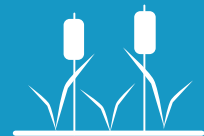
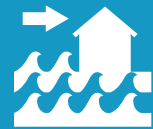


# NAP Costas

Plan Nacional de  
Adaptación Costera  
de Uruguay

Documento preparatorio

Casos piloto. Ciudad de Colonia (Colonia)





**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. CIUDAD DE COLONIA (COLONIA)**

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: Playas de Colonia de Sacramento. Departamento de Colonia. Fuente: coloniauy.com.*

## ÍNDICE

Resumen Ejecutivo .....	3
Antecedentes .....	7
1 Características de la zona piloto.....	8
1.1 Descripción general y diagnóstico.....	8
2 Clima marítimo en la zona de estudio.....	12
2.1 Dinámicas históricas.....	12
2.2 Dinámicas futuras.....	15
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.....	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 .....	33
4.2.1 Retroceso de la línea de costa.....	34
4.3 Riesgo .....	37
5 Conclusiones.....	40
6 Referencias.....	42

## RESUMEN EJECUTIVO

### DESCRIPCIÓN

- La zona de estudio de Colonia agrupa una serie de playas urbanas ubicadas en la ciudad de Colonia de Sacramento, en el Departamento de Colonia. En concreto se analizan (de oeste a este) las playas Balneario Municipal, El Álamo, Las Delicias.
- La zona de playa conformada por las playas de Balneario Municipal, El Álamo y Las Delicias tiene una longitud aproximada de 3.000 metros, y está situada en la zona noroeste de la ciudad de Colonia.
- La zona de playa de estudio se encuentra confinada en su extremo sureste por la punta de Colonia de Sacramento y el muelle de Yates, mientras que no posee confinamiento, desde el punto de vista de transporte de sedimento, en su extremo noroeste.
- El conjunto formado por estas playas presenta la forma en planta típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por la citada punta, y en última instancia, por el dique del muelle de Yates.
- Un elemento morfológico singular de esta playa es la existencia de numerosos espigones transversales ubicados a todo lo largo de la playa, de forma que compartimentan la misma.

### DIAGNÓSTICO

- La mayor anchura de la playa seca en el lado este de los espigones permite concluir que existe un transporte de este a oeste (realmente de sureste a noroeste), si bien la reducida acumulación de arena en dicho extremo señala que la magnitud de dicho transporte en la actualidad es reducida.
- En algunas zonas se observan escolleras y estructuras de protección del paseo y carretera litoral, que señalan que en dichas zonas el oleaje ha alcanzado y dañado el muro de contención de la carretera.

### DINÁMICAS ACTUALES

- La zona de estudio se localiza en el límite entre la zona interna y 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 112,5°-157,5°.
- La altura de ola asociada al percentil 50% menor a 0,25 metros, y la altura de ola asociada al percentil 95% igual a 1,5 metros.
- El patrón de corrientes en la zona está regido por la interacción del régimen semidiurno de la marea junto con el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay y los vientos.

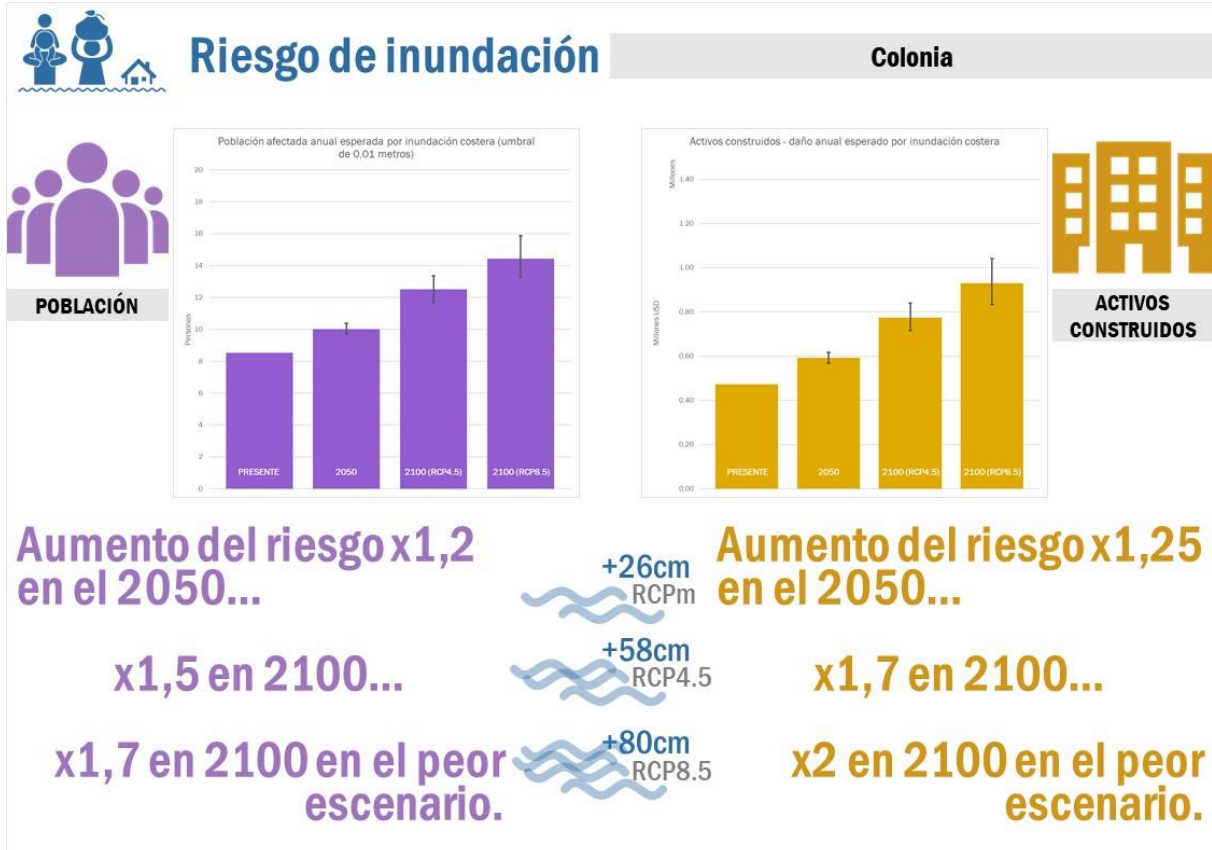
## DINÁMICAS FUTURAS

- El aumento del nivel medio del mar esperado en 2100 en la costa de Uruguay es de 0,93 metros para el peor escenario (RCP8.5).
- En el futuro (2100), la magnitud de los cambios en las dinámicas costeras debido al cambio climático en Uruguay es pequeña. Se esperan cambios de altura de ola significativa del orden de 0,03 - 0,04 m para los incrementos y 0,04 - 0,05 m para las disminuciones, cambios positivos de periodo de pico del orden de 0,05 s y negativos del orden de 0,1 s, y un giro antihorario del oleaje esperado entre 3-6°.
- La magnitud de los cambios en 2100 en el residuo del nivel del mar también es pequeña, del orden de 0,01-0,015 m.

## INUNDACIÓN

Del análisis de riesgo por inundación costera se concluye:

- Las principales zonas afectadas por inundación costera son las parcelas urbanizadas frente a las playas de Los Verdes y Real de San Carlos y la zona cercana a la desembocadura del Arroyo de Caballada.
- También aparece inundación destacable en el entorno de los puertos de Yates y Colonia.
- En 2050 la superficie inundada por un evento con periodo entre 50 y 100 años tendrá una extensión similar a la producida en el presente por un evento de periodo de 500 años. Las extensiones de inundación para periodos de 500 años en el presente se darán en 2100 para el RCP4.5 con más frecuencia para periodos de 100 años y en el RCP8.5 para periodos de 50 años. Mostrando así también la influencia de la mitigación.
- En el presente, medio centenar de personas se ven afectadas de forma importante (más de 30 centímetros de altura de agua) para eventos extremos de periodo de retorno elevado (500 años). En el futuro la cantidad de personas afectadas se verá triplicada, produciéndose la misma afección sobre la población (50 personas afectadas) con eventos de periodo mucho menores (25-50 años de periodo de retorno). La población afectada con los periodos de retorno más bajos (5 años) se verá incrementada en un 50% en el horizonte 2100.
- Los daños sobre activos construidos en el presente daños oscilan entre 1,2 de millones USD para periodos de retorno de 5 años y 4,5 millones USD para periodos de retorno de 500 años. En el futuro, se prevé que estos daños se dupliquen en el horizonte 2100, superando los 2 millones USD para periodos de retorno de 5 años y llegando a alcanzar los 10 millones USD para periodos de retorno de 500 años.



## EROSIÓN

Del análisis de riesgo por erosión costera:

- El principal servicio proporcionado por la playa es el de protección, triplicando el valor del servicio de protección.
- El valor total de la playa se estima en más de 37,4 millones de USD anuales, 2,68 millones de USD anuales por hectárea, ligeramente por debajo de la media del país (3,4 millones de USD anuales por hectárea).
- Un evento de erosión de 5 años de periodo de retorno en el presente origina una pérdida del 5% 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 30% de la superficie.
- Además, debido al retroceso estructural de la línea de costa, se perderán de forma permanente entre 4,5 y 6 metros de playa en 2050, y entre 13 y 18 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 Colonia, uno de los casos piloto considerados para la Intendencia de Colonia 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 Colonia:

- Problemas de erosión por la construcción de una escollera.
- Asocian los problemas actuales a la extracción de arenas y de construcción de infraestructuras río arriba.
- Se han aplicado medidas de introducción de vegetación para captación de arena

Como zona piloto se propuso la Ciudad de Colonia:

- Es patrimonio de la humanidad y existen multitud de cuestiones patrimoniales y de usos que generan conflictos importantes de gestión.
- Se han construido diferentes infraestructuras y rellenos que pueden haber sido la causa de muchos problemas existentes.
- Se considera que una rambla por encima de la duna y de escollera para resolver el problema de erosión son algunos de los orígenes de la problemática actual.
- Se han construido una gran cantidad de cercas de captura de sedimento. La principal captación de arena es la de Santa Ana.
- Se sostiene que la incidencia de las islas es importante en los efectos sobre el clima general.
- Tienen problemas de inundaciones.

## 1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA PILOTO

### 1.1 Descripción general y diagnóstico

Colonia de Sacramento es la capital del departamento de Colonia, en el suroeste de Uruguay. Se ubica en el saliente rocoso Punta de San Pedro, en el Río de la Plata. La costa de Colonia al sur de la punta está formada por arcos de playa entre puntas rocosas, mientras que la costa de Colonia al norte de la punta y hacia el interior del estuario está formada principalmente por playas arenosas. En el sur de la punta se localiza el puerto comercial de Colonia, mientras que en el norte de la punta se localiza el puerto deportivo de Yates.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio (Colonia de Sacramento, Colonia).

Las playas encajadas (Rowling, Honda, del Medio y Ferrando) situadas en el extremo sur de la ciudad de Colonia tienen longitudes de entre 300 y 700 metros de longitud. Estas playas están en aparente equilibrio estático, sin pérdida ni ganancia neta de sedimento.

Por otro lado, la zona de playa abierta situada en la zona noroeste de la ciudad de Colonia está conformada por las playas de Balneario Municipal, El Álamo y Las Delicias, y tiene una longitud aproximada de 3.000 metros.

El análisis se ha centrado principalmente en la zona de playa abierta. En el presente documento se refiere a estas playas como la playa de Colonia de Sacramento.

