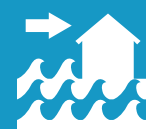


NAP Costas

Plan Nacional de
Adaptación Costera
de Uruguay

Documento preparatorio

**Informe técnico sobre la metodología
en el proyecto. Escala nacional.**





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 EVALUAR LOS
IMPACTOS, LA VULNERABILIDAD Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN
LA ZONA COSTERA DE URUGUAY**

**ENTREGABLE 4.2. INFORME TÉCNICO SOBRE LA METODOLOGÍA APLICADA EN EL PROYECTO.
ESCALA NACIONAL**

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: Faro de José Ignacio. Departamento de Maldonado. Autor Lorisstragliotto, bajo licencia CC BY-SA 3.0.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| ÍNDICE..... | II |
| RESUMEN EJECUTIVO..... | 1 |
| 1. Introducción | 3 |
| 2. Metodología | 4 |
| 2.1. Nivel de resolución del estudio | 4 |
| 2.2. Marco de riesgo y sus componentes..... | 4 |
| 2.3. Escenarios de cambio climático y proyecciones climáticas relevantes..... | 5 |
| 3. Análisis de la Inundación Costera..... | 7 |
| 3.1. Resumen de la metodología propuesta | 7 |
| 3.2. Análisis de la peligrosidad (amenaza) | 8 |
| <u>3.2.1. Bases de datos de reanálisis histórico</u> | 8 |
| <u>3.2.2. Bases de datos de proyecciones</u> | 9 |
| <u>3.2.3. Cota de inundación de las dinámicas costeras</u> | 12 |
| <u>3.2.4. Cota de inundación de las dinámicas fluviales</u> | 17 |
| <u>3.2.5. Estudio de extremos</u> | 19 |
| <u>3.2.6. Escenarios de inundación costera</u> | 20 |
| 3.3. Análisis de la Exposición | 22 |
| <u>3.3.1. Población</u> | 23 |
| <u>3.3.2. Activos socioeconómicos</u> | 23 |
| <u>3.3.3. Ecosistemas</u> | 24 |
| 3.4. Análisis de la Vulnerabilidad..... | 24 |
| <u>3.4.1. Población</u> | 25 |
| <u>3.4.2. Activos socioeconómicos</u> | 26 |
| <u>3.4.3. Ecosistemas</u> | 28 |
| 3.5. Modelado del Impacto | 28 |
| <u>3.5.1. Modelo de inundación</u> | 28 |
| <u>3.5.2. Bases de datos de exposición física</u> | 32 |
| <u>3.5.3. Mallas de cálculo</u> | 33 |
| 3.6. Análisis del Riesgo | 35 |
| <u>3.6.1. Población</u> | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.6.2. <u>Activos socioeconómicos</u> | 38 |
| 3.6.3. <u>Ecosistemas</u> | 38 |
| 3.7. Resumen de resultados del Riesgo de Inundación Costera | 39 |
| 4. Análisis de la Erosión | 40 |
| 4.1. Resumen de la metodología utilizada | 40 |
| 4.2. Análisis de la Peligrosidad (amenaza) | 41 |
| 4.2.1. <u>Bases de datos de reanálisis y proyecciones</u> | 41 |
| 4.2.2. <u>Escenarios de erosión costera</u> | 42 |
| 4.3. Análisis de la Exposición | 44 |
| 4.3.1. <u>Valor de protección</u> | 46 |
| 4.3.2. <u>Valor recreativo</u> | 47 |
| 4.4. Análisis de la Vulnerabilidad..... | 48 |
| 4.5. Modelado del Impacto | 49 |
| 4.5.1. <u>Módulo de transporte transversal</u> | 49 |
| 4.5.2. <u>Módulo de transporte longitudinal</u> | 51 |
| 4.5.3. <u>Evaluación integrada de los cambios en la línea de costa</u> | 52 |
| 4.5.4. <u>Bases de datos de exposición física</u> | 54 |
| 4.5.5. <u>Resultados</u> | 55 |
| 4.5.6. <u>Calibración del modelo</u> | 58 |
| 4.6. Análisis del Riesgo | 59 |
| 4.7. Resumen de resultados del Riesgo de Erosión Costera | 62 |
| 5. Referencias..... | 63 |

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento es uno de los productos resultado 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 CTCN, y recoge la metodología utilizada para la evaluación del riesgo de inundación y erosión en la costa de Uruguay a escala nacional, con una cobertura superior a los 700 km. Los resultados de la aplicación de dicha metodología pueden encontrarse en el Entregable D4.1 (IHCantabria, 2019b).

La metodología se sustenta sobre el marco general establecido en IPCC (2014) que, para un impacto o conjunto de impactos determinados, evalúa el riesgo sobre el sistema socioeconómico y natural de la costa, como la integración de tres componentes: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. El riesgo puede evaluarse para el presente o para horizontes futuros para diferentes escenarios de cambio climático.

