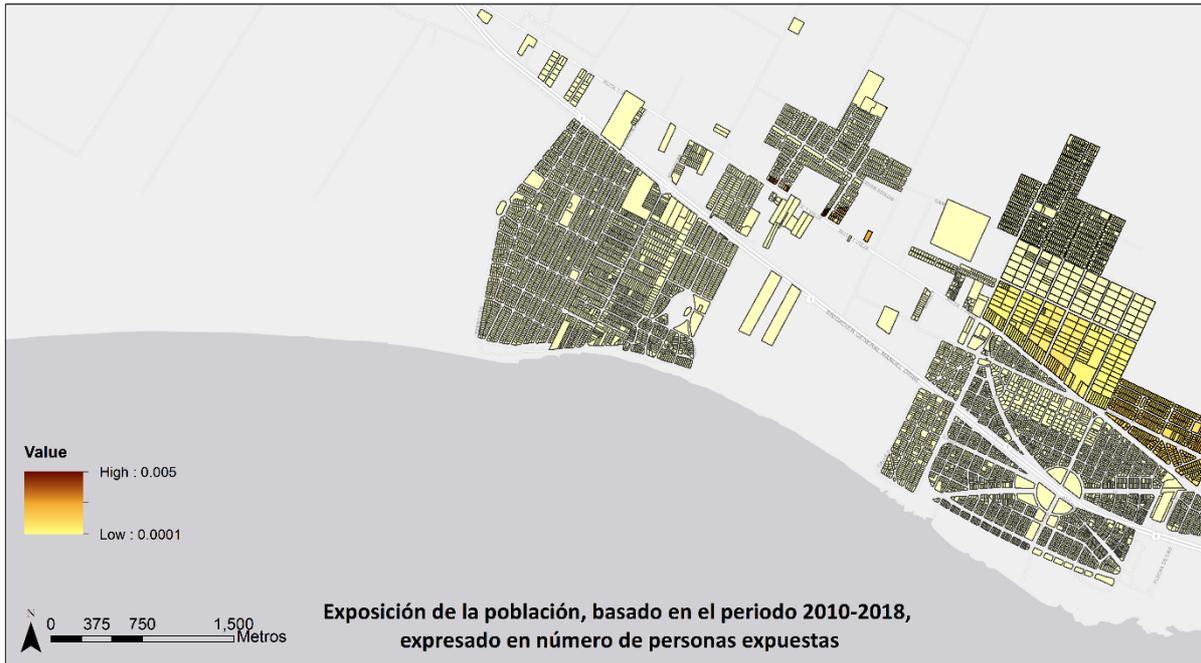


Figura 11. Mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m².

En la Figura 11 se puede observar que según los datos del Censo existe una baja densidad de población en toda la zona de estudio, tanto en la zona más situada al noroeste (Playa Pascual) como en la zona situada al sureste (Autódromo). En esta segunda zona, la densidad aumenta ligeramente al otro lado de la carretera Ruta 1 –Brigadier General Manuel Oribe.

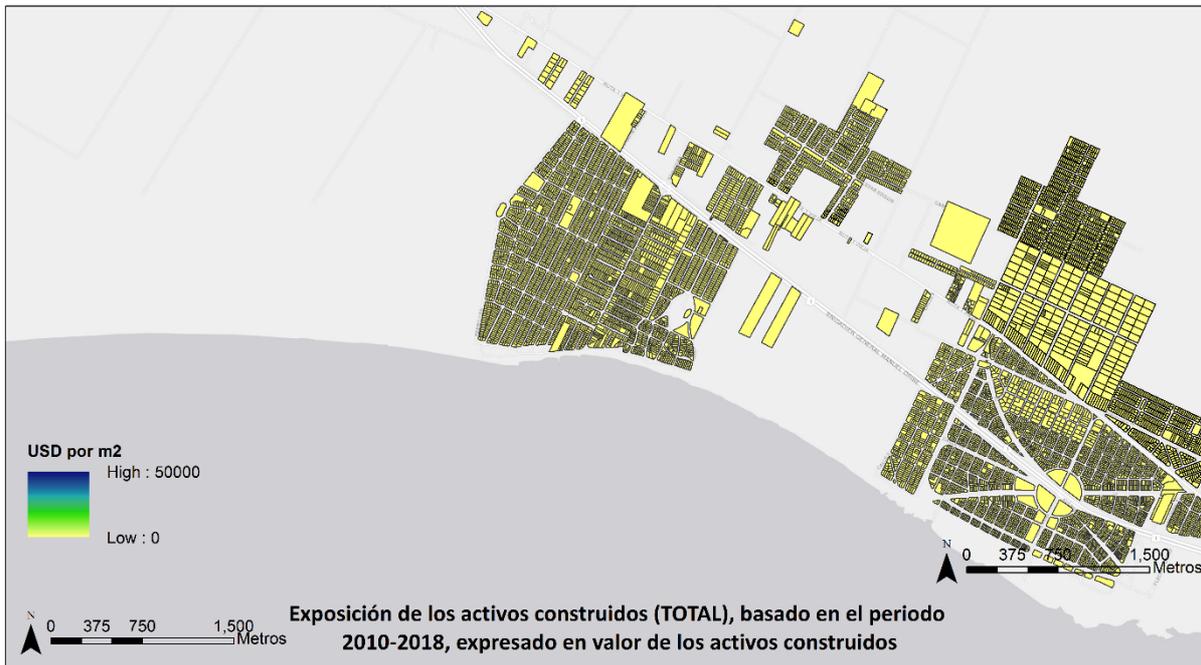


Figura 12. Mapa del valor de exposición del stock construido (total), basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de USD por m².

En la Figura 12 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, sino que más bien se trata de edificaciones de escaso valor económico.

En el caso de Playa Pascual y Ciudad del Plata, es importante destacar que los datos disponibles han limitado el alcance de los resultados. La definición actual de las parcelas catastrales incluye muchas en las que no existen edificaciones de ningún tipo, y muchos de los viales planificados aún no se encuentran construidos (Figura 13).

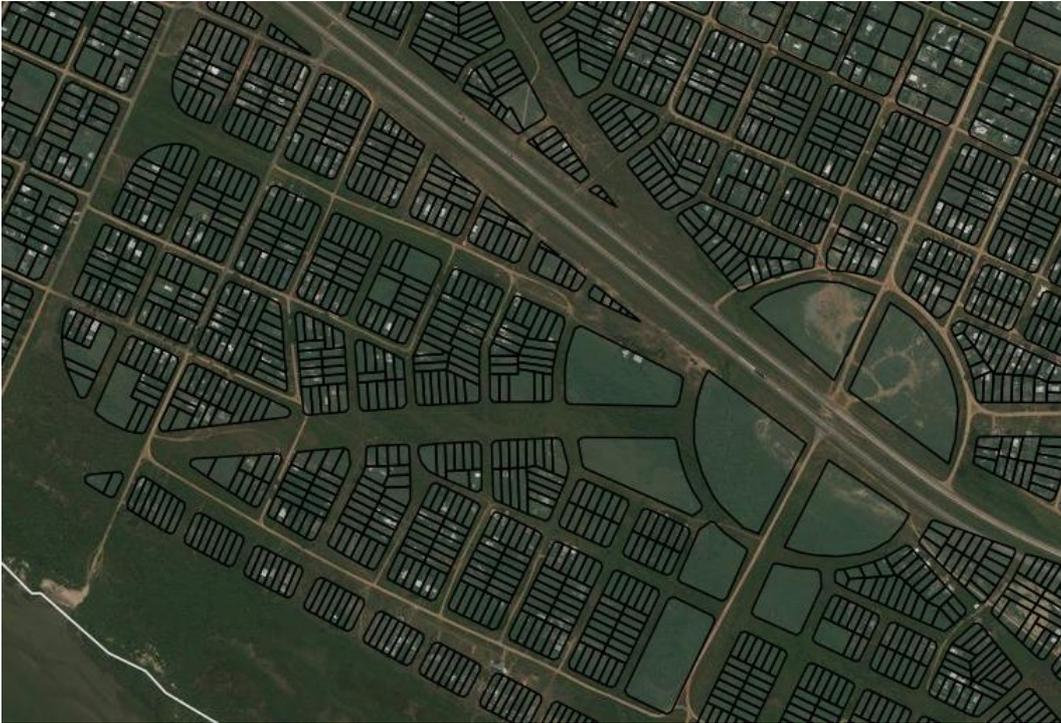


Figura 13. Detalle de las parcelas catastrales en el barrio de Autódromo, en Ciudad del Plata (San José) (Fuente: visualizador MVOTMA).