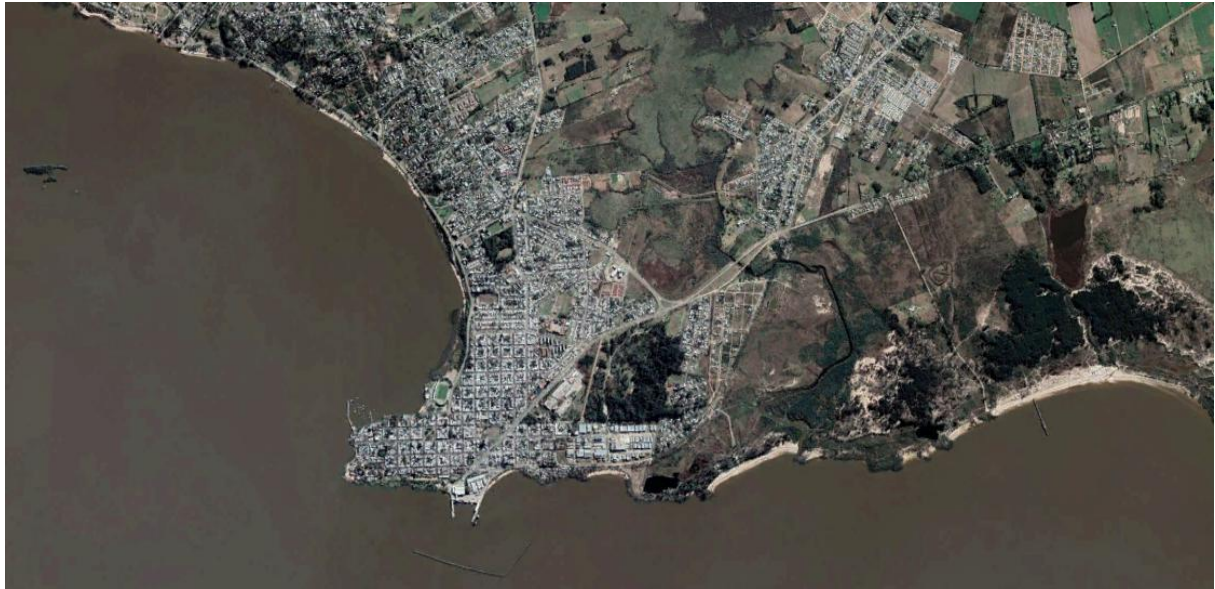


Figura 2. Colonia de Sacramento en 2019 (Fuente: Google Earth).

### Principales elementos morfológicos

La zona de playas de estudio, conformada por las playas de Balneario Municipal, El Álamo y Las Delicias, se encuentra confinada en su extremo sureste por la Punta de San Pedro y el muelle de Yates, mientras que no posee confinamiento, desde el punto de vista de transporte de sedimentos, en su extremo noroeste.

El conjunto formado por estas playas presenta la forma en planta típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por la citada punta, y en última instancia, por el dique del muelle de Yates. Las playas se encuentran limitadas hacia el interior por la Rambla Costanera, construida sobre las dunas primarias.

Un elemento morfológico singular de esta zona de playa es, como se puede observar en la Figura 3, la existencia de numerosos espigones transversales ubicados a todo lo largo de la playa, de forma que compartimentan la misma. La longitud de estos espigones no evita el paso de arena de un compartimento a otro, pero sí condiciona la forma de la playa seca. La playa seca es inexistente en gran parte de la playa, y se concentra en las zonas adosadas a los espigones anteriormente citados. En algunas zonas (Figura 3) se observan escolleras y estructuras de protección del paseo y carretera litoral, que señalan que en dichas zonas el oleaje ha alcanzado y dañado el muro de contención de la carretera. La mayor anchura de la playa seca en el lado este de los espigones permite concluir que existe un transporte de este a oeste, si bien la reducida acumulación de arena en dicho extremo señala que la magnitud de dicho transporte en la actualidad es reducida.



Figura 3. Zona de playa a la altura del Real de San Carlos en 2007 (Fuente: Google Earth).

### Fuentes y sumideros de sedimento

No existe ningún río ni aporte sedimentario de entidad en las playas de Colonia de Sacramento. La forma en planta de las playas encajadas ubicadas al este de Colonia, con acumulaciones y rebases de arena en las zonas oeste de las playas señalan que, históricamente, antes de la construcción de los puertos, las playas al oeste de Colonia de Sacramento probablemente se alimentaban de arena procedente del este. Esta alimentación está en la actualidad impedida por el puerto.

### Evolución histórica

Comparando la situación de la zona norte de playa en 2019 con la situación de la misma en 2013 (Figura 4) se puede apreciar una menor cantidad de arena en la situación de la playa en 2019. Esta área erosionada se ha utilizado para estimar un volumen de transporte longitudinal de sedimento. Se ha medido un área erosionada igual a  $10.000 \text{ m}^2$ . Asumiendo una profundidad de cierre de 2,8 metros y una berma de 0,8 metros, se ha estimado un volumen de arena erosionada en 6 años igual a  $36.000 \text{ m}^3$ . Esto supone una tasa anual de transporte longitudinal de  $6.000 \text{ m}^3/\text{año}$ .

### Diagnóstico inicial

Un diagnóstico inicial conduce a concluir que las playas de Colonia de Sacramento están en erosión como consecuencia de la falta de aporte de sedimento de las playas del este debido a la presencia del puerto. Existe transporte de sedimento con sentido este – oeste, pero la magnitud de dicho transporte es pequeña ( $6.000 \text{ m}^3/\text{año}$ ). Al no recibir aporte de arena por el este, la zona de playa afectada por el Muelle de Yates rotará hasta alcanzar el equilibrio estático y, cuando lo alcance, el transporte longitudinal será nulo. Previsiblemente el equilibrio estático se alcanzará en unas decenas de años. Debido al alcance del presente de estudio, que tiene como fin evaluar los impactos costeros a largo

plazo, se ha considerado como despreciable el transporte longitudinal en las playas de Colonia de Sacramento.



*Figura 4. Comparativa de la situación de Playa Los Verdes y Playa Real de San Carlos en 2013 (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. Colonia de Sacramento (Colonia) se localiza en el límite entre la zona interna y 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).

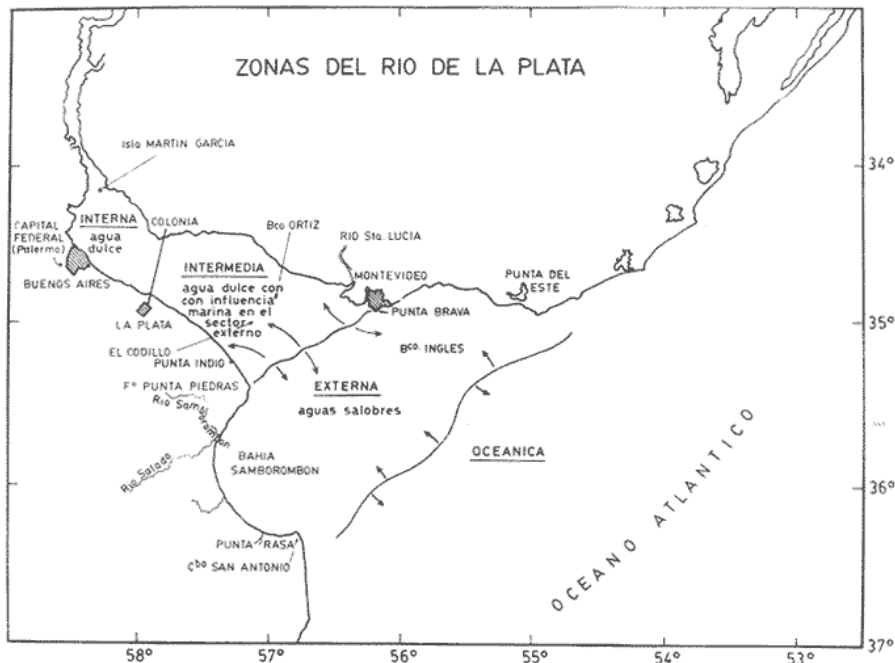


Figura 5. Morfología del Río de la Plata (Boschi, 1988).

### 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 Ciudad de Colonia (punto 56, Figura 6). La profundidad en este punto es de aproximadamente 8 metros.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

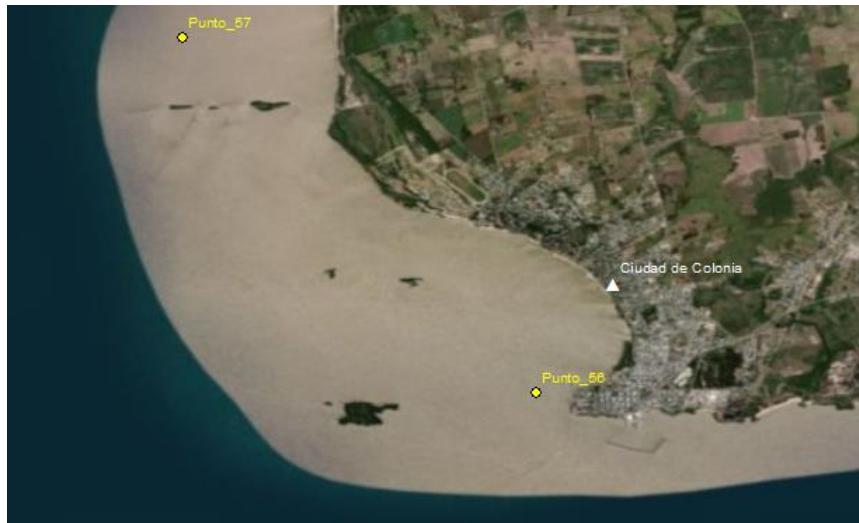


Figura 6. Localización del punto del Atlas más cercano a Ciudad de Colonia.

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 112,5°-157,5° (Figura 7). Las alturas de ola son muy pequeñas, siendo la altura de ola asociada al percentil 50% menor a 0,25 metros, y la altura de ola asociada al percentil 95% igual a 1,5 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.

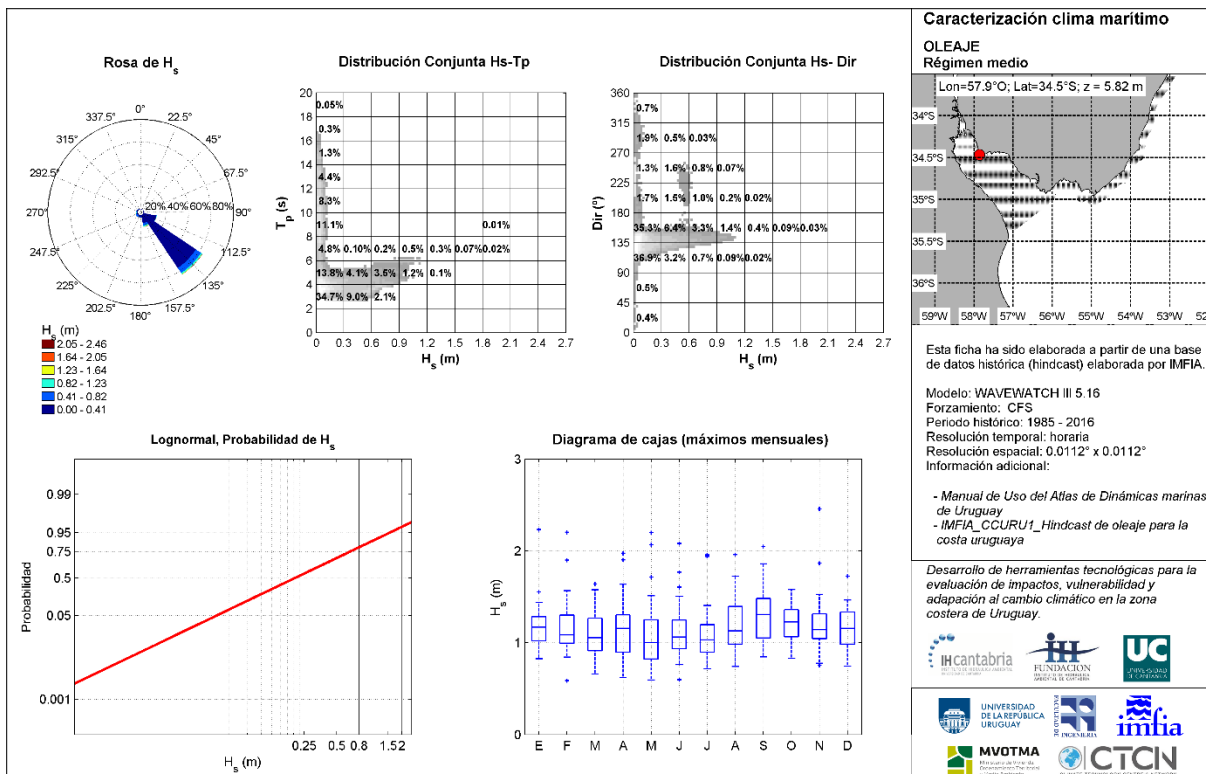


Figura 7. Caracterización del régimen medio de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

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 72 centímetros.