La peligrosidad considera los cambios en el nivel medio del mar, la marea meteorológica, la marea astronómica, el oleaje y el caudal de los ríos combinando la variabilidad de largo plazo con los eventos extremos para diferentes periodos de retorno. Aunque estos cambios pueden inducir otros impactos, en esta metodología se hace la hipótesis de que los cambios en la peligrosidad inducidos por el cambio climático van a generar dos impactos principales: inundación y erosión. Más aún, la metodología no considera otras amenazas de origen antrópico que pueden producir estos mismos impactos.

Una vez evaluada la peligrosidad, el medio afectado se caracteriza de manera geoespacial a través de la exposición que incluye la población; los activos socioeconómicos (divididos en residencial, industrial y servicios); y las infraestructuras críticas. Para el sistema natural, se considera el efecto sobre los activos naturales que tienen algún grado de nivel de protección.

En el caso concreto del impacto de inundación, los mapas que muestran la extensión de la mancha de inundación para los diferentes escenarios y condiciones se cruzan con la población y activos anteriormente expuestos, que son afectados con funciones de daño o vulnerabilidad, obteniéndose las consecuencias o daños para diferentes niveles de intensidad de la peligrosidad. Por tanto, para la inundación el riesgo se expresa en términos económicos o de personas afectas. Los resultados se muestran a nivel nacional o por intendencia, aunque toda la información se calcula con una resolución espacial mucho mayor (los mapas de inundación tienen una resolución de 4x4 metros).

Para la erosión se evalúan sus consecuencias en términos económicos, por su efecto sobre los servicios de protección frente a la inundación y sobre los servicios recreativos o turísticos que ofrecen las playas.

En la metodología para el cálculo de la erosión se considera tanto la erosión de largo plazo producida por el aumento del nivel medio del mar, como la de corto plazo generada por eventos extremos de erosión. Los resultados se plasman a través de mapas con el retroceso de la línea de costa ante diferentes horizontes y escenarios.

Para obtener las consecuencias económicas, la exposición y vulnerabilidad de los servicios de protección y recreativo se evalúan con diferentes metodologías. La erosión ha sido calculada en transectos separados un kilómetro.

La selección de activos, funciones de daños, escenarios, horizontes temporales, etc. se ha realizado de mutuo acuerdo con las administraciones uruguayas involucradas en el estudio, que además han aportado las bases de datos relevantes para la caracterización de la exposición. Algunas de las bases de datos necesarias para caracterizar la peligrosidad han sido obtenidas gracias al trabajo elaborado por el IMFIA en el marco de este proyecto. Tratándose de un análisis a escala nacional, la metodología aquí planteada es una de las más avanzadas y, en nuestro conocimiento, nunca previamente aplicada a escala nacional. Esto es debido a la combinación de información de base de alta resolución con modelos de impactos de procesos y con una aproximación probabilística, lo que contribuye a reducir significativamente las incertidumbres en comparación con otros estudios a escala nacional que se basan usualmente en la aplicación e indicadores y aproximaciones en la caracterización de impactos, y demás componentes del riesgo.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas costeros y las zonas bajas (elevación <10 metros, McGranahan et al., 2007) experimentarán a lo largo del siglo XXI un aumento en los impactos adversos debido a la sumergencia, inundación ante eventos extremos, y erosión por aumento del nivel medio del mar relativo. Se espera que el aumento de la población y de los activos, así como de la presión humana sobre los ecosistemas costeros debido al crecimiento demográfico, el desarrollo económico y la urbanización, incremente el riesgo de los sistemas costeros (IPCC, 2014).

Bajo esta perspectiva, están emergiendo una amplia gama de marcos metodológicos para la evaluación socioeconómica de los riesgos y consecuencias de la inundación y erosión a diferentes escalas. La metodología clásica aplicada al análisis de riesgos meteorológicos extremos ha derivado en un marco conceptual generalizado (IPCC, 2014) basado en la combinación de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad.

No existe un método único para evaluar cada componente del riesgo, y las aproximaciones existentes son fuertemente dependientes de la disponibilidad de datos, de la escala espacial, de la estrategia de modelado del impacto considerado y del tipo de análisis estadístico requerido, entre otros. Además, la gestión y la ordenación del territorio tienen lugar a escala regional, lo que se traduce en la necesidad de la integración de los riesgos y las consecuencias en un área determinada. A este respecto, el desafío se encuentra principalmente en el tratamiento de un conjunto de sectores socioeconómicos de forma integrada, especialmente si estos sectores tienen una naturaleza diferente.

En este documento se presenta una estrategia de evaluación del riesgo asociado al cambio climático que combina el análisis de las amenazas a las que está expuesta la costa uruguaya con la exposición y la vulnerabilidad de los sistemas costeros. Esta estrategia permite identificar las zonas con mayor riesgo potencial de inundación y erosión costera, los subsistemas naturales y socioeconómicos más vulnerables y las zonas con mayor necesidad de adaptación.

Este documento incluye metodologías que se corresponden con investigaciones realizadas por IHCantabria en el marco de trabajo de distintos proyectos nacionales e internacionales.