Esta existencia de parcelas catastrales “vacías” afecta significativamente al proceso de desescalado, pues asigna población y valor económico de los activos construidos en zonas donde actualmente no hay edificaciones ni residentes alguno.

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 de la zona de estudio. Como se puede observar en la Figura 14, la zona sur de Autódromo, cercana a la desembocadura, está construida sobre terrenos con cota inferior a 4 metros (terreno sombreado en verde). Se puede apreciar en la figura cómo a partir de la ruta 1 los terrenos de Autódromo tienen cotas entre 4 y 8 metros (terreno sombreado en naranja y marrón). Por otro lado, se puede observar en la figura que Playa Pascual está construido sobre terrenos más altos, con cotas superiores a 4 metros en la zona más cercana a la costa.

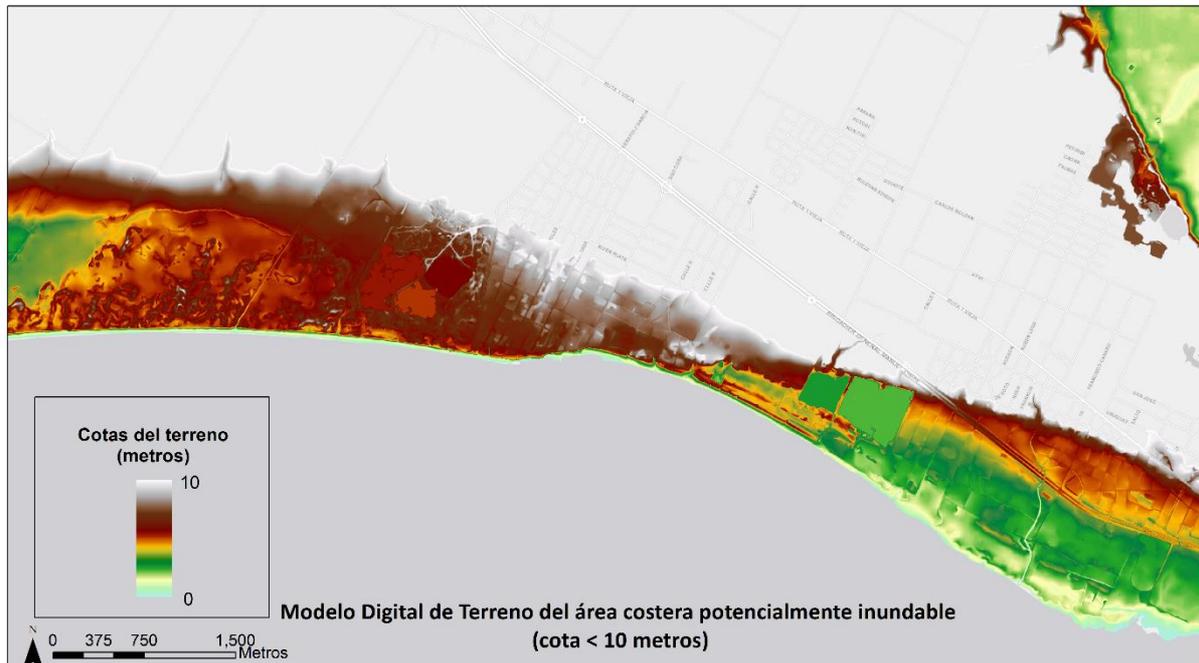


Figura 14. Modelo Digital de Terreno del área potencialmente inundable de la zona de estudio (Fuente: IDEUy).

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 con riesgo potencial de inundación, en el presente y en el futuro, para distintos niveles de amenaza: cota de inundación con probabilidad de ocurrencia alta ($Tr= 5$ y 10 años), media ($Tr= 25$ y 50 años), baja ($Tr= 100$ años) o muy baja ($Tr= 500$ años). Se muestra también la inundación asociada a condiciones medias de oleaje y marea.

En el **presente** (Figura 15), se puede observar que la inundación se propaga principalmente en la zona sur de Autódromo. Como se mencionaba anteriormente, esta zona está construida sobre terrenos más. Para los eventos de mayor ocurrencia ($Tr=5$ y 10 años) el agua alcanza la Rambla Costanera e inunda varias parcelas ubicadas al sur de Autódromo. Para eventos de menos probabilidad de ocurrencia, con mayor cota de inundación, la extensión de la inundación aumenta considerablemente, que avanza hacia la ruta 1. En el caso del evento con cota de inundación de periodo de 500 años la extensión de la inundación no llega a alcanzar la ruta 1 Brigadier General Manuel Oribe. No se aprecia inundación en la zona de Playa Pascual. Se observa que para una amenaza con probabilidad muy baja

(Tr = 500 años) de ocurrencia, la extensión de la zona inundable ($1.200.928 \text{ m}^2$) es un 45% mayor respecto al evento de Tr=25 años (827.744 m^2).

En vista de los mapas de inundación, la zona susceptible de inundación en el presente es el área comprendida entre la costa y la ruta 1.

En **2050** (Figura 16), y en ausencia de adaptación, para los mismos periodos de retorno evaluados en el presente, la extensión de la inundación es mayor. Como se puede observar en la figura, en 2050 la superficie inundada por un evento con cota de inundación Tr=100 años tiene una extensión similar a la producida en el presente por un evento con cota de inundación Tr=500 años. En 2050, el evento con cota de inundación Tr=500 años en la superficie inundada alcanzada un mayor número de parcelas que el mismo evento en el presente. En 2050, la superficie inundable asociada al evento Tr=100 años ($1.327.088 \text{ m}^2$) alcanza la superficie inundable asociada al evento Tr=500 años en el presente. Asimismo, la superficie inundable asociada al Tr=500 años en 2050 ($1.485.056 \text{ m}^2$) 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 mucho mayor superficie de inundación en 2050 que en el presente.

En **2100** se puede observar que, tanto para el RCP4.5 (Figura 17) como para el RCP8.5 (Figura 18), una superficie importante comprendida entre la costa y la ruta 1 de Autódromo es susceptible a inundación (Tr=5 años). Para el RCP8.5 la extensión de la superficie inundada por los eventos de mayor ocurrencia, Tr=5 años, aumenta considerablemente en comparación con la superficie inundada por los mismos eventos para el RCP4.5. En la Figura 18 (2100, RCP8.5) se aprecia claramente el límite entre el terreno con cota inferior y cota superior a 3 – 4 metros en el que se encuentra la ruta 1 Brigadier General Manuel Oribe.

En vista de los mapas de inundación en 2050 y 2100, la zona de Autódromo al norte de la ruta 1 y Playa Pascual no son susceptibles a inundación. Por otro lado, la zona de Autódromo comprendida entre la costa y la ruta 1 será más susceptible a inundación en el futuro debido al aumento de intensidad de los temporales. En particular, la franja costera de Autódromo hasta la altura de la calle 10 es zona potencialmente inundable en eventos con probabilidad muy alta de ocurrencia (cota de inundación Tr=5 años).

En términos de extensión de la superficie inundada, en 2100 y para el RCP4.5 el evento con Tr=10 años ($1.150.288 \text{ m}^2$) tiene la superficie inundable más cercana al evento Tr=500 años en el presente ($1.200.928 \text{ m}^2$). 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 ($1.277.126 \text{ m}^2$).