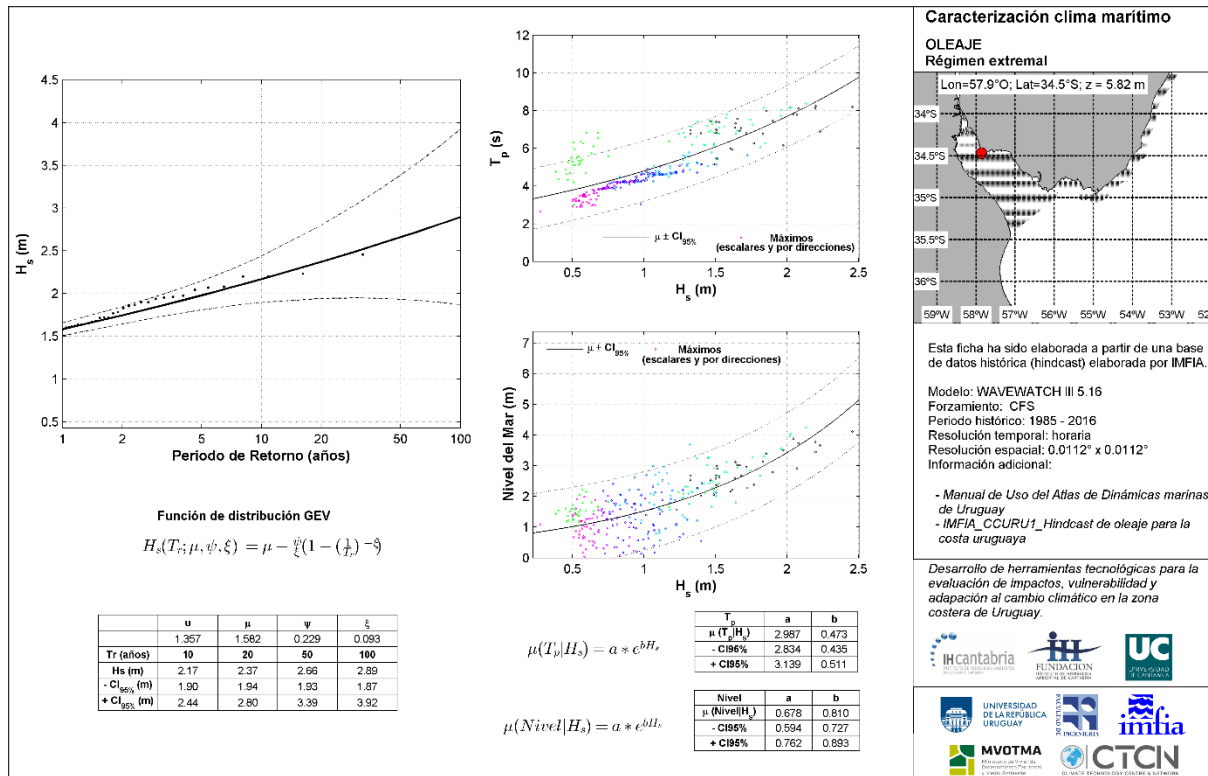


Figura 8. Caracterización del régimen extremal de oleaje en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

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 intensidades de hasta 1 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 93 centímetros, 21 centímetros mayor que la diferencia entre las alturas de ola asociadas a los mismos periodos de retorno (72 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.

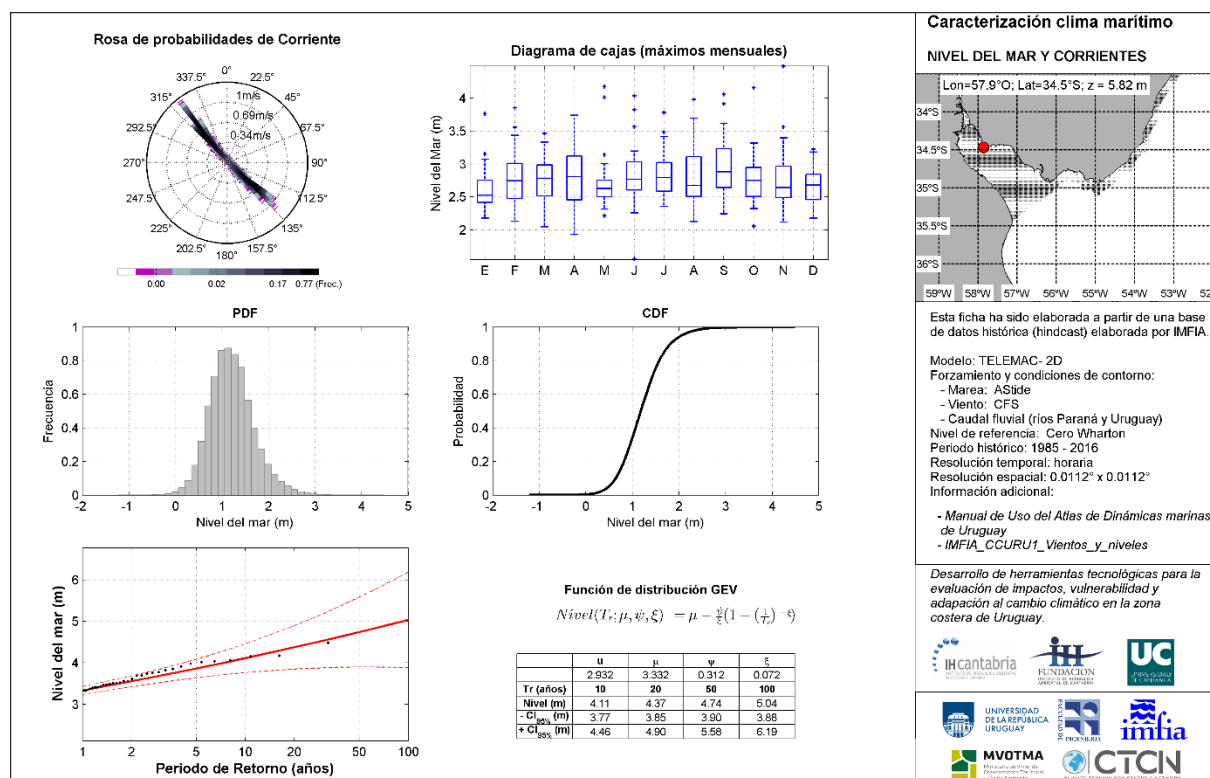


Figura 9. Caracterización del nivel del mar y corrientes en la zona de estudio (IHCantabria, 2019a).

## 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 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.

### 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 10 muestra el mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m<sup>2</sup>. 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/m<sup>2</sup> que ocupa un área de 1.000 m<sup>2</sup>, 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 m<sup>2</sup> (basado en datos catastrales del año 2018) y con nivel de detalle de parcela catastral.

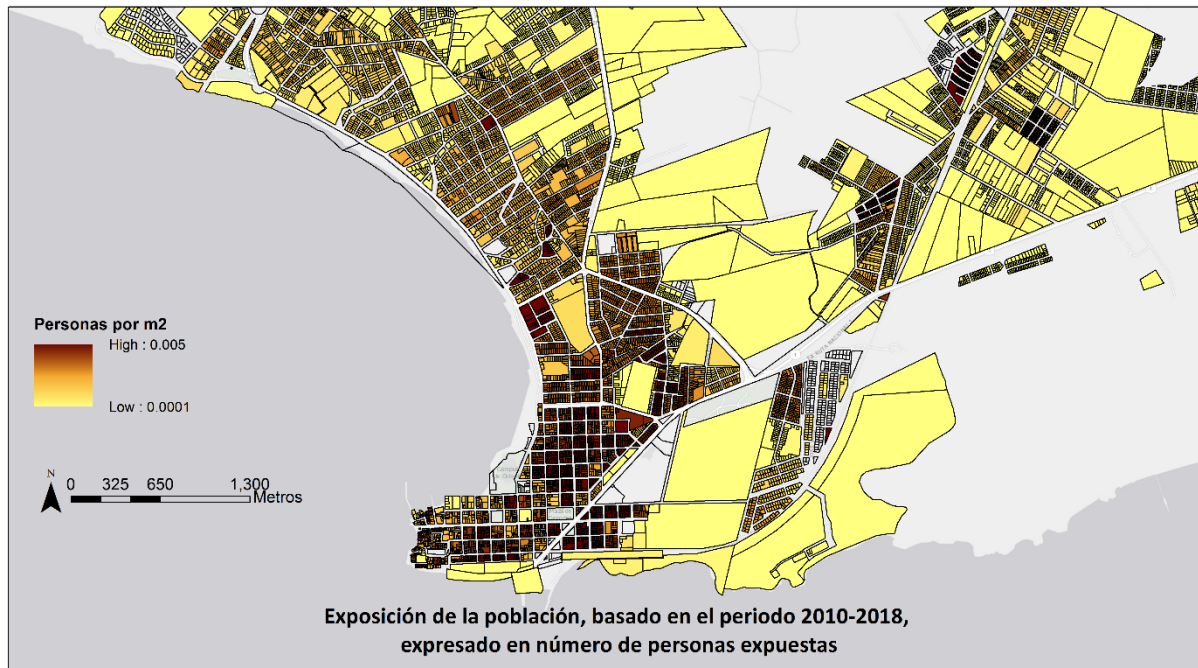


Figura 10. Mapa de exposición de la población, basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de personas expuestas por m<sup>2</sup>.

En la Figura 9 se puede observar que según los datos del Censo la zona más densamente poblada es el centro de la ciudad de Colonia, situado en la zona sur de la zona de estudio (Avenida Baltasar Brum hacia el sur, frente a Playa urbana del Rowing y del Puerto de Colonia). En el resto de zonas la densidad es media-alta, aunque va disminuyendo al alejarse hacia Real de San Carlos (zona norte de la ciudad).

En toda la zona de estudio las edificaciones más características son de una única altura, dos en algunos casos, mientras que en la zona referida del centro, más poblada, aparecen algunas edificaciones que llegan a poseer varias alturas.



Figura 11. Edificaciones existentes en el centro de Colonia (Fuente: Google).