2. METODOLOGÍA

Este documento desarrolla una metodología de evaluación de los efectos del cambio climático a escala nacional en la costa de Uruguay. La metodología utiliza bases de datos climáticos de alta resolución, modelos numéricos y formulaciones semi-empíricas para evaluar la peligrosidad y obtener los impactos de inundación y erosión, que luego combina con información de exposición y vulnerabilidad para obtener el riesgo de inundación y erosión en la costa uruguaya. De acuerdo con la administración uruguaya, la metodología desarrollada considera los horizontes temporales: clima presente, 2050 y 2100; y dos escenarios de cambio climático: un escenario intermedio (RCP4.5) y un escenario con nivel alto de emisiones (RCP8.5). Si embargo, la metodología es aplicable para cualquier otro escenario y en cualquier horizonte temporal futuro, siempre que se cuente con la información de base necesaria.

2.1. Nivel de resolución del estudio

La metodología descrita en este documento tiene aplicación a escala nacional. La diferencia entre un estudio de riesgo a escala nacional y un estudio de riesgo a escala local radica en la aproximación utilizada para la determinación del riesgo. En un estudio a escala nacional (orden de magnitud de varios cientos de kilómetros) es importante que haya equilibrio entre el coste computacional, la resolución espacial de la información de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad y la precisión de los resultados. A grandes rasgos, en escalas nacionales o regionales la información climática suele analizarse mediante indicadores climáticos o indicadores de la variabilidad climática, y para la caracterización de los impactos suele emplearse índices representativos del impacto, formulaciones semi-empíricas o modelos simplificados. En un estudio a escala local (orden de magnitud de decenas de metros o pocos kilómetros) es factible trabajar con series temporales completas de las variables climáticas que inducen los impactos y utilizar modelos numéricos de procesos de alta resolución (y elevado coste computacional) para la caracterización a escala local de los impactos. Sin embargo, esta segunda aproximación es solamente coherente si la resolución de la información de la exposición y vulnerabilidad es equivalente.

Para este estudio y debido a la alta resolución de las bases de datos disponibles, tanto de peligrosidad (bases de datos climáticas) como de exposición física (modelo digital de terreno) y socioeconómica (población y catastro), se plantea una metodología que supone un importante esfuerzo en la caracterización de los impactos a escala nacional, que aplica métodos generalmente utilizados a escala local. No obstante, la gran extensión del área de estudio (más de 700 km de costa) hace que sea necesario asumir algunas hipótesis y simplificaciones de trabajo.

2.2. Marco de riesgo y sus componentes

El análisis del riesgo que se plantea en esta metodología reproduce el marco general de riesgo propuesto por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que se introdujo por primera vez para el análisis de riesgos de desastres (IPCC, 2012), y luego se adaptó para los estudios de riesgo de cambio climático (IPCC, 2014). El IPCC describe el riesgo de impactos relacionados con el clima como el resultado de la interacción de la peligrosidad asociada al clima (incluyendo la variabilidad climática a diferentes escalas temporales) con la

vulnerabilidad y exposición de los sistemas humanos y naturales. Los cambios en el sistema climático y los procesos socioeconómicos, incluidas la adaptación y mitigación, son impulsores de cambios en la peligrosidad, exposición y vulnerabilidad (Figura 1). Este enfoque para el análisis de riesgos se está convirtiendo en el método más utilizado para evaluar los impactos del cambio climático y determinar las opciones de adaptación.