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.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA PASCUAL

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 50 para el RCP4.5 y de 100 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 | 5.360 | 23.360 | 28.944 | 34.672 | 59.952 | 75.696 | 91.888 | 90.096 | 113.952 | 137.728 |
| Tr=5 | 631.216 | 742.736 | 769.712 | 802.704 | 911.648 | 969.968 | 1.048.112 | 1.035.328 | 1.277.216 | 1.434.768 |
| Tr=10 | 714.192 | 844.304 | 876.032 | 904.192 | 1.016.000 | 1.150.288 | 1.358.976 | 1.345.424 | 1.450.544 | 1.523.968 |
| Tr=25 | 827.744 | 950.816 | 983.696 | 1.018.016 | 1.329.376 | 1.421.344 | 1.481.760 | 1.475.808 | 1.541.120 | 1.605.760 |
| Tr=50 | 896.272 | 1.032.032 | 1.094.128 | 1.188.864 | 1.433.984 | 1.492.416 | 1.538.000 | 1.533.328 | 1.593.040 | 1.681.088 |
| Tr=100 | 962.704 | 1.199.328 | 1.327.088 | 1.387.072 | 1.495.664 | 1.540.336 | 1.581.760 | 1.577.616 | 1.662.768 | 1.743.232 |
| Tr=500 | 1.200.928 | 1.455.216 | 1.485.056 | 1.510.384 | 1.585.392 | 1.646.016 | 1.706.368 | 1.702.160 | 1.777.568 | 1.825.776 |

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA PASCUAL

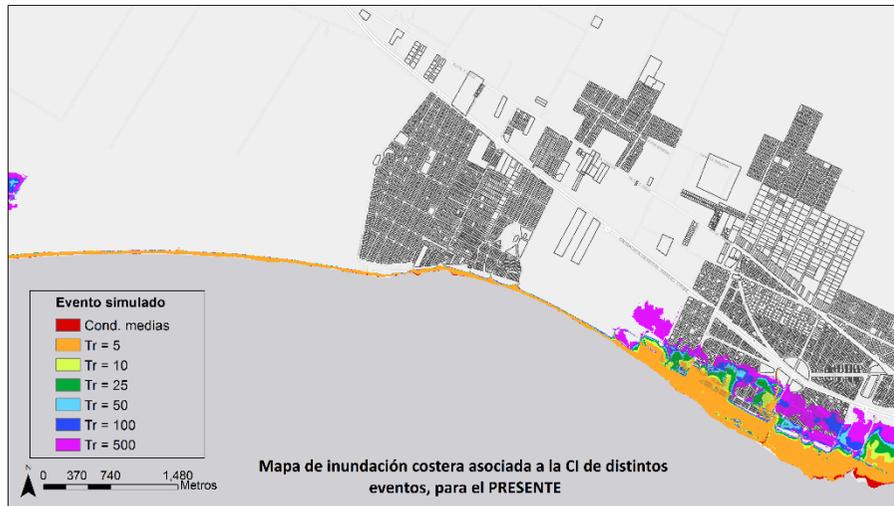


Figura 15. Inundación en el presente para distintos eventos.

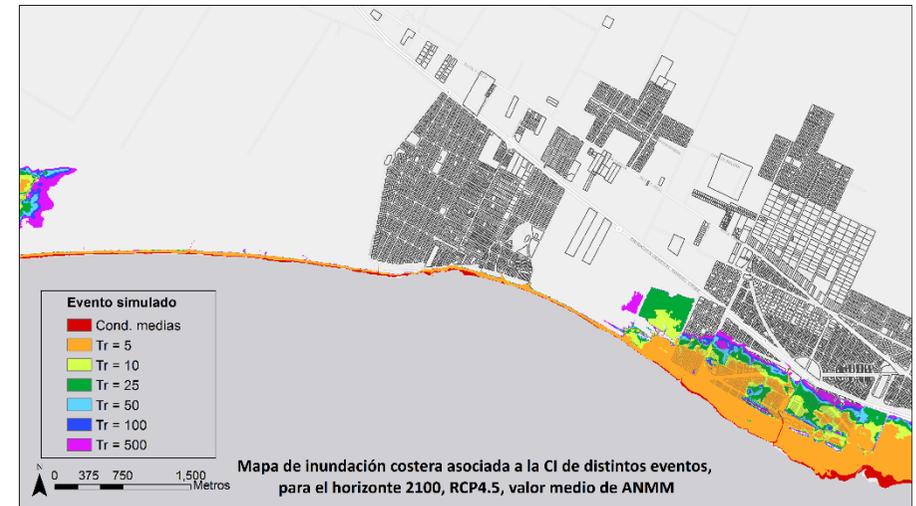


Figura 17. Inundación en 2100 (RCP4.5) para distintos eventos.

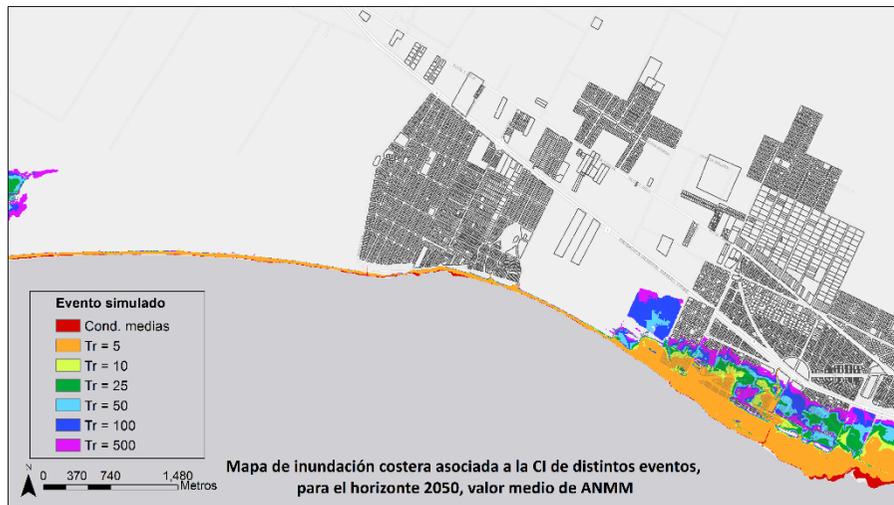


Figura 16. Inundación en 2050 para distintos eventos.

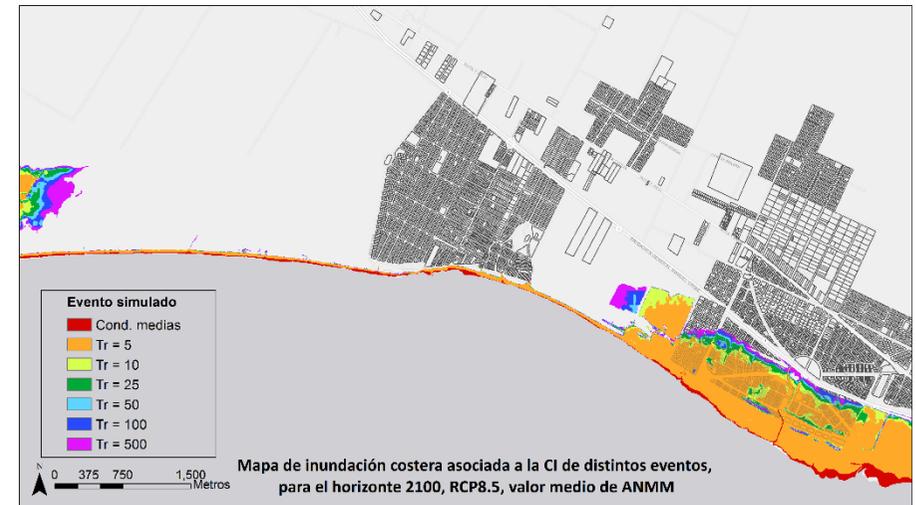


Figura 18. Inundación en 2100 (RCP8.5) para distintos eventos.

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) se observan diferencias en la extensión de la inundación en la zona de la reserva natural de Penino y al este de Autódromo, en el límite de la superficie inundada. La diferencia entre la superficie inundada producida con el ANMM medio y el percentil 5% y 95% es de 127.760 m² y 59.984 m², respectivamente. En 2100 (Figura 20) también se observan diferencias en la extensión de la superficie inundada en la reserva natural, y en la extensión de la inundación al sur de Autódromo, a la altura de la calle Cadillac. 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 85.152 m² y 80.464 m², respectivamente. La Tabla 2 recoge las diferencias entre las diferentes simulaciones realizadas.