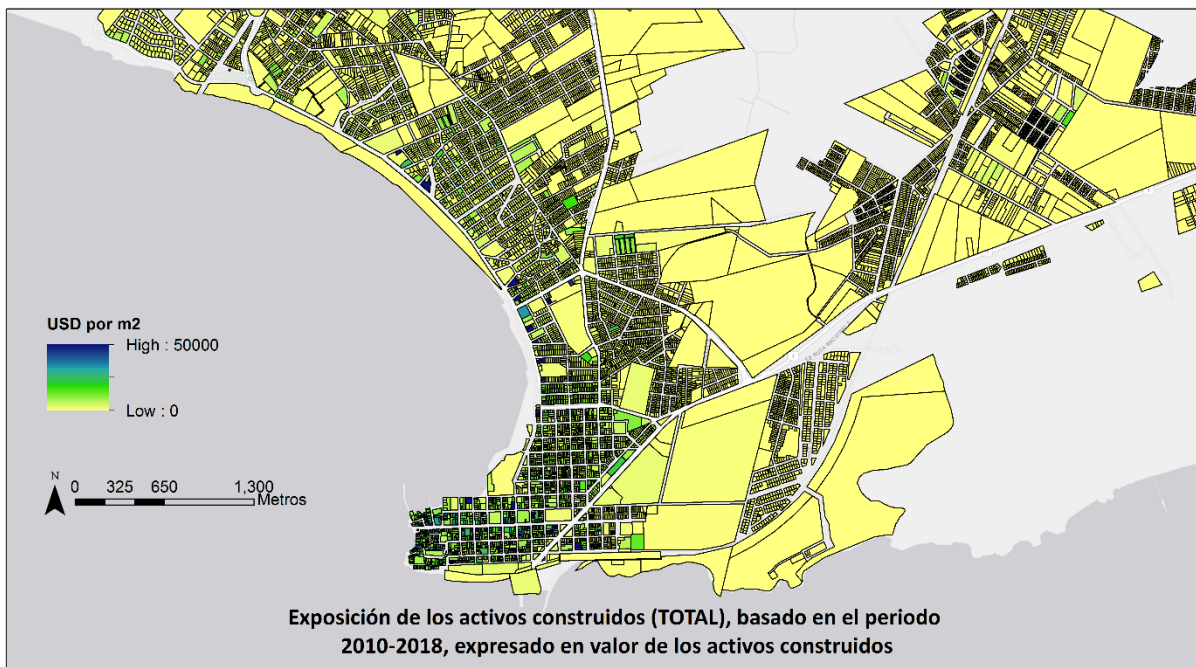


Figura 12. Mapa del valor de exposición del stock construido (total), basado en el periodo 2010-2018, expresado en número de USD por m<sup>2</sup>.

Desde el punto de vista del valor económico de las edificaciones, en la Figura 10 se observa que dicho valor (obtenido de datos catastrales oficiales) es relativamente heterogéneo, conviviendo parcelas con un valor reducido, con otras donde el valor destaca por encima de la media. Este hecho encaja con la observación anteriormente hecha de las alturas de las edificaciones, poseyendo obviamente más valor aquellas edificaciones con más plantas.



*Figura 13. Edificaciones con mayor valor catastral en la zona de estudio de Colonia (Fuente: Google).*

Sí que se observa que existe una mayor concentración de parcelas con valores catastrales elevados en la zona centro de la ciudad, mientras que a medida que nos desplazamos hacia el norte, el valor de las edificaciones se hace más homogéneo y generalmente de una magnitud menor.

### 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 en Colonia del Sacramento. Como se puede observar, las zonas con menores cotas se encuentran en el Real de San Carlos, frente a las playas de Los Verdes y Real de San Carlos y en la zona de la desembocadura del Arroyo la Caballada, una gran extensión que en la zona más cercana a la costa tiene entre 0 y 4 metros de altitud por encima del nivel medio del mar (terreno sombreado en verde en la Figura 14) y en la zona más interior tiene cotas entre 4 y 8 metros (terreno sombreado en naranja y marrón). Se identifican también como zonas con cotas bajas los puertos de Colonia y Yates. Comparando la Figura 12 y la

Figura 14 se aprecia cómo el área urbanizada en la zona del arroyo está organizada solamente en las cotas más altas.

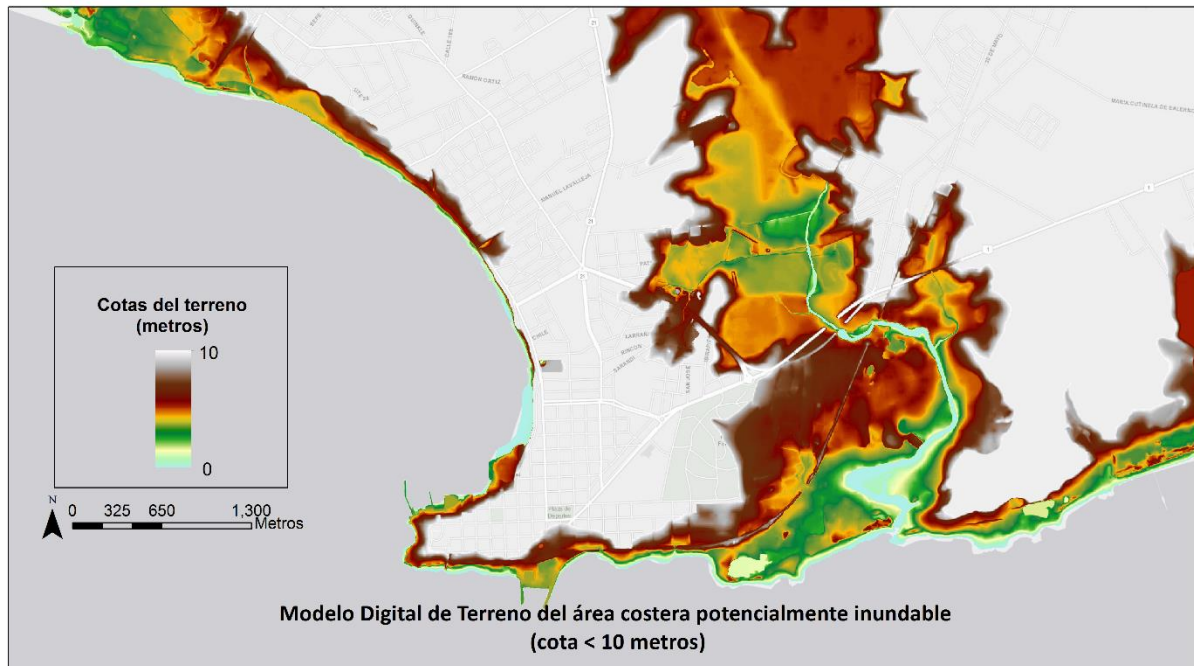


Figura 14. Modelo Digital de Terreno del área potencialmente inundable de la zona de estudio (Fuente: IDEUy).

## 3.2 Peligrosidad

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

### 3.2.1 Mapas de inundación

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

En el **presente** (Figura 15), se puede observar que las principales zonas afectadas por la inundación son las parcelas urbanizadas frente a las playas de Los Verdes y Real de San Carlos y la zona cercana a

la desembocadura del Arroyo de Caballada. En la zona de la playa Real de San Carlos la incidencia es mayor para los eventos de menor ocurrencia con periodos de 25 a 500 años. En el arroyo ocurre de manera similar, los eventos de menor ocurrencia,  $Tr=5$  años, se propagan en una gran extensión, pero principalmente los de 25 - 500 años son los que más se extienden al interior alcanzando el Balneario Ferrando. También se vería afectado en este escenario el Puerto de Yates en el centro, donde la inundación se extiende para eventos de periodo de 500 años hacia las parcelas urbanizadas, y el Puerto de Colonia, donde también se propagan los eventos de 500 años. En el resto de la costa los eventos de 5 años no llegan a alcanzar la Rambla de las Américas. Se observa que para una amenaza con probabilidad muy baja ( $Tr = 500$  años) de ocurrencia, la extensión de la zona inundable ( $1.714.608 \text{ m}^2$ ) es un 61% mayor respecto al evento de  $Tr=25$  años ( $1.062.288 \text{ m}^2$ ).

En vista de los mapas de inundación, se podría considerar que, en el presente, las únicas zonas susceptibles de inundación serían las parcelas en Real de San Carlos frente a la Playa Los Verdes, el Balneario Ferrando en las cercanías del Arroyo y la zona del centro cercana a los puertos de Yates y Colonia.

En **2050** (Figura 16), y en ausencia de adaptación, la zona inundable se extiende tanto en Real de San Carlos como en la desembocadura del Arroyo la Caballada y alrededores, para periodos entre 25 y 500 años. En el Balneario Ferrando, la inundación avanza para eventos de 500 años, aunque no tanto como se esperaría gracias a una barrera formada entre este y el arroyo que impide que la inundación se propague y se produzca una únicamente una intrusión a través de un punto. Esta se puede observar en el MDT de la Figura 14, donde se dan cotas mayores de 10 m. En la zona del centro y el Puerto de Colonia también avanza la inundación para eventos de periodo de 500 años. A lo largo de la costa avanza la inundación para condiciones medias, sin llegar a avanzar la extensión hacia la Rambla de las Américas. En 2050, la superficie inundable asociada al evento  $Tr=500$  años en el presente no se supera hasta un periodo entre  $Tr=500$  años ( $1.941.392 \text{ m}^2$ ) y  $Tr=100$  años ( $1.494.080 \text{ m}^2$ ). Asimismo, la superficie inundable asociada al  $Tr=500$  años en 2050 aumenta un 13% 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, aumentan ligeramente la frecuencia en 2050. Por otro lado, para un mismo periodo de retorno, los eventos extremos producirán mayor superficie de inundación en 2050 que en el presente.

En **2100** (Figura 17 y Figura 18), se puede observar que la inundación crece para ambos RCP en Real de San Carlos, en la extensión entre el arroyo y el Balneario Ferrando, el Puerto de Yates y el Puerto de Colonia. En Real de San Carlos la extensión crece para todos los eventos para ambos RCP, pero en el RCP8.5 se produce una mayor intrusión de la inundación generada por los eventos de 5 a 25 años. En el Centro frente al Puerto del Yate, el Puerto de Colonia y el Balneario Ferrando, en el RCP 4.5 avanzan principalmente los eventos de periodos de 50 a 500 años y en el RCP 8.5 la penetración es mayor y avanzan también los eventos de periodos de 25 años también. Para el RCP 8.5 se hace más visible el efecto de la barrera que protege el Balneario Ferrando, que hace que la inundación por eventos de mayor ocurrencia,  $Tr=5$  años, avance hasta esa línea y no permite que los eventos de menor ocurrencia

avancen más hacia la zona urbanizada, solamente a través de una intrusión. A lo largo de la costa avanza la inundación para condiciones medias, sin llegar a avanzar la extensión hacia la Rambla de las Américas, excepto frente a la Playa urbana Real de San Carlos, donde atraviesa la rambla y alcanza la zona urbanizada.

En términos de extensión de la superficie inundada, en 2100 y para el RCP4.5 el evento con  $Tr=100$  años ( $1.699.392 \text{ m}^2$ ) tiene la superficie inundable más cercana al evento  $Tr=500$  años en el presente ( $1.714.608 \text{ m}^2$ ). 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  $Tr=50$  años ( $1.675.104 \text{ m}^2$ ).

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., aunque no es muy significativa ya que en esta zona los eventos no aumentan prácticamente su frecuencia en los escenarios futuros.

En 2100, para los casos considerados, el periodo de retorno de 500 años en el presente se divide por un factor de 5 para el RCP4.5 y de 10 para el RCP8.5.