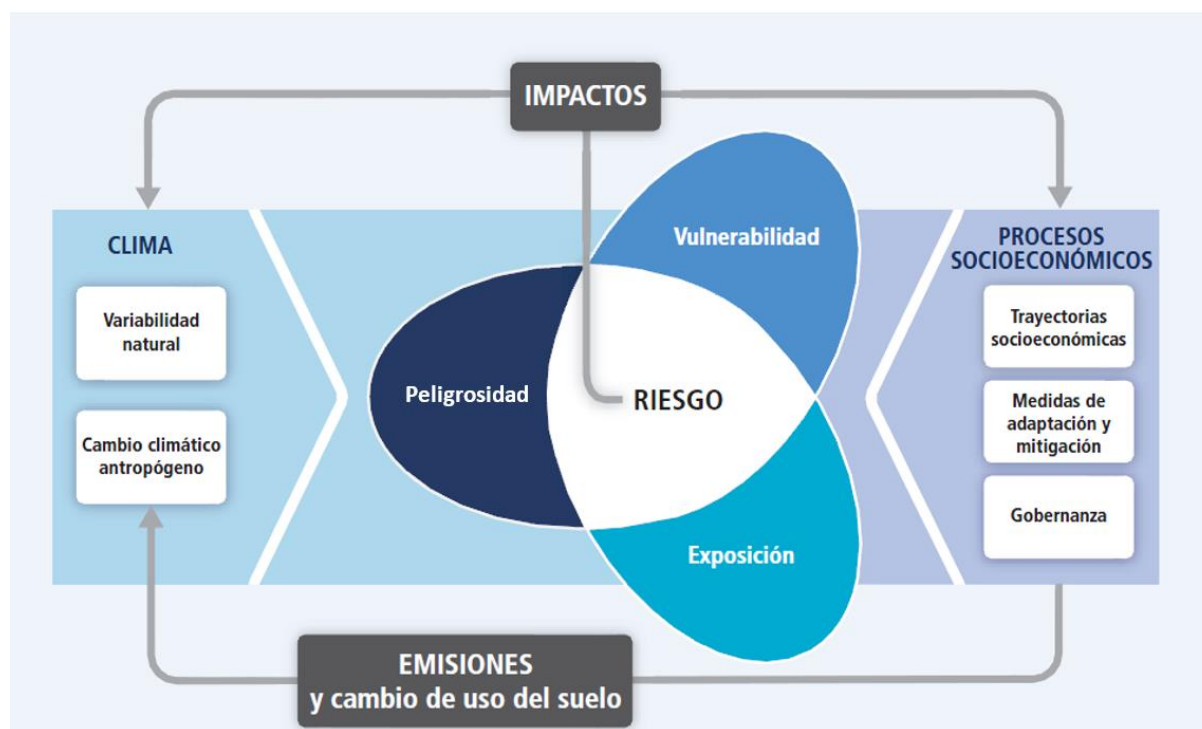


Figura 1. Metodología de riesgo adoptada por el IPCC (IPCC, 2014)

Partiendo del marco de riesgo del IPCC, en este estudio se han desarrollado metodologías orientadas a resolver los impactos de inundación y erosión costera, que consideran varios sectores en términos de exposición, vulnerabilidad y evaluación de riesgos y consecuencias en términos monetarios.

2.3. Escenarios de cambio climático y proyecciones climáticas relevantes

En el último Informe de Evaluación (AR5) el IPCC define cuatro escenarios o “trayectorias de concentración representativas” (RCP, por sus siglas en inglés) de las emisiones y concentraciones de los gases de efecto invernadero. Estos escenarios incluyen un escenario de mitigación riguroso (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

En dicho informe, el IPCC publica los últimos valores de aumento de nivel medio del mar global y de temperatura media global en superficie asociados a los diferentes RCPs (Tabla 1). Las proyecciones medias de aumento de la temperatura media global para el periodo 2081-2100, en relación con el periodo de referencia 1986-2005, se sitúan en el rango de 1,0° (RCP2.6) a 3,7°(RCP8.5), y las proyecciones de aumento de nivel del mar global oscilan en el rango de 0,40 metros (RCP2.6) a 0,63 metros (RCP8.5) (Tabla 1).

Es importante mencionar que en los estudios regionales o locales de evaluación de los efectos del cambio climático es necesario considerar el aumento del nivel medio del mar regional o local, ya que los cambios regionales o locales pueden diferir sustancialmente de las estimaciones globales de aumento del nivel medio del mar. Este hecho se debe a la complejidad de los patrones espaciales del sistema climático, que resultan de procesos dinámicos oceánicos, y los cambios gravitacionales debidos a la redistribución de masas de agua. La distribución regional particular de cambios en el NMM se asocia con procesos naturales y antropogénicos e incluyen cambios en las masas de agua debidos a cambios en los vientos, presión atmosférica, flujos de calor atmósfera-oceano, aportes de agua dulce y corrientes marinas.

Tabla 1. Proyección del cambio en la temperatura media global del aire en la superficie y elevación media mundial del nivel del mar para finales del siglo XXI, en relación con el periodo de referencia 1986 -2005 (Church et al., 2013). El rango probable se corresponde con los percentiles de 5 y 95%.

| | RCP | 2046-2065 | | 2081-2100 | |
|---|--------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| | | Media | Rango probable | Media | Rango probable |
| Cambio en la temperatura media global del aire en superficie (en °C) | RCP2.6 | 1,0 | 0,4 a 1,6 | 1,0 | 0,3 a 1,7 |
| | RCP4.5 | 1,4 | 0,9 a 2,0 | 1,8 | 1,1 a 2,6 |
| | RCP6.0 | 1,3 | 0,8 a 1,8 | 2,2 | 1,4 a 3,1 |
| | RCP8.5 | 2,0 | 1,4 a 2,6 | 3,7 | 2,6 a 4,8 |
| Elevación media mundial del nivel del mar (en metros) | RCP | Media | Rango probable | Media | Rango probable |
| | RCP2.6 | 0,24 | 0,17 a 0,32 | 0,40 | 0,26 a 0,55 |
| | RCP4.5 | 0,26 | 0,19 a 0,33 | 0,47 | 0,32 a 0,63 |
| | RCP6.0 | 0,25 | 0,18 a 0,32 | 0,48 | 0,33 a 0,63 |
| | RCP8.5 | 0,30 | 0,22 a 0,38 | 0,63 | 0,45 a 0,82 |

3. ANÁLISIS DE LA INUNDACIÓN COSTERA

La inundación es, junto con la erosión, uno de los impactos del cambio climático más preocupantes debido a sus potenciales consecuencias. En zonas costeras, la inundación está asociada a la acción por separado o conjunta de temporales costeros, la subida del nivel medio del mar, y al desbordamiento de los cauces de los ríos y sus riberas o a la acción local de lluvias torrenciales. Los temporales costeros generan una inundación episódica, mientras que la subida del nivel del mar provoca la inundación permanente de zonas bajas. La inundación provocada por el desbordamiento de los cauces o la precipitación externa también tiene carácter temporal, y depende de las características del terreno (Ballesteros et al., 2017).