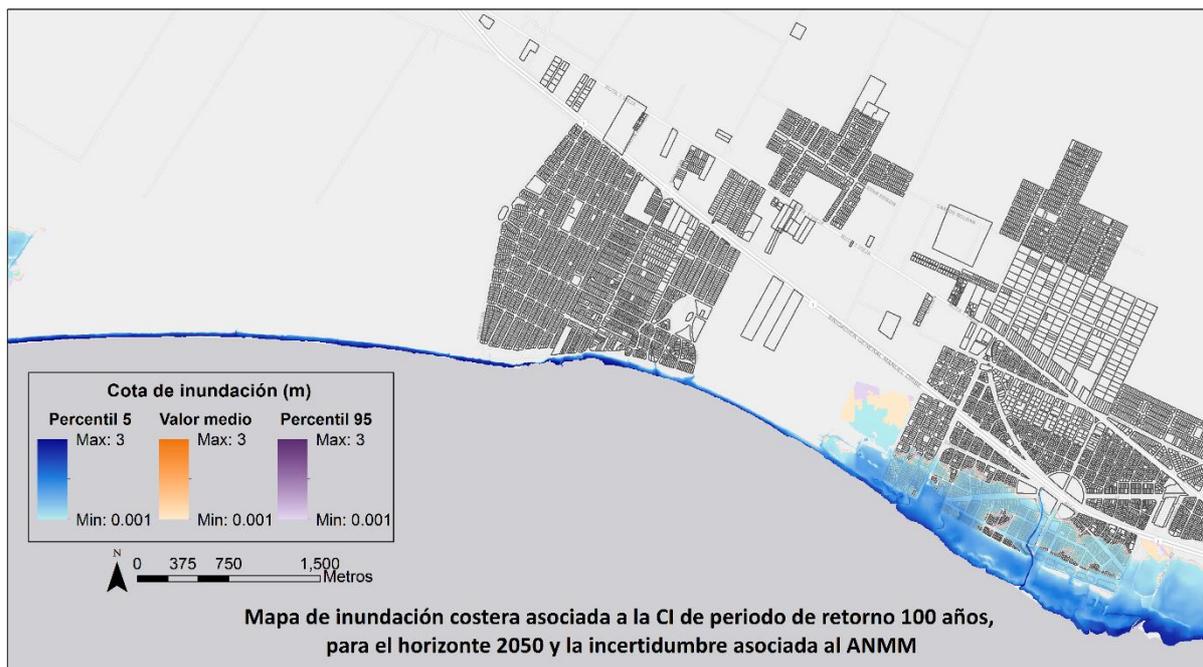


Figura 19. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2050.

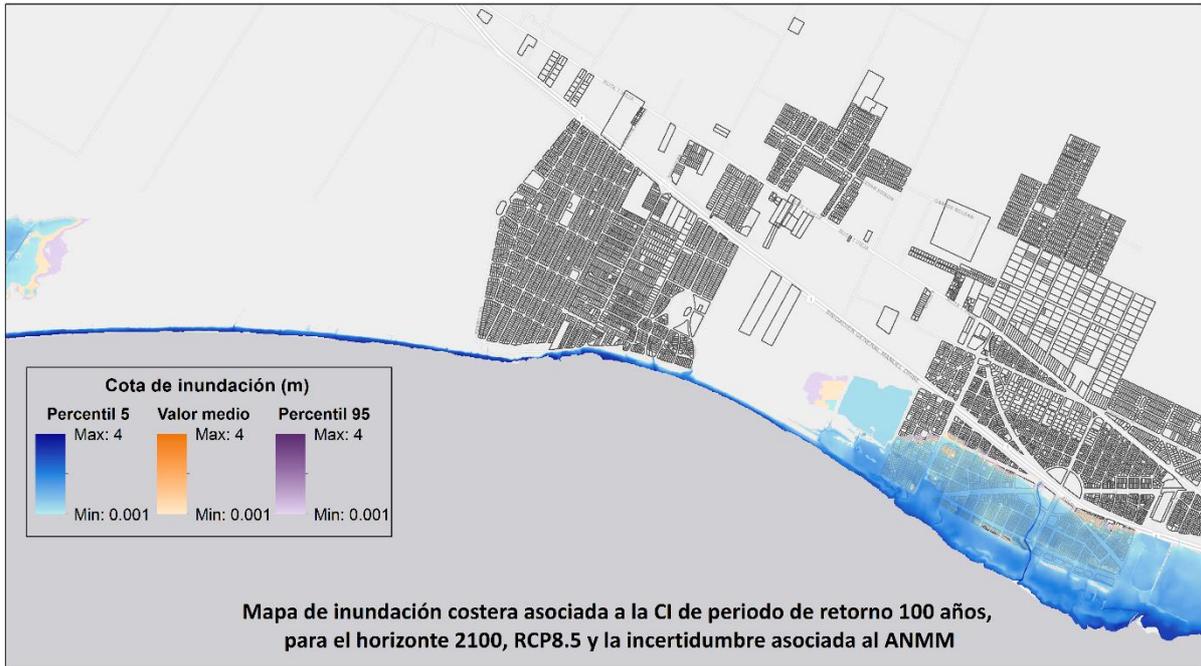


Figura 20. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2100 (RCP8.5).

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) | 1.199.328 | 1.327.088 | 1.387.072 | 1.577.616 | 1.662.768 | 1.743.232 |
| Cota máx (m) | 3,38 | 3,43 | 3,48 | 3,83 | 3,96 | 4,09 |

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.

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 | 15 | 35 | 79 | 95 | 104 | 114 | 11 |
| 2050 | Percent. 5% | 37 | 91 | 105 | 116 | 127 | 139 | 20 |
| | Valor medio | 38 | 93 | 107 | 118 | 130 | 143 | 21 |
| | Percent. 95% | 39 | 96 | 110 | 121 | 134 | 146 | 22 |
| 2100 (RCP4.5) | Percent. 5% | 117 | 121 | 127 | 139 | 146 | 153 | 36 |
| | Valor medio | 124 | 128 | 134 | 147 | 155 | 162 | 38 |
| | Percent. 95% | 132 | 137 | 143 | 157 | 165 | 172 | 41 |
| 2100 (RCP8.5) | Percent. 5% | 128 | 133 | 137 | 142 | 147 | 154 | 39 |
| | Valor medio | 143 | 147 | 152 | 158 | 163 | 171 | 44 |
| | Percent. 95% | 162 | 167 | 173 | 179 | 186 | 194 | 50 |

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 | 16 | 37 | 83 | 100 | 110 | 120 | 12 |
| 2050 | Percent. 5% | 39 | 96 | 110 | 122 | 134 | 146 | 22 |
| | Valor medio | 40 | 98 | 113 | 125 | 137 | 150 | 22 |
| | Percent. 95% | 41 | 101 | 116 | 128 | 141 | 154 | 23 |
| 2100 (RCP4.5) | Percent. 5% | 123 | 128 | 133 | 146 | 154 | 161 | 38 |
| | Valor medio | 130 | 135 | 141 | 155 | 163 | 170 | 40 |
| | Percent. 95% | 139 | 144 | 150 | 165 | 174 | 181 | 43 |
| 2100 (RCP8.5) | Percent. 5% | 135 | 140 | 144 | 150 | 155 | 162 | 42 |
| | Valor medio | 150 | 155 | 160 | 166 | 172 | 180 | 46 |
| | Percent. 95% | 171 | 176 | 182 | 189 | 196 | 205 | 52 |

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, residentes del barrio Autódromo (el más afectado por las inundaciones costeras) puede alcanzar la centena para periodos de retorno de más de 100 años, reduciéndose a menos de 50 personas para periodos de retorno por debajo de los 10 años.

En los escenarios futuros, sin embargo, la afección sobre la población se prevé que aumente considerablemente, especialmente para periodos de retorno reducidos. Así, en el horizonte de 2100, se verán afectadas por eventos relativamente frecuentes (5 años de periodo de retorno) tantas personas o más 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.

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.