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

Área (m <sup>2</sup> )	Presente	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
		P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
<b>Cond. medias</b>	102.240	163.664	178.992	193.904	242.336	264.976	283.120	280.864	302.816	325.424
<b>Tr=5</b>	693.408	779.568	831.472	873.648	981.296	1.040.896	1.099.568	1.093.728	1.172.512	1.255.584
<b>Tr=10</b>	835.168	980.320	1.008.000	1.038.768	1.143.456	1.202.352	1.261.504	1.255.056	1.332.912	1.410.224
<b>Tr=25</b>	1.062.288	1.183.136	1.211.232	1.240.816	1.341.088	1.397.168	1.451.664	1.445.888	1.517.200	1.598.288
<b>Tr=50</b>	1.203.376	1.325.232	1.354.416	1.382.416	1.479.920	1.534.400	1.596.752	1.589.824	1.675.104	1.760.000
<b>Tr=100</b>	1.344.864	1.467.680	1.494.080	1.521.792	1.636.000	1.699.392	1.759.808	1.753.568	1.848.288	1.965.520
<b>Tr=500</b>	1.714.608	1.882.672	1.941.392	1.999.088	2.194.656	2.301.632	2.400.560	2.390.464	2.511.456	2.620.640

Se comprueba de la observación de los resultados que eventos que en el presente tienen lugar con periodos de retorno de 100 años, en el año 2050 tendrán lugar con una mayor probabilidad (periodo de retorno de 50 años), y que a final de siglo tendrán lugar con periodos de 25 años (escenario RCP4.5) e incluso con periodos de 10 años (escenario RCP8.5).



ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

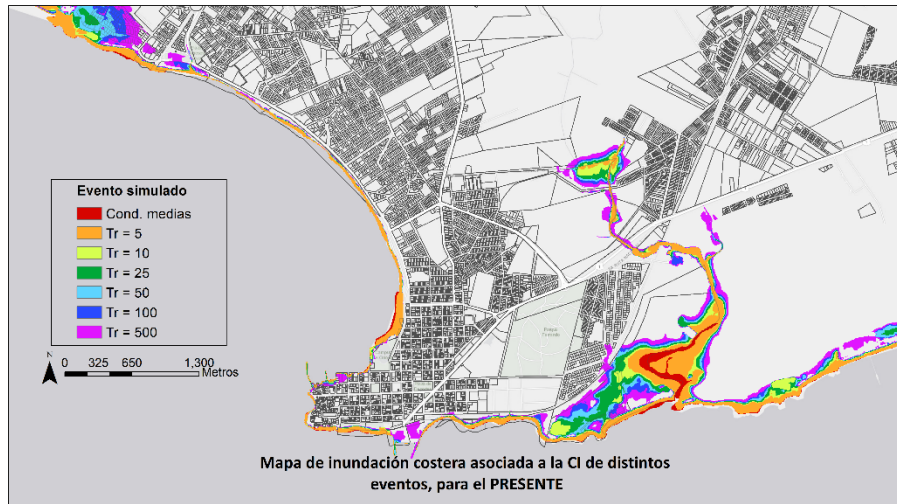


Figura 15. Inundación en el presente para distintos eventos

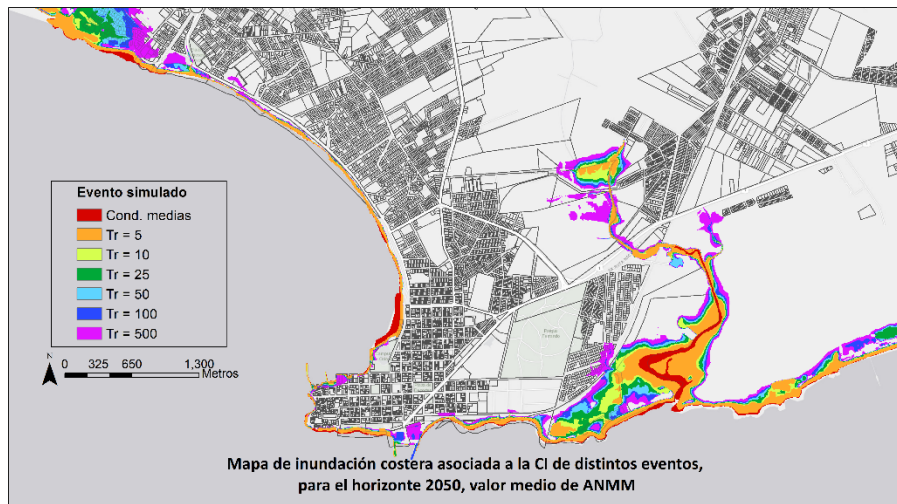


Figura 16. Inundación en 2050 para distintos eventos

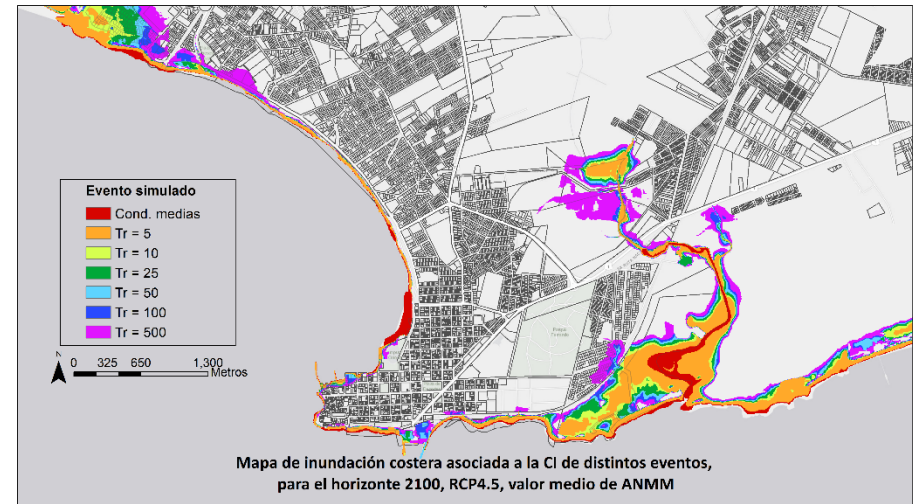


Figura 17. Inundación en 2100 (RCP4.5) para distintos eventos

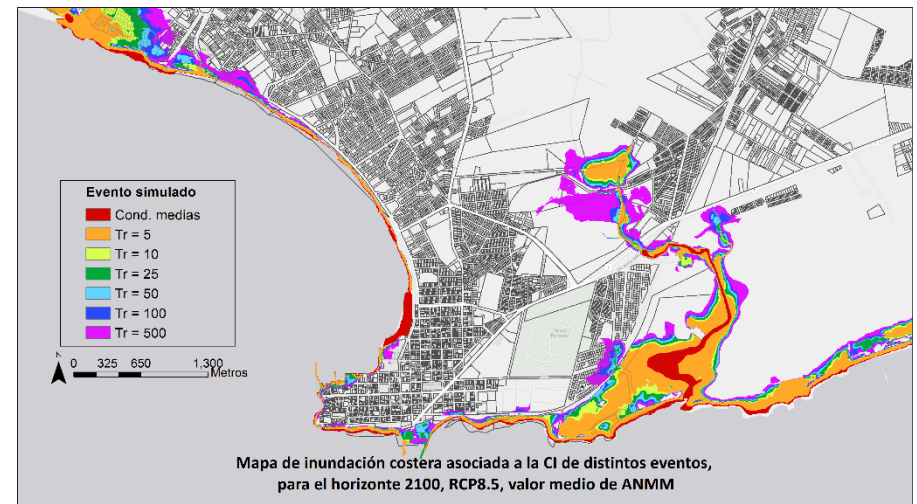


Figura 18. Inundación en 2100 (RCP8.5) para distintos eventos

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 26.400 m<sup>2</sup> y 27.712 m<sup>2</sup>, 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 94.720 m<sup>2</sup> y 117.232 m<sup>2</sup>, respectivamente. En 2050 apenas se observan diferencias en los mapas de inundación, y en 2100 solamente se observan diferencias en la parte alta del arroyo y en la extensión de la inundación a la altura de las playas de Los verdes y Real de San Carlos. La Tabla 2 recoge las diferencias entre las diferentes simulaciones realizadas.

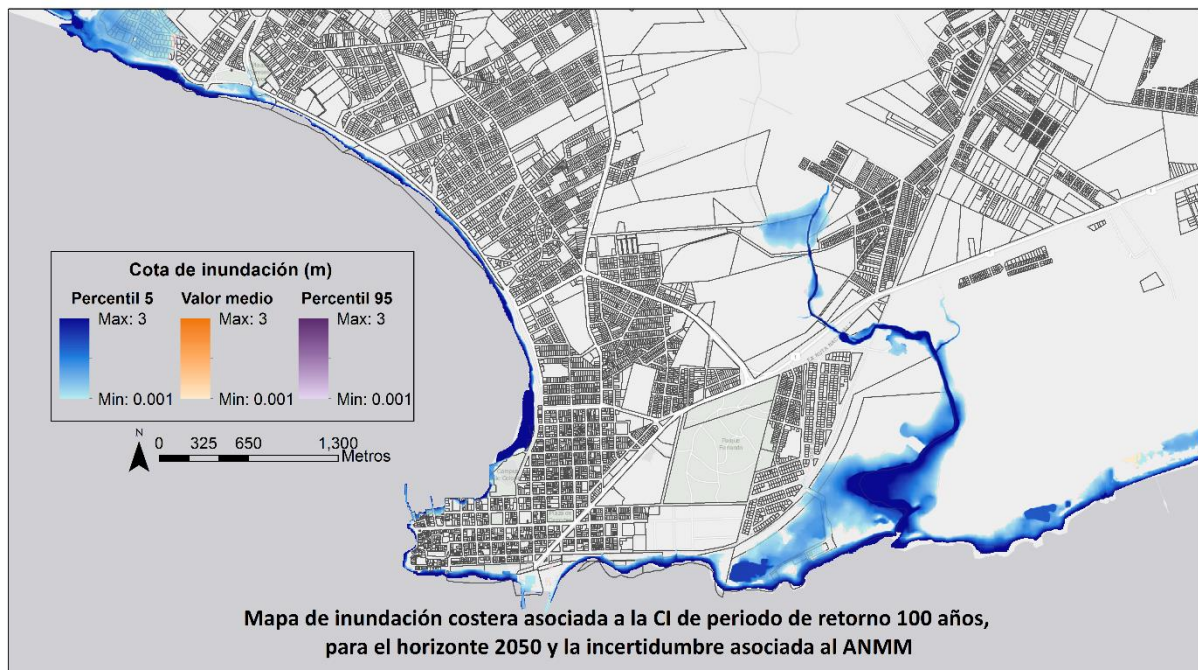


Figura 19. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2050.