En los últimos años se han desarrollado muchas metodologías para analizar la inundación costera con distintos niveles de complejidad. Éstas varían desde aproximaciones basadas en indicadores que integran parámetros relevantes como la cota de inundación, la pendiente y la rugosidad; métodos simples como el BTM (del inglés, bathtub method) (Reguero et al., 2015; Muis et al., 2016) que resuelve de forma grosera la inundación en tierra cortando el modelo digital de terreno (MDT) a una determinada cota mediante un sistema de información geográfica; hasta análisis mucho más sofisticados que incorporan modelado 2D (e.g. TUFLOW, MIKE Flood) o 3D (e.g., MIKE 3, TUFLOW, Delft3D) de procesos, que al ser computacionalmente más demandantes, pueden no ser aplicables a escalas más allá de la local ni para obtener estimaciones probabilísticas.

3.1. Resumen de la metodología propuesta

La metodología de evaluación del riesgo de inundación costera planteada en este estudio es una metodología en la que la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad se desarrollan de forma individual, y se integran para obtener estimaciones del riesgo en términos económicos. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo seguido para obtener los mapas de inundación. Estos mapas luego se han cruzado con capas de exposición y curvas de vulnerabilidad para obtener mapas de consecuencias en unidades monetarias, que luego se han integrado para diferentes periodos de retorno para obtener el riesgo, por ejemplo, en términos de daños anuales esperados.

La metodología propuesta se fundamenta en el análisis realizado de las dinámicas costeras y fluviales históricas y proyectadas al futuro en la zona de estudio, y que se han abordado en los Entregables E.1.1 (IMFIA, 2018a) y E.1.2 (IMFIA, 2018b). Esta información y su implicación sobre la estructura de la metodología propuesta se describe con detalle en el apartado 3.2. de este informe.

El primer paso de la metodología es, tal y como aparece en las cajas (color azul) de la Figura 2, construir el conjunto de escenarios climáticos a simular (peligrosidad) combinando eventos extremos y cambios futuros a medio y largo plazo en el caso de las dinámicas costeras, y un valor medio, representativo, en el caso de las dinámicas continentales. Una vez conocidas las dinámicas el segundo paso es, tal y como aparece en las cajas (color morado) de la Figura 2, emplear un modelo de impacto que tenga en cuenta la topografía subyacente para generar los mapas de inundación. El modelo se alimenta con los escenarios de peligrosidad planteados, es decir, valores extremos de cota de inundación de las dinámicas costeras y valor medio en el caso de las dinámicas continentales, tanto para el clima presente como para el futuro. En el tercer paso, la exposición se define a través de los sectores de

población, vivienda, industria, servicios, infraestructuras críticas y ecosistemas, y sus correspondientes indicadores socioeconómicos. En el cuarto paso, la vulnerabilidad de los activos se determina por medio de la aplicación de funciones de daño específicas. En el quinto y último paso, los mapas de inundación, los datos de exposición y las curvas de vulnerabilidad se integran en un modelo de daños. Como resultado, se obtienen las consecuencias multisectoriales del cambio climático para un conjunto de escenarios de riesgo.