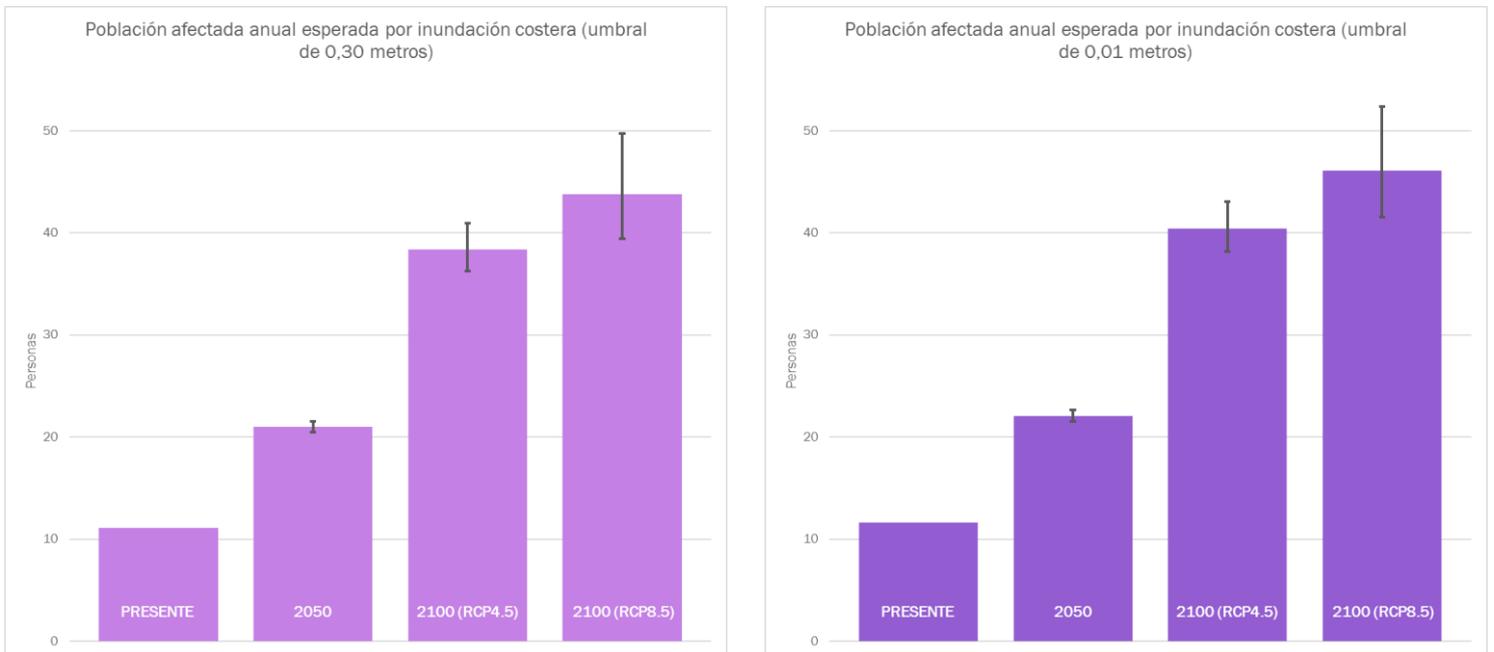


Figura 21. Riesgo de inundación sobre la población, expresado como población anual esperada en número de personas afectadas. A la izquierda, personas afectadas con más de 30 centímetros de altura de agua. A la derecha, personas afectadas con más de 1 centímetro de altura de agua.

Del análisis de estas figuras y de las tablas anteriores, se concluye principalmente 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 cuadruplicarlo en el horizonte de 2100.

Es de nuevo importante aquí recordar las posibles imprecisiones que el proceso de desescalado seguido puede haber introducido por la existencia en los datos catastrales oficiales utilizados de un número elevado de parcelas catastrales no habitadas.

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 | 131.475 | 304.036 | 682.026 | 819.384 | 902.239 | 986.062 | 95.680 |
| 2050 | Percent. 5% | 320.750 | 787.445 | 907.049 | 999.495 | 1.100.562 | 1.202.811 | 177.099 |
| | Valor medio | 328.687 | 806.932 | 929.496 | 1.024.230 | 1.127.798 | 1.232.577 | 181.481 |
| | Percent. 95% | 336.857 | 826.989 | 952.600 | 1.049.689 | 1.155.831 | 1.263.215 | 185.992 |
| 2100 (RCP4.5) | Percent. 5% | 1.008.908 | 1.047.712 | 1.094.277 | 1.202.928 | 1.265.015 | 1.319.341 | 313.631 |
| | Valor medio | 1.068.234 | 1.109.319 | 1.158.623 | 1.273.663 | 1.339.401 | 1.396.921 | 332.073 |
| | Percent. 95% | 1.138.450 | 1.182.236 | 1.234.780 | 1.357.382 | 1.427.441 | 1.488.742 | 353.900 |
| 2100 (RCP8.5) | Percent. 5% | 1.110.707 | 1.147.730 | 1.184.754 | 1.229.182 | 1.273.610 | 1.332.848 | 341.046 |
| | Valor medio | 1.232.577 | 1.273.663 | 1.314.749 | 1.364.052 | 1.413.355 | 1.479.093 | 378.467 |
| | Percent. 95% | 1.401.047 | 1.447.749 | 1.494.450 | 1.550.492 | 1.606.534 | 1.681.257 | 430.196 |

Los daños que se experimentan en el presente resultan relativamente reducidos, presentan una elevada variabilidad, pasando de los 130.000 USD para periodos de retorno de 5 años hasta daños cercanos al millón de USD para periodos de retorno superiores a los 100 años. Las características topográficas de la zona (barrio Autódromo) hacen que la afección aumente exponencialmente a medida que aumenta la superficie inundada.

En el futuro la situación se agrava 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 pueden duplicarse (año 2050) o estar cerca de multiplicarse por 10 en el caso del peor escenario posible y de cara a fin de siglo (año 2100).

Para eventos de periodo de retorno elevado (por encima de los 50 años), el incremento de los daños se reduce, debido a que gran parte de los activos construidos resultan ya afectados por eventos pequeños, y el incremento de superficie inunda resulta pequeño.

Al igual que para representar la afección sobre la población, se representa en la Figura 22 el riesgo sobre los activos construidos expresado en términos de daño anual esperado en millones de USD.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA PASCUAL

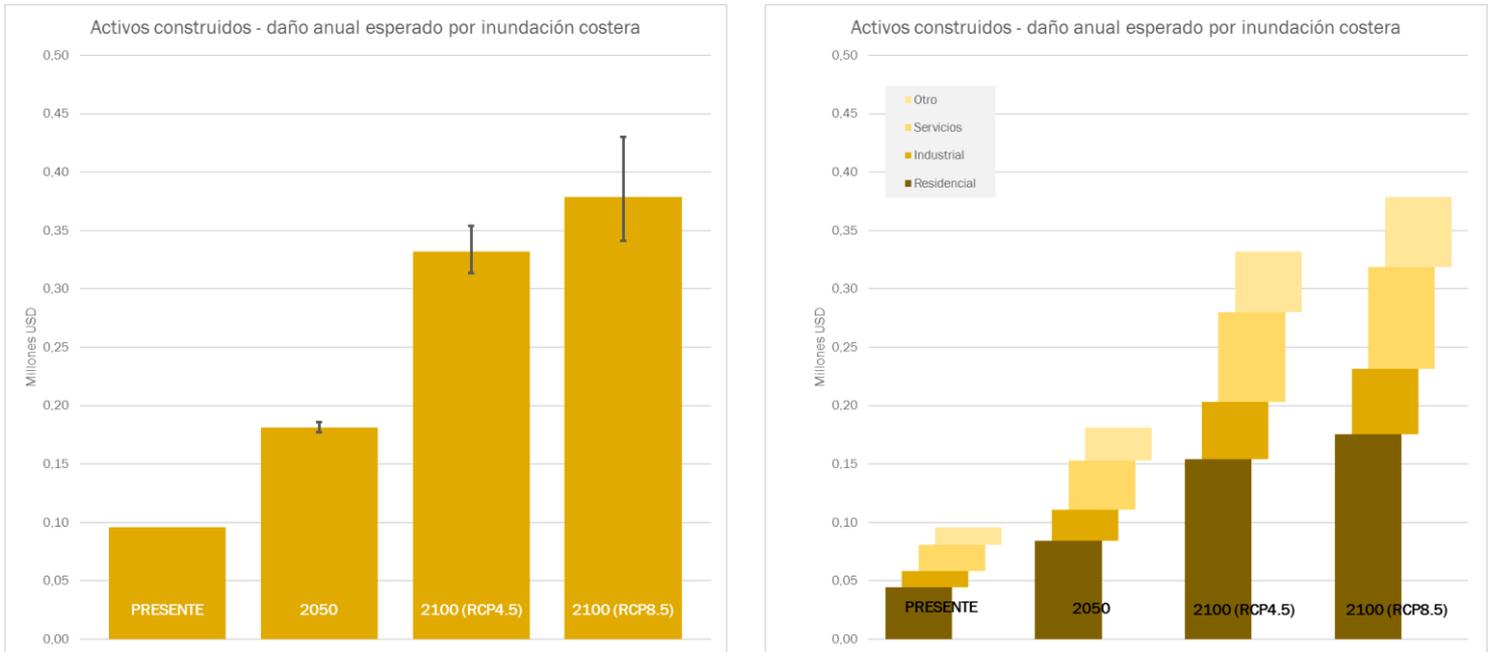


Figura 22. Riesgo de inundación sobre los activos construidos, expresado como daño anual esperado en millones de USD (estimación en base a datos catastrales). A la izquierda, el total de daño esperado. A la derecha, la distinción en categorías de activos construidos (residencial, industrial, servicios y otros).