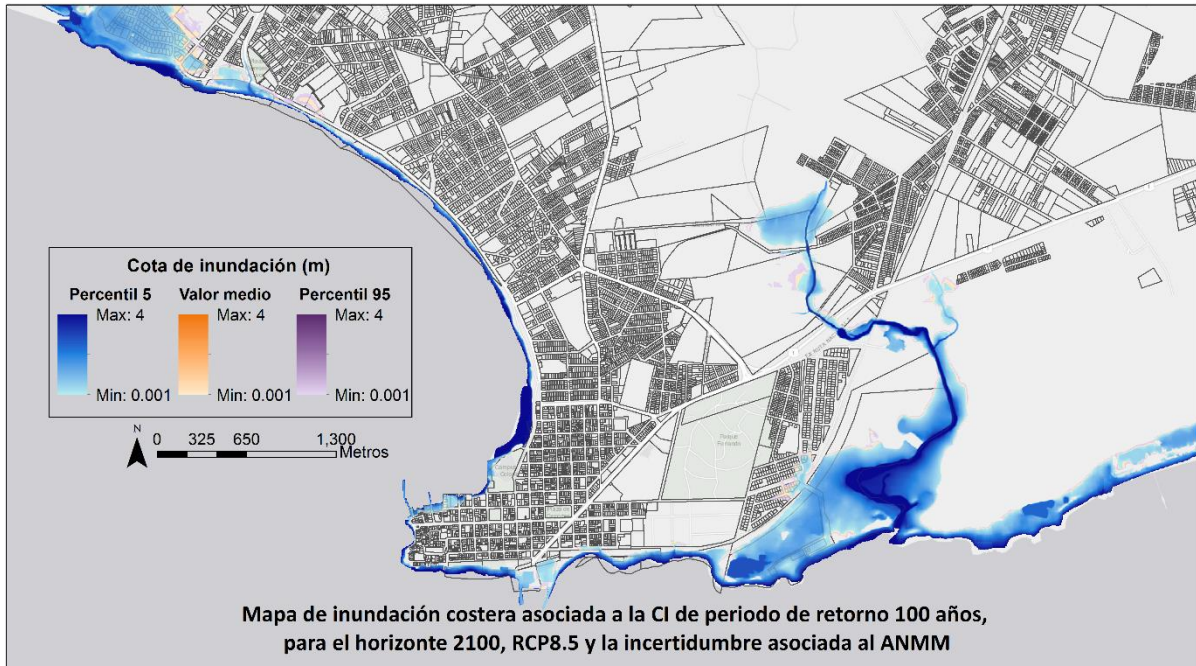


Figura 20. Análisis de la incertidumbre asociada al aumento del nivel medio del mar en 2100 (RCP8.5).

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

	2050 RCP promedio			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
<b>ANMM (m)</b>	0,21	0,26	0,31	0,66	0,80	0,93
<b>Superficie inundada (m<sup>2</sup>)</b>	1.467.680	1.494.080	1.521.792	1.753.568	1.848.288	1.965.520
<b>Cota máx (m)</b>	4,29	4,34	4,39	5,27	5,41	5,54

### 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 (que puede considerarse como un equivalente a la función de daño) de 0,30 metros como para el de 0,01

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

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
<b>PRESENTE</b>	<b>Valor medio</b>	21	24	28	33	38	53	7
<b>2050</b>	Percent. 5%	23	27	32	38	44	60	8
	<b>Valor medio</b>	24	27	33	39	45	61	8
	Percent. 95%	24	28	35	40	46	63	9
<b>2100 (RCP4.5)</b>	Percent. 5%	27	32	39	45	52	81	10
	<b>Valor medio</b>	28	33	41	47	55	95	10
	Percent. 95%	30	36	44	51	58	109	11
<b>2100 (RCP8.5)</b>	Percent. 5%	30	35	43	50	57	108	11
	<b>Valor medio</b>	33	39	47	54	61	132	12
	Percent. 95%	36	42	51	58	69	154	13

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
<b>PRESENTE</b>	<b>Valor medio</b>	24	28	34	40	46	63	9
<b>2050</b>	Percent. 5%	27	32	39	45	53	78	10
	<b>Valor medio</b>	28	33	41	47	54	84	10
	Percent. 95%	29	35	42	48	55	90	10
<b>2100 (RCP4.5)</b>	Percent. 5%	33	39	47	54	61	120	12
	<b>Valor medio</b>	35	41	50	57	64	143	13
	Percent. 95%	37	43	53	60	69	159	13
<b>2100 (RCP8.5)</b>	Percent. 5%	37	43	52	60	68	157	13
	<b>Valor medio</b>	40	47	57	64	83	179	14
	Percent. 95%	44	51	60	71	103	199	16

Se observa cómo la afección a la población es relativamente importante en la zona de estudio, tanto para la situación presente como para los distintos escenarios futuros. En el presente, medio centenar de personas se ven afectadas de forma importante (más de 30 centímetros de altura de agua) para eventos extremos de periodo de retorno elevado (500 años). Esta afección a la población tiene lugar principalmente en el entorno del puerto de Yates, en la zona sur del centro de la ciudad, y en algunos puntos de la zona más situada al norte en la zona de estudio (Real de San Carlos).

En el futuro, las zonas inundadas serán principalmente las mismas, aunque la cantidad de personas afectadas se verá triplicada, produciéndose la misma afección sobre la población (50 personas afectadas) con eventos de periodo mucho menores (25 - 50 años de periodo de retorno). La población afectada con los periodos de retorno más bajos (5 años) se verá incrementada en un 50% en el horizonte 2100.

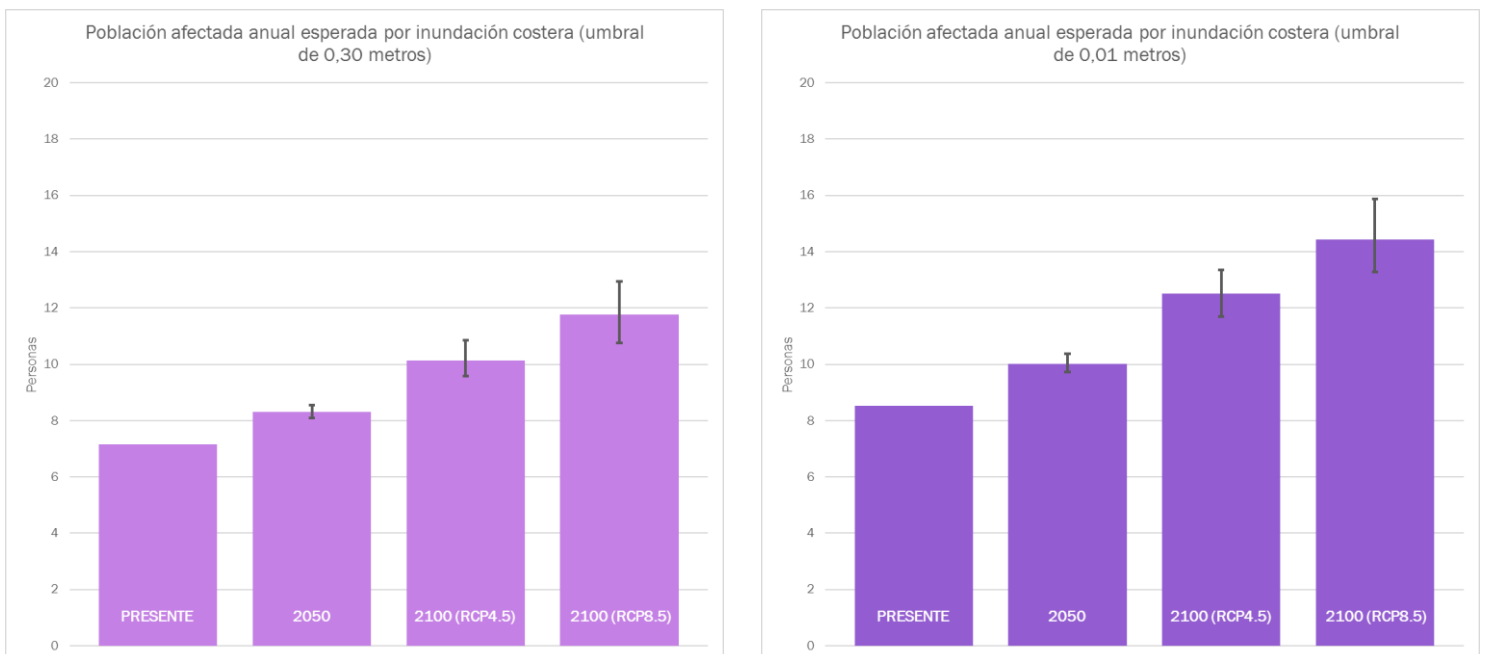


Figura 21. Riesgo de inundación sobre la población, expresado como población anual esperada en número de personas afectadas. A la izquierda, personas afectadas con más de 30 centímetros de altura de agua. A la derecha, personas afectadas con más de 1 centímetro de altura de agua.

Agregando los resultados de los distintos periodos de retorno se puede determinar el nivel de riesgo de la población. Se aprecia de este análisis que el riesgo en los escenarios futuros se verá incrementado en un 20% en el horizonte más próximo (año 2050), y que puede verse incrementado, en ausencia de medidas de adaptación, un 50% a final de siglo en incluso un 70% en el peor de los escenarios posibles (RCP8.5 en 2100).

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
<b>PRESENTE</b>	<b>Valor medio</b>	1.246.017	1.550.904	2.014.543	2.424.204	2.910.949	4.605.814	472.541
<b>2050</b>	Percent. 5%	1.508.569	1.862.034	2.395.229	2.880.479	3.467.812	5.510.113	567.515
	<b>Valor medio</b>	1.576.224	1.940.523	2.494.255	2.997.650	3.622.049	5.752.821	592.020
	Percent. 95%	1.644.853	2.021.337	2.596.602	3.117.020	3.782.641	6.015.618	617.161
<b>2100 (RCP4.5)</b>	Percent. 5%	1.908.163	2.330.961	2.988.196	3.607.093	4.443.097	7.080.763	714.647
	<b>Valor medio</b>	2.067.621	2.521.575	3.224.510	3.925.065	4.850.969	7.809.782	774.623
	Percent. 95%	2.238.800	2.727.596	3.496.589	4.304.384	5.253.514	8.619.675	840.217
<b>2100 (RCP8.5)</b>	Percent. 5%	2.219.338	2.703.472	3.463.957	4.259.451	5.206.316	8.524.228	832.582
	<b>Valor medio</b>	2.473.382	3.010.819	3.890.229	4.820.373	5.819.498	9.701.448	930.969
	Percent. 95%	2.756.766	3.346.691	4.419.661	5.377.145	6.540.235	10.884.321	1.041.093

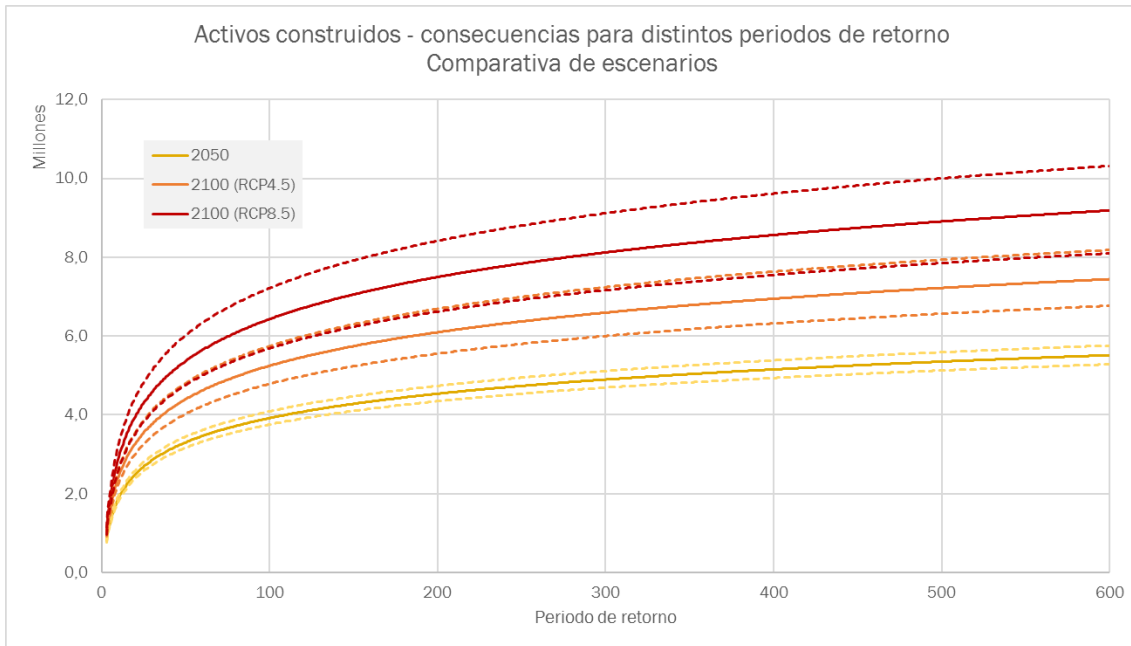


Figura 22. Consecuencias sobre los activos construidos para distintos periodos de retorno para los horizontes 2050 y 2100 (estimación en base a datos catastrales). Las líneas continuas representan el valor medio, mientras que las líneas discontinuas representan los percentiles del 5% y del 95%.