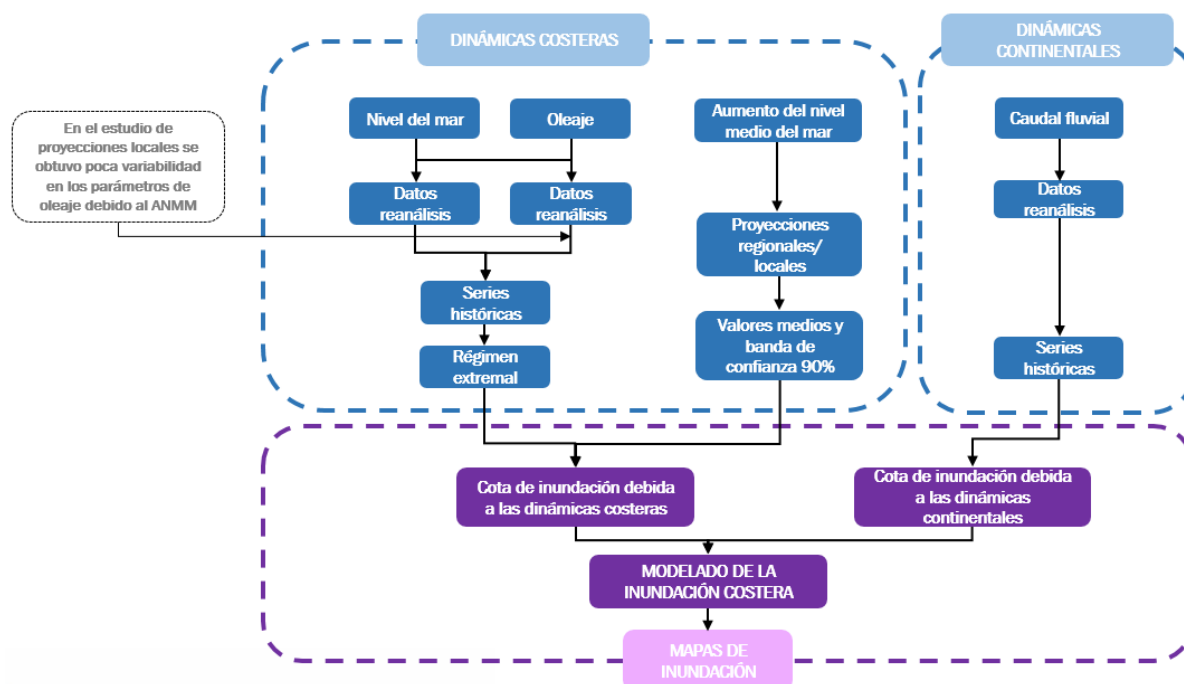


Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología seguida para obtener los mapas de inundación que determinaran los mapas de impacto que alimentan el análisis de riesgo.

3.2. Análisis de la peligrosidad (amenaza)

3.2.1. Bases de datos de reanálisis histórico

La inundación costera depende esencialmente del oleaje, las ondas infragravatorias, la marea meteorológica, la marea astronómica y el aumento del nivel medio del mar (ANMM). El nivel que alcanza el mar cuando se produce un evento de inundación costera es resultado de la combinación de estas dinámicas marinas, y la ocurrencia de eventos extremos de esta combinación.

El análisis del oleaje se ha realizado a partir de la base de datos histórica de oleaje (1985-2016) generada por el IMFIA dentro del marco de este proyecto (IMFIA, 2018a). El hindcast de oleaje tiene una resolución espacial de ~1 km y una resolución temporal horaria, y se generó con el modelo WAVEWATCH III versión 2.16 (WW3DG, 2016). Los datos de entrada del modelo de oleaje son los campos de viento en superficie obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014) en su formato de mayor resolución; y los campos de niveles y corrientes se obtuvieron de un hindcast regional realizado en base al modelo hidrodinámico TELEMAC2D (Hervouet, 2007).

El análisis del nivel del mar se ha realizado a partir de la base de datos histórica de niveles por el IMFIA dentro del marco de este proyecto (IMFIA, 2018a). Este hindcast cubre un periodo de 31 años (1985-2016) y fue generado mediante el modelo TELEMAR2D para el Río de la Plata. El modelo fue calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa uruguaya. El modelo considera las principales características de la dinámica del Río de la Plata y sus forzantes (vientos 6-horarios CFSR, caudales diarios y ondas de marea en la condición frontera oceánica del modelo).

Además de las dinámicas meteo-oceánicas, y debido a la presencia de cursos fluviales importantes en la zona de estudio, en el análisis de la inundación costera se ha considerado la influencia del caudal fluvial de ríos y arroyos. El análisis del caudal se ha llevado a cabo a partir del hindcast generado por el IMFIA en el marco de este proyecto (IMFIA, 2018b). El hindcast se generó con el modelo hidrológico diario GR4J (Perrin et al. 2003). Para la aplicación del modelo se utilizaron datos de evapotranspiración potencial de las estaciones de INIA y datos de precipitación. El hindcast de caudales proporciona series diarias de caudal en el periodo 1982-2011, en el punto de cierre de todas las cuencas con superficie superior a 150 km², siendo un total de 23 cuencas de ríos y arroyos afluentes a lagunas costeras.

3.2.2. Bases de datos de proyecciones

Con relación a la peligrosidad futura, IHCantabria generó en el marco de este proyecto las proyecciones de oleaje, residuo del nivel del mar y nivel medio del mar en Uruguay (IHCantabria, 2018a).

Respecto a las proyecciones regionales del nivel medio del mar, al no disponerse de modelos regionales climáticos que permitan hacer un downscaling en el Río de la Plata que tenga en cuenta factores locales como la batimetría, el aporte detallado de agua dulce a partir de los ríos, y los sistemas de circulación en el estuario, se han recopilado los resultados obtenidos mediante las simulaciones climáticas globales recogidas por el CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) (Church et al., 2013). En particular, se ha utilizado los resultados de 21 modelos GCM (Global Circulation Models), modelos de circulación acoplada atmósfera-océano).