Analizando el valor del daño anual esperado como indicador de riesgo de la zona de estudio, se observa que este indicador se duplique en el año 2050 y podrá multiplicarse por 3 incluso por 4 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 (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.

Es de nuevo importante aquí recordar las posibles imprecisiones que el proceso de desescalado seguido puede haber introducido por la existencia en los datos catastrales oficiales utilizados de un número elevado de parcelas catastrales no habitadas.

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 |

En el caso de Playa Pascual, los activos construidos en el entorno de 300 metros alrededor de la playa están principalmente situados en la zona más noroeste de la zona de estudio, en una franja de aproximadamente 1.800 metros. En el barrio de Autódromo, las edificaciones se encuentran situadas fuera de esta franja de los 300 metros más próximos a la playa, por lo que no estarían protegidas (en base a la metodología propuesta) por la playa en la actualidad.

Considerando el valor de estas edificaciones más próximas (cuyo valor estimado es de 1,45 millones de USD) y los factores de daño descritos anteriormente, se ha estimado un valor total de protección de la Playa Pascual cercano a 280.000 USD anuales (9.500 USD anuales por hectárea), lo que sitúa a la playa en el puesto 69 (sobre 212) en el ranking de playas uruguayas en cuanto a su valor de protección (en cuanto a valor agregado y puesto 88 en valor por hectárea).

Su valor de protección se encuentra muy por debajo de la media del país, situada en los 4 millones de USD anuales, debido principalmente a su amplia extensión de 7.000 metros y a las pocas edificaciones existentes en su franja más cercana, siendo además éstas de bajo valor catastral.

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 Pascual que el valor recreativo de la misma es de 1,9 millones de USD anuales (65.700 USD anuales por hectárea). Atendiendo a este resultado, la playa se sitúa en el puesto 161 con respecto al total de las playas uruguayas atendiendo a su valor total recreativo (por debajo del valor medio del país, situado en 20 millones USD anuales en cuanto valor absoluto, y rondando el millón de USD anuales por hectárea).

En términos generales, se puede concluir que el principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, suponiendo prácticamente el 85% del valor total, y que el valor total de la playa se estima en más de 2,2 millones de USD anuales, 75.300 USD anuales por hectárea.

4.1.2. Exposición física

Para el estudio de la erosión costera en playa Pascual, se considera tanto el transporte longitudinal como el transversal. Para ello, la playa se ha dividido en un total de 28 transectos que delimitan 27 celdas litorales, (Figura 23). El transporte longitudinal se evalúa en las celdas litorales mediante un modelo one-line, mientras que el transporte transversal se evalúa en los transectos que delimitan las celdas litorales mediante un modelo de equilibrio al que se incluye la contribución del ANMM.



Figura 23. Transectos de estudio en playa Pascual

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 delimiten 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: [179 - 215°]
- Pendiente de la zona de rompientes: 0,017
- Tamaño de sedimento (D50): 0,3 milímetros
- Ancho de playa seca: [0 - 39] metros
- Ancho de campo de dunas: [0 - 25] metros

4.2. Peligrosidad

4.2.1. Retroceso de la línea de costa

En este estudio, la evolución de la línea de costa en Playa Pascual se ha simulado con un modelo evolución de la línea de costa 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.

Como se mencionaba al principio del documento, Playa Pascual se enmarca en una unidad fisiográfica más amplia y compleja, al ubicarse dentro del estuario del Río de la Plata, y se ve afectada por el sedimento aportado por el río Santa Lucía (al este). Asimismo, el oleaje incidente está afectado por la

difracción que se produce en Punta Espinillo y por el sistema de corrientes de la zona. 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.

En Playa Pascual, el sentido medio anual del transporte longitudinal (Figura 24) es de este a oeste, como ya indicaba la acumulación de arena en la zona este del espigón, y un volumen anual medio de aproximadamente $25.000 \text{ m}^3/\text{año}$. Se aprecia una variabilidad temporal, que se relaciona con la variabilidad temporal de la altura de ola (Figura 25). El mayor transporte longitudinal se produce en los años 1993, 1998, 200, 2005 y 2016, donde se aprecia es cuando se tienen las mayores alturas de ola.

Este transporte se ha estimado utilizando una formulación de transporte potencial (Van Rijn, 2014), que se ha calibrado en base al volumen de sedimento observado en las imágenes de satélite de 2018 y 2016.

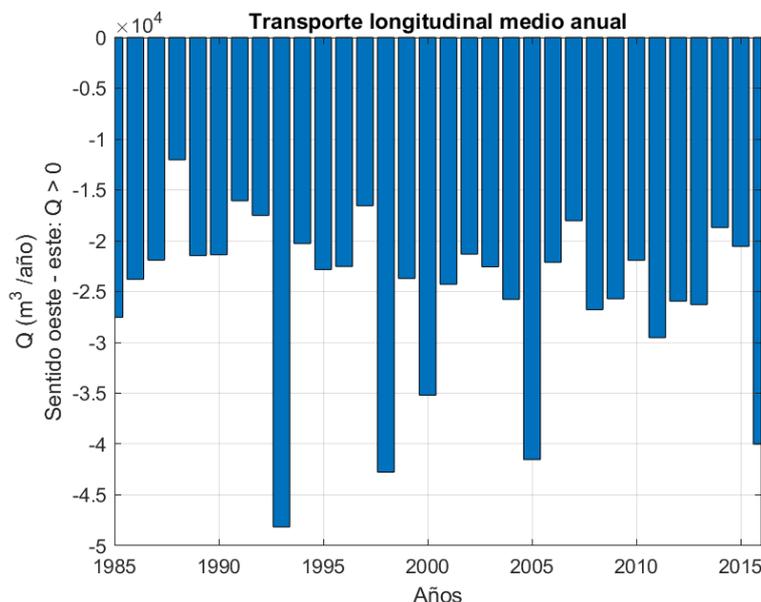


Figura 24. Transporte longitudinal medio anual de Playa Pascual (celda litoral al este).

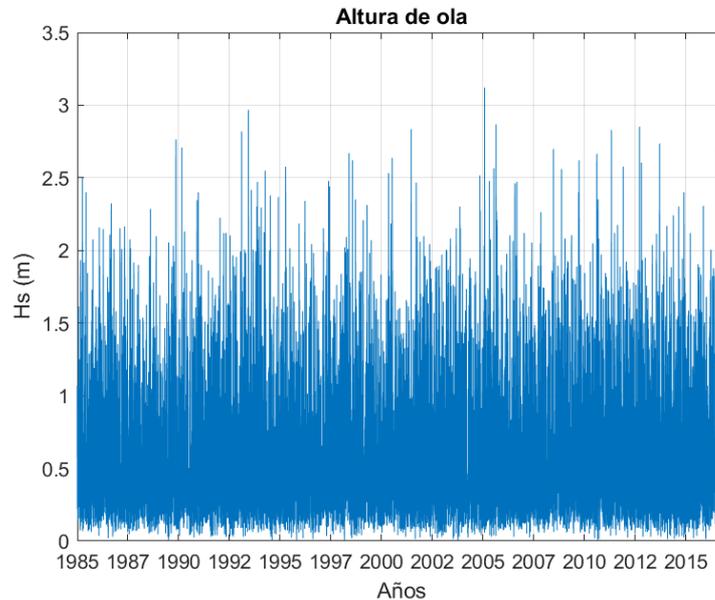


Figura 25. Serie temporal de altura de ola significativa en Playa Pascual (celda litoral al este).