De forma paralela a como ocurre con la población, los principales daños sobre activos construidos por inundación en el escenario presente tienen lugar principalmente en el entorno del puerto de Yates, en la zona sur del centro de la ciudad, y en algunos puntos de la zona más situada al norte en la zona de estudio (Real de San Carlos). Estos daños oscilan entre 1,2 de millones USD para periodos de retorno de 5 años y 4,5 millones USD para periodos de retorno de 500 años.

En el futuro, se prevé que estos daños se dupliquen en el horizonte 2100, superando los 2 millones USD para periodos de retorno de 5 años y llegando a alcanzar los 10 millones USD para periodos de retorno de 500 años.

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

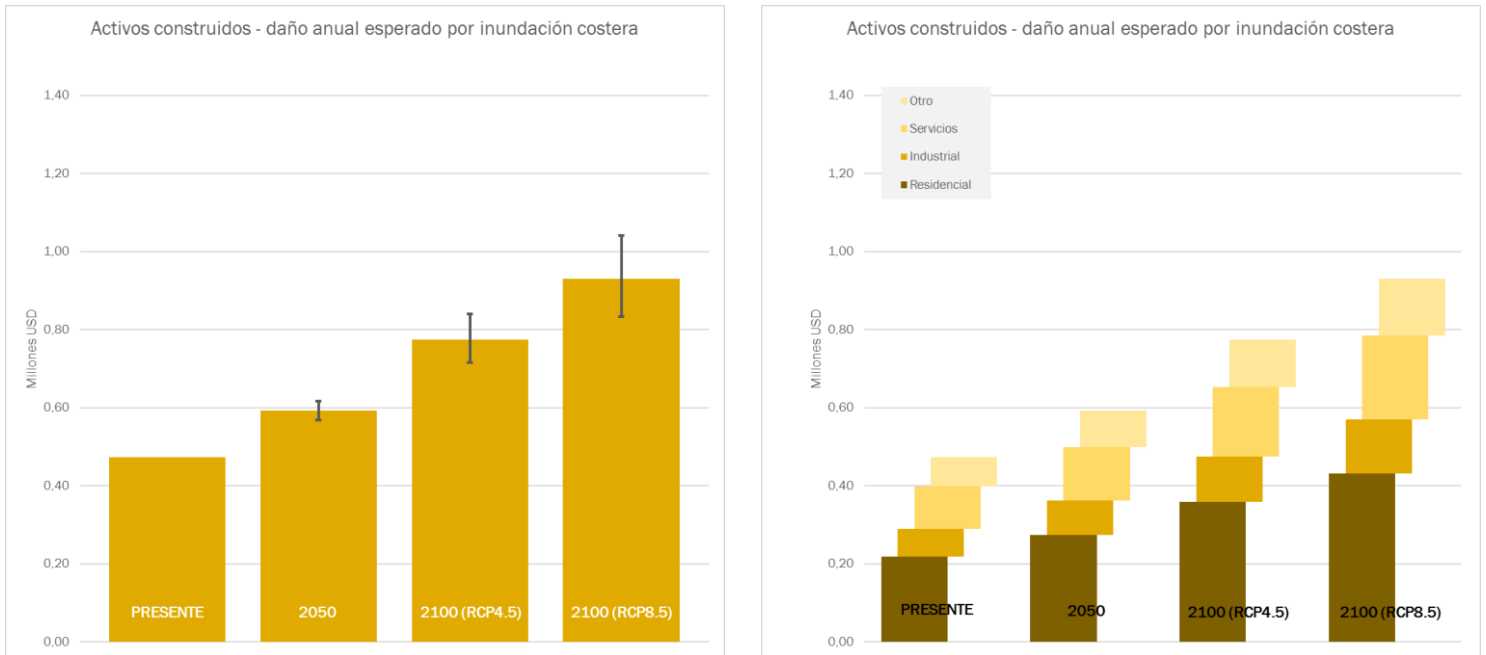


Figura 23. Riesgo de inundación sobre los activos construidos, expresado como daño anual esperado en millones de USD (estimación en base a datos catastrales). A la izquierda, el total de daño esperado. A la derecha, la distinción en categorías de activos construidos (residencial, industrial, servicios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

De nuevo, agregando los resultados de los distintos periodos de retorno se puede determinar el nivel de riesgo de los activos construidos. Se aprecia de este análisis que el riesgo en los escenarios futuros se verá incrementado en un 25% en el horizonte más próximo (año 2050), y que puede verse incrementado, en ausencia de medidas de adaptación, un 60% a final de siglo en incluso un 100% en el peor de los escenarios posibles (RCP8.5 en 2100).

En la Figura 25 se detalla también la tipología de los activos dañados, observándose que el grueso de las edificaciones dañadas es de tipo residencial (aproximadamente un 50%), siendo los activos de servicios los segundos en orden de magnitud en cuanto a daños experimentados.



## 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 39,1 millones de USD, en la franja entre los 100 y 200 metros de 60,7 millones de USD, y en la zona comprendida entre los 200 y 300 metros cercanos a la playa de 65,8 millones de USD.

Considerando el valor de estas edificaciones y los factores de daño descritos anteriormente, se ha estimado un valor total de protección de las playas de Colonia es igual a 28 millones de USD anuales (2 millones de USD anuales por hectárea), lo que sitúa a la playa en el puesto 17 (sobre 212) en el ranking de playas uruguayas en cuanto a su valor de protección (en cuanto a valor agregado y puesto 28 en valor por hectárea).

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

Es necesario añadir que esta estimación del valor de protección es en todo caso una cota inferior. En el caso concreto de la zona de estudio de Colonia, las playas comprendidas protegen una infraestructura de transporte (Rambla de las Américas) que sería la primera que sufriría importantes daños en caso de pérdida de la playa. La cuantificación de estas infraestructuras no se ha realizado (no sólo hablaríamos de valor constructivo, sino de todo el servicio de transporte y movilidad), pero sin duda incrementaría el valor de protección proporcionado por la playa.

### **Valor recreativo**

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

La aplicación de este procedimiento nos permite obtener un valor representativo y único para cada playa, resultando para el caso concreto de las playas de Colonia que el valor recreativo de las mismas es de 9,1 millones de USD anuales (658.000 USD por hectárea). Atendiendo a este resultado, la playa se sitúa en el puesto 92 (sobre 212) con respecto al total de las playas uruguayas atendiendo a su valor total recreativo (alrededor de la mitad que el valor medio del país, situado en 20 millones USD anuales), y en el puesto número 83 si la clasificación se realiza considerando el valor por hectárea (por debajo de la media de las playas de Uruguay, que ronda el millón de USD anuales por hectárea).

En términos generales, se puede concluir que el principal servicio proporcionado por la playa en este caso es el de protección, triplicando el valor del servicio de protección, y que el valor total de la playa se estima en más de 37,4 millones de USD anuales, 2,68 millones de USD anuales por hectárea.

#### **4.1.2 Exposición física**

Para el estudio de la evolución morfodinámica de las playas de Colonia, 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 abierta de Colonia se ha discretizado en un total de 21 transectos (Figura 24) en los que se aplica un modelo de equilibrio que considera el ANMM. A partir de la evolución temporal en cada transecto, se reconstituye la línea de costa en la playa.



Figura 24. Transectos de estudio en la playa de Colonia

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: abierta (este de Colonia) [220 - 291°], cerradas (sur de Colonia) [136 - 220°]
- Pendiente de la zona de rompientes: 0,017
- Tamaño de sedimento (D50): 0,3 milímetros
- Ancho de playa seca: [0 - 10] metros

## 4.2 Peligrosidad

En este estudio, la evolución de la línea de costa en las playas de Colonia se ha simulado con un modelo de 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.

Debido a su ubicación en la zona interna del estuario del Río de la Plata, las playas de Colonia de Sacramento se enmarcan en una unidad fisiográfica amplia y compleja. 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 zona de playas al oeste de Colonia de Sacramento. Se ha considerado que la morfodinámica del conjunto de playas de Colonia de Sacramento 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 erosionadas en diferentes horizontes temporales asociados a diferentes periodos de retorno

En la Figura 25 se representa el retroceso estructural de la línea de costa en 2050 y 2100 debido al ANMM y la incertidumbre asociada. En la Figura 26 se representa una imagen ampliada de la playa abierta en la que se aprecia que la línea de costa en el horizonte 2100 bajo un escenario RCP8.5 llega al límite con las infraestructuras al borde de la playa llegando a desaparecer la playa seca. En algunos tramos de la playa la anchura de arena seca es muy reducida incluso en el presente. El límite de playa seca inicial se ha definido en el inicio de la zona de vegetación.

En la Figura 27 se muestra el retroceso de la playas encajadas situadas al sur de la ciudad. En la imagen se pone de manifiesto la completa desaparición de la zona de arena seca por efecto del ANMM en el horizonte 2100 RCP8.5 (línea morada).

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA



Figura 25. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en la playa de Colonia de Sacramento. La línea marrón representa la línea de costa inicial, las líneas verdes (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 Colonia de Sacramento. 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. CIUDAD DE COLONIA



Figura 27. Retroceso estructural de la línea de costa debido al ANMM en 2050 y 2100 en las playas encajadas de Colonia de Sacramento. 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.

En la Tabla 7 se muestra el retroceso estructural en las playas abiertas de Colonia. Se aprecia que el retroceso ligado al ANMM en el año 2050 se encuentra en un intervalo entre 4,49 y 6,03 metros, mientras que en el año 2100 (RCP8.5), la playa se erosionaría de entre 17,42 y 18,00 metros. A partir de los retrocesos en la línea de costa calculados en los transectos, se ha estimado el área de playa erosionada debido al ANMM, en 2050 y 2100.

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

Retroceso estructural (metros)	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
	4,49	5,26	6,03	13,25	15,21	17,16	17,42	18,00	18,00

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

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 cada transecto. En 2050 se espera una pérdida permanente de la superficie de playa entre 12.811 y 17.281 m<sup>2</sup>, mientras que en 2100 puede llegar hasta 49.196 m<sup>2</sup>.

Tabla 8. Área erosionada (m<sup>2</sup>) debido al ANMM en la playa abierta de Colonia.

Área erosionada (m <sup>2</sup> )	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
	12.811	15.049	17.281	35.066	39.834	43.577	43.995	47.105	49.196

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 5% 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 30% de la superficie.

Tabla 9. Área erosionada (m<sup>2</sup>) asociada a distintos periodos de retorno en la playa abierta de Colonia.