Para una ubicación representativa de la costa de Uruguay en aguas abiertas (situada a 55,5°O y 35,5°S, Figura 3), se muestran los resultados de los valores medios estimados para el conjunto (ensemble) de los 21 modelos, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Se muestra también la banda de confianza del 90%, estimada como se propone en Church et al. (2013), suponiendo una distribución t-student.

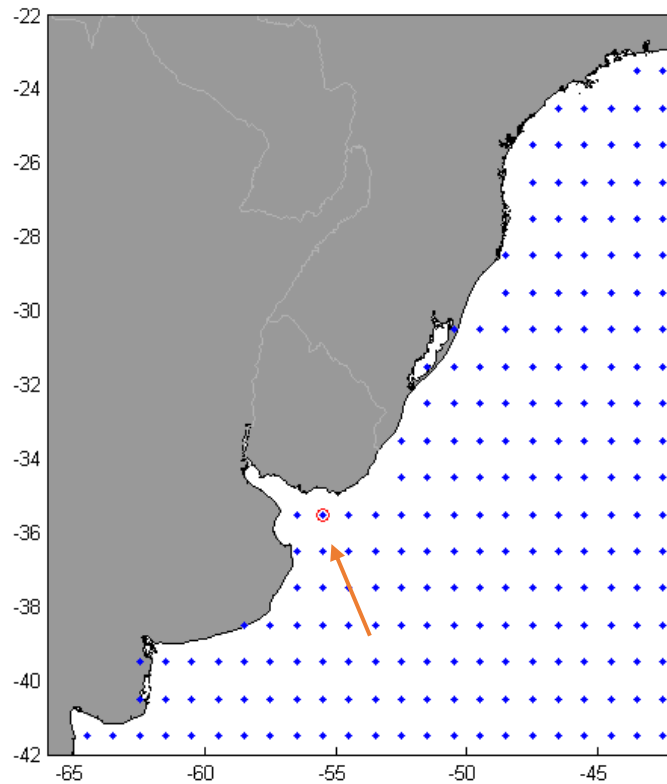


Figura 3. Localización del punto utilizado para el estudio del ANMM en Uruguay.

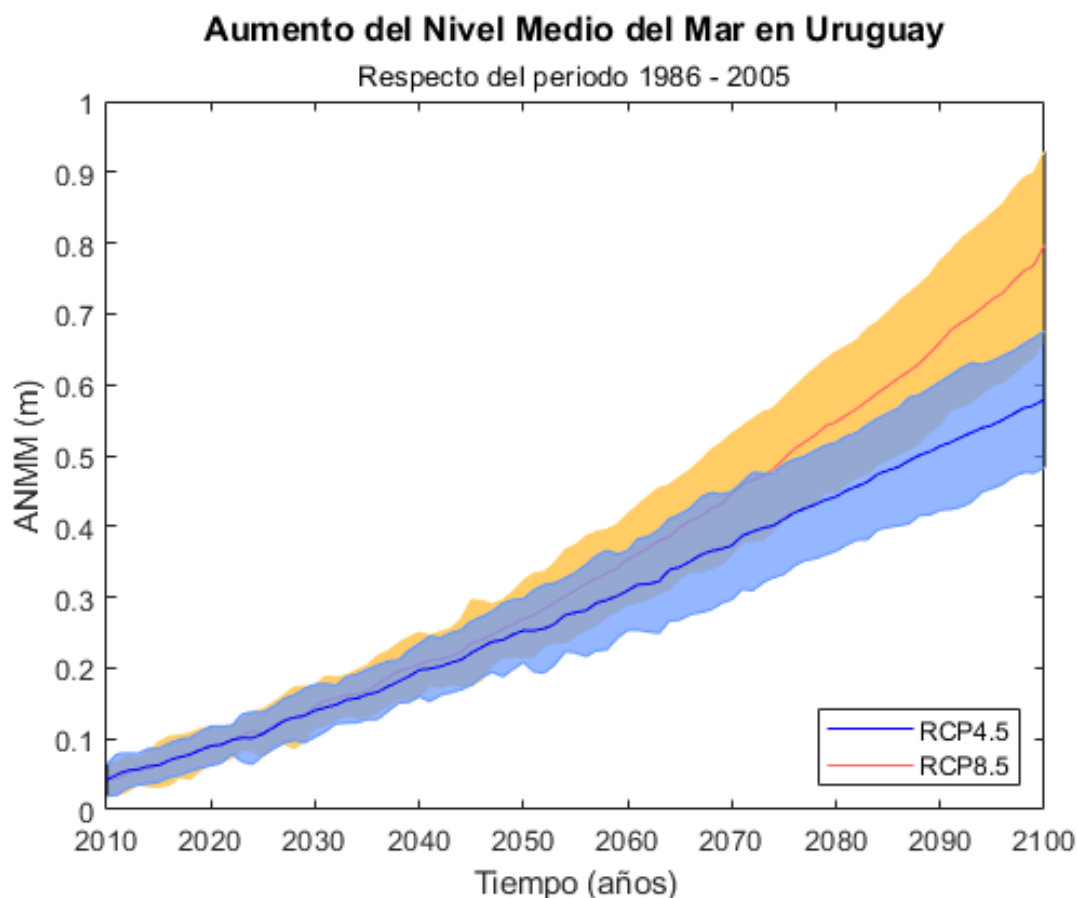


Figura 4. Valor medio y banda de confianza del 90% de las diferencias de nivel medio del mar con respecto al periodo (1985-2005), obtenidas a partir de un conjunto (ensemble) de 21 modelos del CMIP5 (Church et al., 2013), para el RCP4.5 y el RCP8.5.