Figura 26. Acumulación de sedimentos en el espigón de una central térmica al oeste de Playa Pascual

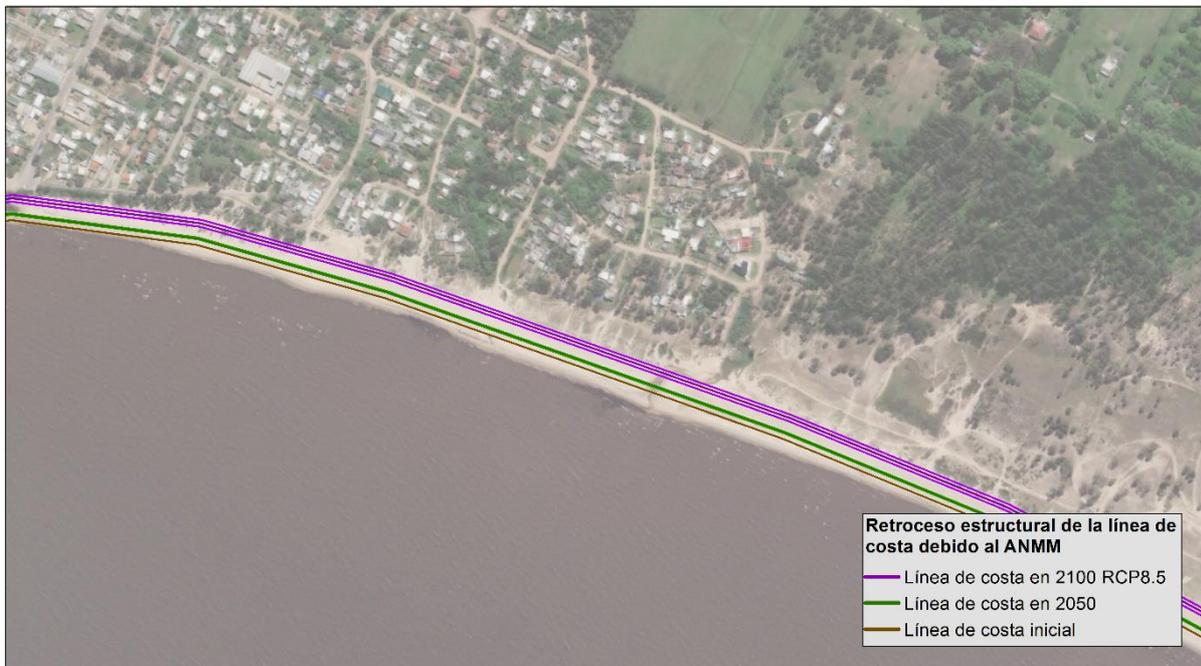
A partir de la evolución de la línea de costa obtenida con el modelo de erosión, se han obtenido dos tipos de resultados. Por un lado, se ha estimado el retroceso estructural de la línea de costa (Tabla 7), que se ha definido como el retroceso permanente de la playa debido al ANMM, y, por otro, se han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

En la Figura 27 se representa el retroceso estructural de la línea de costa en 2050 y 2100 debido al ANMM y la incertidumbre asociada. En la Figura 28 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 de la playa seca presente con el campo de dunas.



Figura 27. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en Playa Pascual. 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 PASCUAL

Figura 28. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 ampliado en Playa Pascual. 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 mitad de la anchura del campo de dunas. De este modo, los retrocesos obtenidos con el modelo de erosión se han limitado a la anchura máxima erosionable.

En la Tabla 7 se muestra el retroceso estructural en el transecto 6 en playa Pascual, tomado como ejemplo representativo de la misma. Se aprecia que el retroceso ligado al ANMM en el año 2050 se encuentra en un intervalo entre 6,73 y 8,91 metros, mientras que en el año 2100 (RCP8.5), la playa se erosionaría de entre 22,45 y 30,69 metros. La anchura promedio de playa erosionable es de 36,5 metros.

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

| Retroceso estructural (metros) | 2050 | | | 2100 RCP4.5 | | | 2100 RCP8.5 | | |
|--------------------------------|------|-------|------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | P5% | Media | P95% | P5% | Media | P95% | P5% | Media | P95% |
| | 6,73 | 7,82 | 8,91 | 16,46 | 19,26 | 22,05 | 22,45 | 26,58 | 30,69 |

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 transecto. En 2050 se espera una pérdida permanente de la superficie de playa entre 40.583 y 53.799m², mientras que en 2100 puede llegar hasta 166.615 m².

Tabla 8. Área erosionada (m²) debido al ANMM en Playa Pascual.

| Área erosionada (m ²) | 2050 | | | 2100 RCP4.5 | | | 2100 RCP8.5 | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| | P5% | Media | P95% | P5% | Media | P95% | P5% | Media | P95% |
| | 40.583 | 47.197 | 53.799 | 98.932 | 115.665 | 130.620 | 132.639 | 152.113 | 166.615 |

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). Se aprecia que un evento de erosión de 5 años de periodo de retorno en el presente origina una pérdida del 9% de la superficie de playa, mientras que un evento con la misma probabilidad de ocurrencia en el año 2100 RCP8.5 originaría una pérdida esperada del 48% de la superficie.

Tabla 9. Área erosionada (m²) asociada a distintos periodos de retorno en Playa Pascual.

| Área erosionada (m ²) | Presente | 2050 | | | 2100 RCP4.5 | | | 2100 RCP8.5 | | |
|-----------------------------------|----------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| | | P5% | Media | P95% | P5% | Media | P95% | P5% | Media | P95% |
| Tr=5 | 26.654 | 61.599 | 70.861 | 80.187 | 101.459 | 119.268 | 134.889 | 118.764 | 136.618 | 152.582 |
| Tr=10 | 34.819 | 73.715 | 83.891 | 94.207 | 117.188 | 134.400 | 150.112 | 138.678 | 157.095 | 170.585 |
| Tr=25 | 45.003 | 88.477 | 99.801 | 111.272 | 131.706 | 148.703 | 162.167 | 157.677 | 173.504 | 184.057 |
| Tr=50 | 52.464 | 99.048 | 111.120 | 122.839 | 140.303 | 155.987 | 168.070 | 167.337 | 181.341 | 187.902 |
| Tr=100 | 59.792 | 109.200 | 121.558 | 132.873 | 146.962 | 161.334 | 172.287 | 174.359 | 186.310 | 189.051 |
| Tr=500 | 76.433 | 129.485 | 141.842 | 153.090 | 157.376 | 169.445 | 178.268 | 184.626 | 189.095 | 189.549 |

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 las playas de Atlántida.

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 17.000 y los 140.000 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.

| | 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 | 17.344 | 29.597 | 49.443 | 67.197 | 87.279 | 142.622 | 9.311 |
| 2050 | Percent. 5% | 92.634 | 132.659 | 191.111 | 239.503 | 291.118 | 409.315 | 40.002 |
| | Valor medio | 122.583 | 171.813 | 243.161 | 301.445 | 360.733 | 491.170 | 51.592 |
| 2100 (RCP4.5) | Percent. 95% | 156.976 | 216.665 | 302.269 | 368.378 | 431.017 | 572.155 | 64.664 |
| | Percent. 5% | 251.304 | 335.265 | 423.481 | 480.571 | 527.268 | 604.642 | 95.829 |
| | Valor medio | 347.269 | 440.980 | 539.837 | 594.019 | 635.435 | 700.934 | 126.395 |
| 2100 (RCP8.5) | Percent. 95% | 444.194 | 550.111 | 642.020 | 689.606 | 724.649 | 775.831 | 156.288 |
| | Percent. 5% | 344.343 | 469.503 | 606.960 | 683.608 | 742.182 | 832.160 | 133.752 |
| | Valor Medio | 455.659 | 602.482 | 734.919 | 802.815 | 847.413 | 872.935 | 169.105 |
| | Percent. 95% | 568.365 | 710.404 | 827.039 | 861.958 | 872.526 | 877.130 | 199.459 |

Estas cantidades se verán incrementadas con los efectos del cambio climático, de tal forma que los daños que se experimentan en el presente para eventos de periodo de retorno de 5 años se multiplicarán por cerca de 30, alcanzando el medio millón de USD en el peor de los escenarios posibles,

y que los 140.000 USD anuales de un periodo de retorno de 500 años en la actualidad podrán multiplicarse por 6,5, llegando a alcanzarse daños por valor de 0,9 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% | 40.207 |
| | Valor medio | 54.382 |
| | Percent. 95% | 70.660 |
| 2100 (RCP4.5) | Percent. 5% | 238.943 |
| | Valor medio | 326.606 |
| | Percent. 95% | 416.522 |
| 2100 (RCP8.5) | Percent. 5% | 429.503 |
| | Valor medio | 564.879 |
| | Percent. 95% | 677.718 |