Área erosionada (m <sup>2</sup> )	Presente	2050			2100 RCP4.5			2100 RCP8.5		
		P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%	P5%	Media	P95%
Tr=5	7.340	17.898	21.064	24.249	31.463	36.664	41.399	36.481	41.815	45.511
Tr=10	9.801	21.016	24.423	27.682	36.218	41.566	45.200	42.561	46.453	48.691
Tr=25	12.869	24.472	27.878	31.042	41.122	45.129	47.563	46.765	49.433	51.308
Tr=50	15.114	26.670	29.909	33.202	43.610	46.668	48.716	48.480	51.042	51.366
Tr=100	17.318	28.392	31.707	35.101	45.052	47.772	49.633	49.925	51.366	51.366
Tr=500	22.320	31.720	35.157	38.690	47.367	49.424	50.913	51.366	51.366	51.366

### 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 0,1 y 0,9 millones de USD anuales para eventos extremos de periodos de retorno entre los 5 y los 500 años de periodo de retorno (Tabla 10).

ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

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
<b>PRESENTE</b>	<b>Valor medio</b>	103.766	185.040	318.982	440.009	577.699	959.607	58.765
<b>2050</b>	Percent. 5%	617.057	850.767	1.153.560	1.370.099	1.552.713	1.938.084	249.041
	<b>Valor medio</b>	854.598	1.148.950	1.496.961	1.723.085	1.936.426	2.380.742	332.781
	Percent. 95%	1.132.663	1.476.020	1.856.145	2.123.372	2.373.238	2.883.412	426.970
<b>2100 (RCP4.5)</b>	Percent. 5%	1.906.743	2.526.728	3.257.229	3.663.315	3.909.523	4.321.625	725.861
	<b>Valor medio</b>	2.589.268	3.327.917	3.922.988	4.195.151	4.395.950	4.705.159	932.855
	Percent. 95%	3.301.224	3.935.293	4.357.494	4.571.385	4.744.972	4.992.892	1.115.554
<b>2100 (RCP8.5)</b>	Percent. 5%	2.563.526	3.489.259	4.212.580	4.527.221	4.800.968	5.082.178	9.63.619
	<b>Valor Medio</b>	3.367.874	4.156.428	4.706.945	5.018.218	5.082.178	5.082.178	1.167.315
	Percent. 95%	3.989.651	4.566.650	5.070.761	5.082.178	5.082.178	5.082.178	1.308.911

Estas cantidades se verán incrementadas con los efectos del cambio climático, de tal forma que los 0,1 millones que se experimentan en el presente para eventos de periodo de retorno de 5 años se multiplicarán por más de 39, sobrepasando los 3,9 millones de USD anuales en el peor de los escenarios posibles, y que los 0,9 millones de un periodo de retorno de 500 años en la actualidad podrán multiplicarse por 5, llegando a alcanzarse daños por valor de 5 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)
<b>2050</b>	Percent. 5%	316.112
	<b>Valor medio</b>	436.224
	Percent. 95%	575.207
<b>2100 (RCP4.5)</b>	Percent. 5%	2.368.443
	<b>Valor medio</b>	3.056.377
	Percent. 95%	3.657.780
<b>2100 (RCP8.5)</b>	Percent. 5%	3.728.207
	<b>Valor medio</b>	4.273.974
	Percent. 95%	4.661.887



ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. CIUDAD DE COLONIA

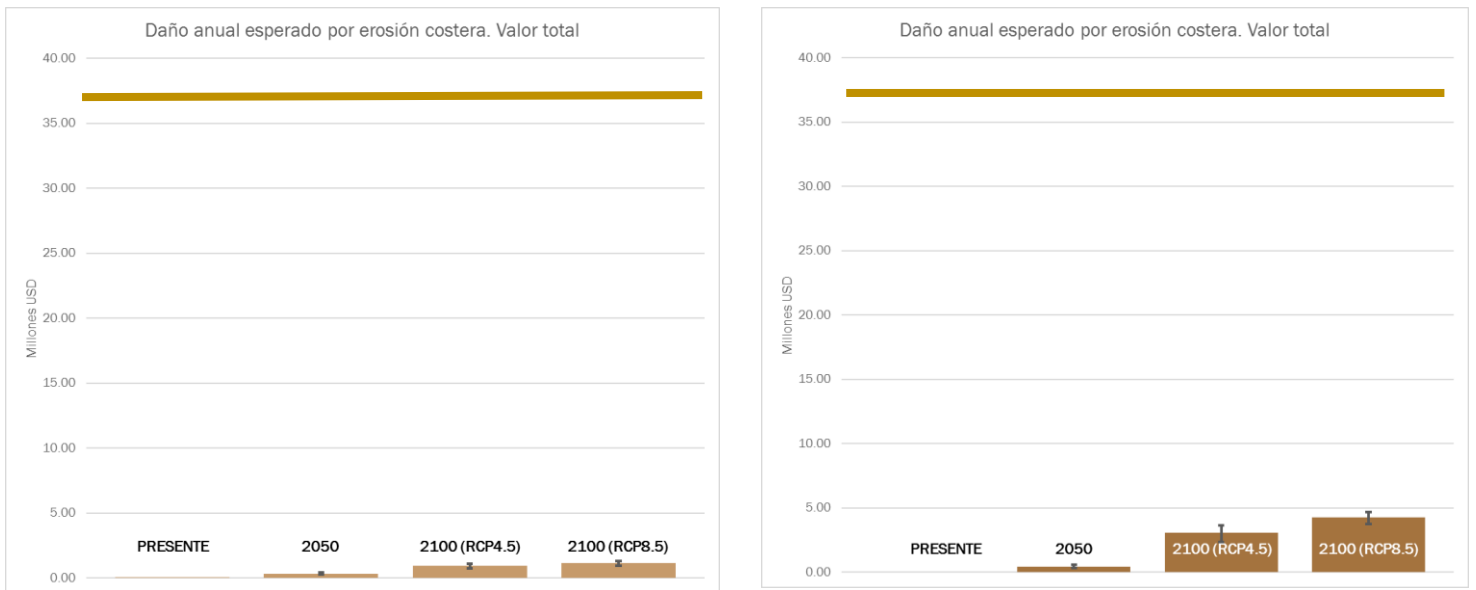


Figura 28. Daño anual esperado por erosión sobre el valor total de la playa (obtenido de los servicios de protección y recreativo proporcionados por la playa). La figura de la izquierda representa el daño por eventos extremos de erosión, mientras que la figura de la derecha el daño por el retroceso estructural. En ambos casos, la línea continua representa el valor total anual de la playa.

El daño anual esperado, actualmente en el entorno de los 58.000 USD anuales, se multiplicará por 6 para el año 2050 (hasta los 330.000 USD anuales) y al menos se multiplicará por 12 para el año 2100 (725.000 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 Colonia debido al ANMM (Tabla 11) añadirá un daño extra que se prevé alcance los 436.000 USD anuales en 2050 y que variará entre los 2,3 y los 4,6 millones de USD anuales en 2100, por lo que es la aparición de esta erosión estructural la que realmente introduce una componente de riesgo importante, con respecto a las consecuencias debidas a eventos extremos.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 3,20 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 3,84 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 2,68 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 11,92 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 14,68 millones de USD en el escenario RCP8.5 (en ambos casos, percentil 50%, tasa de descuento del 4%)

## 5 CONCLUSIONES

La ciudad de Colonia de Sacramento (Intendencia de Colonia) agrupa una serie de playas urbanas, se analizan (de oeste a este) las playas Balneario Municipal, El Álamo, Las Delicias, Rowling, Honda y Ferrando. Las playas de Rowling, Honda y Ferrando son playas encajadas, con longitudes de entre 300 y 700 metros de longitud, situadas en el extremo sur de la ciudad de Colonia de Sacramento. Por otro lado, la zona de playa conformada por las playas de Balneario Municipal, El Álamo y Las Delicias tiene una longitud aproximada de 3.000 metros, y está situada en la zona noroeste de la zona de estudio.

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 zona de playa formada por las playas Balneario Municipal, El Álamo y Las Delicias, se encuentra confinada en su extremo sureste por la punta de Colonia de Sacramento y el muelle de Yates, mientras que no posee confinamiento, desde el punto de vista de transporte de sedimentos, en su extremo noroeste.
- El conjunto formado por estas playas presenta la forma en planta típica de “gancho” o “medio corazón”, gobernada por el patrón de difracción generado por la citada punta, y en última instancia, por el dique del muelle de Yates.
- Los espigones ubicados a lo largo de la playa no evitan el paseo de arena de un compartimento a otro, pero condicionan la forma de la playa seca. La mayor anchura de la playa seca en el lado este de los espigones permite concluir que existe un transporte de este a oeste.
- La playa seca es inexistente en gran parte de la playa, y se concentra en las zonas adosadas a los espigones anteriormente citados. En algunas zonas se observan escolleras y estructuras de protección del paseo y carretera litoral, que señalan que en dichas zonas el oleaje ha alcanzado y dañado el muro de contención de la carretera.

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 las playas de Colonia de Sacramento 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

Las principales zonas afectadas por inundación costera son las parcelas urbanizadas frente a las playas de Los Verdes y Real de San Carlos y la zona cercana a la desembocadura del Arroyo de Caballada. También aparece inundación destacable en el entorno de los puertos de Yates y Colonia.

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

menor probabilidad de ocurrencia. En 2050 la superficie inundada por un evento con periodo entre 500 y 100 años tendrá una extensión similar a la producida en el presente por un evento de periodo de 500 años. Las extensiones de inundación para periodos de 500 años en el presente se darán en 2100 para el RCP4.5 con más frecuencia para periodos de 100 años y en el RCP8.5 para periodos de 50 años. Mostrando así también la influencia de la mitigación.

En el presente, medio centenar de personas se ven afectadas de forma importante (más de 30 centímetros de altura de agua) para eventos extremos de periodo de retorno elevado (500 años). En el futuro la cantidad de personas afectadas se verá triplicada, produciéndose la misma afección sobre la población (50 personas afectadas) con eventos de periodo mucho menores (25-50 años de periodo de retorno). La población afectada con los periodos de retorno más bajos (5 años) se verá incrementada en un 50% en el horizonte 2100.

Los daños sobre activos construidos en el presente daños oscilan entre 1,2 de millones USD para periodos de retorno de 5 años y 4,5 millones USD para periodos de retorno de 500 años. En el futuro, se prevé que estos daños se dupliquen en el horizonte 2100, superando los 2 millones USD para periodos de retorno de 5 años y llegando a alcanzar los 10 millones USD para periodos de retorno de 500 años.

- Riesgo de erosión costera

El principal servicio proporcionado por la playa es el de protección, triplicando el valor del servicio de protección. El valor total de la playa se estima en más de 37,4 millones de USD anuales, 2,68 millones de USD anuales por hectárea, ligeramente por debajo de la media del país (3,4 millones de USD anuales por hectárea).

En el futuro más próximo (horizonte 2050), se experimentarán durante temporales retrocesos mayores que a los que se experimentan en el presente, pudiendo llegar a duplicarse. Debido al retroceso estructural de la línea de costa, se perderán de forma permanente entre 4,5 y 6 metros de playa en 2050, y entre 13 y 18 metros de playa en 2100. Esto se ha traducido en un daño que se prevé alcance los 436.000 USD anuales en 2050 y que variará entre los 2,3 y los 4,6 millones de USD anuales en 2100.

El valor acumulado de estos daños desde el presente hasta el año (2050), se estima en unos 3,20 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 3,84 millones de USD si la tasa de descuento es del 3% y los 2,68 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 11,92 millones de USD para el escenario RCP4.5, y puede llegar a alcanzar los 14,68 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.