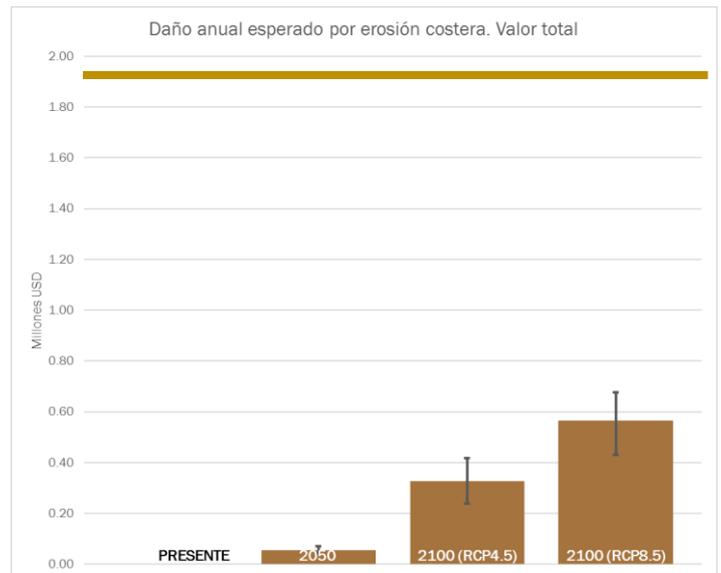
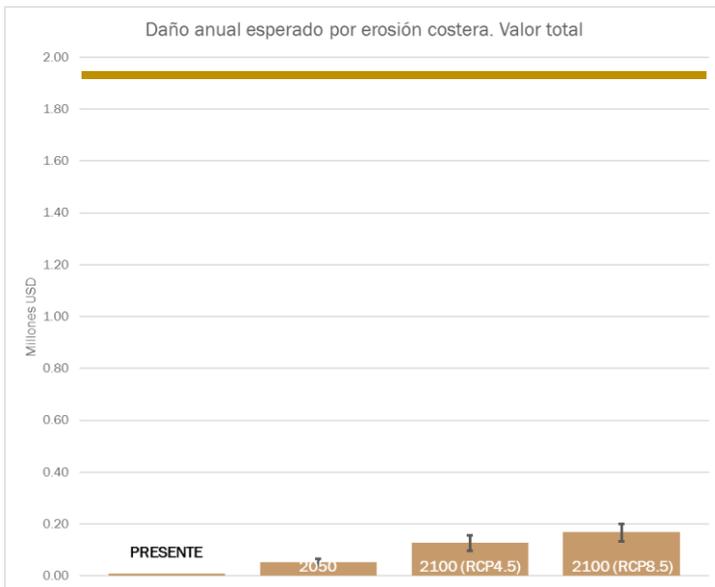


Figura 29. Daño anual esperado por erosión sobre el valor total de la playa (obtenido de los servicios de protección y recreativo proporcionados por la playa). La figura de la izquierda representa el daño por eventos extremos de erosión, mientras que la figura de la derecha el daño por el retroceso estructural. En ambos casos, la línea continua representa el valor total anual de la playa.

El daño anual esperado, actualmente en el entorno de los 10.000 USD anuales, se multiplicará por 5,2 para el año 2050 (hasta los 52.000 USD anuales) y al menos se multiplicará por 9,5 para el año 2100 (95.000 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 sufrirán las playas de Atlántida debido al ANMM (Tabla 11) añadirá

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA PASCUAL

un daño extra que se prevé alcance los 54.000 USD anuales en 2050 y que variará entre los 238.000 y 678.000 USD anuales en 2100, por lo que es la aparición de esta erosión estructural la que realmente introduce una componente de riesgo importante, triplicando las consecuencias debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 399.000 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 479.000 USD si la tasa de descuento es del 3% y los 334.000 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 1,36 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 1,93 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

5. CONCLUSIONES

Playa Pascual es una playa semi-urbana situada en la costa de Playa Pascual, en Ciudad del Plata, en el Departamento de San José, aproximadamente a 9 kilómetros al noroeste de la desembocadura del río Santa Lucía. Es una playa abierta y sin confinamientos, desde el punto de vista del transporte de sedimentos, en sus extremos.

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 se retranquea a la altura de la Villa Olímpica, y el aumento del ángulo de incidencia del oleaje aumenta la capacidad de transporte en la zona.
- Debido a la ubicación de la playa, ésta recibe un aporte sedimentario importante de origen fluvial.
- El espigón de la central Punta del Tigre suponía, desde 2016 hasta 2018, una barrera total al paso de sedimento, que tiene sentido este – oeste.

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 Pascual 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

Una de las zonas más expuestas del área de estudio es la zona sur de Autódromo, hasta la altura de la ruta 1. En esta zona los edificios están construidos sobre terrenos bajos.

En el presente, se tienen problemas de inundación en las zonas expuestas de Autódromo para eventos con probabilidad de ocurrencia alta, con periodos de retorno de 5 y 10 años. Para estos eventos, el agua inunda varias parcelas y alcanza la Rambla Costanera.

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 cota de inundación $Tr=100$ años tiene una extensión similar a la producida en el presente por un evento con cota de inundación $Tr=500$ años. La superficie inundada por eventos de $Tr=500$ años en el presente se alcanza en 2100 para el $Tr=10$ años en el RCP4.5 y para el $Tr=5$ años en el RCP8.5. Mostrando así también la influencia de la mitigación.

La zona de Autódromo al norte de la ruta 1 y Playa Pascual no tienen riesgo potencial de inundación, ni en el presente ni en el futuro. El riesgo de inundación de la zona de Autódromo comprendida entre la costa y la ruta 1 aumentará en el futuro debido al aumento de intensidad de los temporales. En

particular, la franja costera de Autódromo hasta la altura de la calle 10 es zona potencialmente inundable en eventos con probabilidad muy alta de ocurrencia (cota de inundación $Tr=5$ años). En ningún escenario el agua alcanza la ruta 1 Brigadier General Manuel Oribe, que marca el límite de la zona con riesgo de inundación de Autódromo.

En el futuro y para los eventos con periodo de retorno por encima de 25 años, la población afectada por inundación se duplicará con respecto al presente. No obstante, en ningún escenario la población afectada supera las 500 personas, por lo que la afección de la inundación sobre la población se podría considerar mínima. El daño de activos construidos por inundación

Respecto a las consecuencias sobre los activos construidos debido a inundación costera, en el presente los daños oscilan entre 130.000 USD y 1.000.000 USD para eventos con probabilidad de ocurrencia muy alta y baja, respectivamente. Las características topográficas de la zona sur de Autódromo hacen que la afección aumente exponencialmente a medida que aumenta la superficie inundada. En el futuro, los daños provocados por un evento con probabilidad de ocurrencia alta sobre los activos construidos se podrán duplicar (2050) o multiplicar por 10 (2100) respecto a los daños del presente para un evento con la misma probabilidad de ocurrencia. Los principales activos construidos dañados serán las edificaciones residenciales.

El proceso de desescalado seguido puede haber introducido posibles imprecisiones por la existencia en los datos catastrales oficiales utilizados de un número elevado de parcelas catastrales no habitadas.

- Riesgo de erosión costera

Se ha estimado el valor recreativo de Playa Pascual en 1.9 millones USD anuales (65.700 USD anuales por hectárea). La playa se sitúa en el puesto 161 (sobre 212) con respecto al total de las playas uruguayas atendiendo a su valor total recreativo (por debajo del valor medio del país, situado en 20 millones USD anuales en cuanto valor absoluto, y rondando el millón de USD anuales por hectárea).

Considerando el valor de las edificaciones más próximas, se ha estimado un valor total de protección de Playa Pascual cercano a 280.000 USD anuales (9.500 USD anuales por hectárea), lo que sitúa a la playa en el puesto 69 (sobre 212) en el ranking de playas uruguayas en cuanto a su valor de protección (en cuanto a valor agregado y puesto 88 en valor por hectárea). Su valor de protección se encuentra muy por debajo de la media del país, situada en los 4 millones de USD anuales, debido principalmente a su amplia extensión de 7.000 metros y a las pocas edificaciones existentes en su franja más cercana, siendo además éstas de bajo valor catastral.

En términos generales, se puede concluir que el principal servicio proporcionado por la playa es el de recreación, suponiendo prácticamente el 85% del valor total, y que el valor total de la playa se estima en más de 2,2 millones de USD anuales, 75.300 USD anuales por hectárea.

Se ha estimado un retroceso estructural de la línea de costa de entre 7 y 9 metros de playa en 2050, y entre 16 y 30 metros de playa en 2100. Esto se ha traducido en daños que se prevé alcancen los 54.000 USD anuales en 2050 y que variará entre los 240.000 anuales USD y 680.000 anuales USD en 2100.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PLAYA PASCUAL

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 399.000 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 479.000 USD si la tasa de descuento es del 3% y los 334.000 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 1,36 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 1,93 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.

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.

Van Rijn, L.C. (2014). A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. Coastal Engineering, 90, pp. 23 – 39.