En la Tabla 2 se recogen los valores de ANMM asociados a los horizontes temporales considerados en esta metodología. Dado que las proyecciones de ANMM divergen a partir de la mitad del siglo XXI (Figura 4), con el fin de reducir el número de casos a considerar, se ha tomado el valor medio de los RCPs disponibles para el año 2050. Sin embargo, en 2100 se han considerado las proyecciones de ANMM del RCP4.5 y RCP8.5 dado que los valores de ANMM divergen considerablemente en función del escenario de emisiones considerado.

Tabla 2. Valores de ANMM para los horizontes temporales 2050 y 2100 en Uruguay.

| Horizonte temporal | ANMM | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|-------------|---------------|--------------|-------------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| | Media de los RCPs | | | RCP4.5 | | | RCP8.5 | | |
| | Percentil 5% | Valor medio | Percentil 95% | Percentil 5% | Valor medio | Percentil 95% | Percentil 5% | Valor medio | Percentil 95% |
| 2050 | 0,21m | 0,26m | 0,31m | - | | | - | | |
| 2100 | - | | | 0,48m | 0,58m | 0,67m | 0,66m | 0,80m | 0,93m |

Inicialmente, para hacer una adecuada caracterización de los forzamientos que inducen la erosión e inundación futuras, es necesario contar con el resto de dinámicas relevantes en la costa. Para ello, se aplicó un modelo estadístico de reducción de escala (downscaling) basado en tipos de tiempo para la obtención de unas proyecciones robustas de oleaje y residuo meteorológico (IHCantabria, 2019a).

Las proyecciones se realizaron para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 a lo largo del siglo XXI y, con el fin de acotar y cuantificar la incertidumbre de los cambios futuros e identificar la existencia de concordancia en la señal de cambio entre modelos, se utilizaron 30 modelos de circulación general (GCMs). Como principales resultados del estudio se ha obtenido: un aumento de la altura de ola significativa (H_s) del 4% para fin de siglo en el escenario RCP8.5; una disminución máxima del periodo de pico (T_p) del orden de 3% en el interior del Río de la Plata; un giro hacia el este del oleaje del orden de los 3-4° en el interior del Río de la Plata; y un aumento del residuo del nivel del mar menor al 1%.

En un segundo estudio sobre la variabilidad del oleaje y el nivel del mar realizado por el IMFIA dentro del marco de este proyecto (IMFIA, 2018c), el ANMM se ha incorporado en las condiciones iniciales y de frontera en el modelo hidrodinámico utilizado en la generación de los hindcast de oleaje y nivel del mar, y se ha vuelto a simular el periodo 1985-2016, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. De los resultados del estudio se observa que los cambios en el nivel de mar total son pequeños en términos absolutos, excepto en la zona interior del Río de la Plata. Respecto al oleaje, los mayores cambios se dan en el Río de la Plata medio e interior; en donde los cambios relativos de altura de ola son de 20-30%, y los cambios en la dirección son del orden de 2°.

Debido a que los cambios en los parámetros de oleaje y el residuo del nivel del mar debido al ANMM son pequeños, en la evaluación de los efectos de cambio climático no se han considerado cambios en el oleaje o el residuo del nivel del mar debido al cambio climático. Tampoco se han considerado cambios en las condiciones hidrológicas. Dado que los eventos extremos se analizan con base en las series históricas, el aumento del nivel medio del mar se convierte en el forzador más relevante en las proyecciones futuras, pero manteniendo el papel que juegan el resto de las dinámicas que intervienen en la inundación.

3.2.3. Cota de inundación de las dinámicas costeras

El indicador fundamental para definir la inundación es el nivel total que alcanza el mar, que se denomina cota de inundación (CI) (Figura 5). Este indicador es el resultado de combinar linealmente las dinámicas costeras que contribuyen al nivel del mar, es decir: la contribución del oleaje, la marea astronómica, la marea meteorológica y el ANMM (cuando se trata de una CI futura). Por tanto, la CI es en realidad una serie temporal que se obtiene de la suma de las series temporales de las contribuciones de cada una de las componentes anteriores en cualquier punto de la costa.

Para este proyecto, se ha construido la serie histórica de CI en un total de 497 puntos (Figura 6) ubicados a lo largo de toda la costa uruguaya a partir de series de oleaje y nivel del mar extraídas de las bases de datos históricas. Para determinar la CI las variables se han combinado linealmente de acuerdo con la ecuación (1).

$$CI_{costera} = Su + MM + MA + ANMM \quad (1)$$

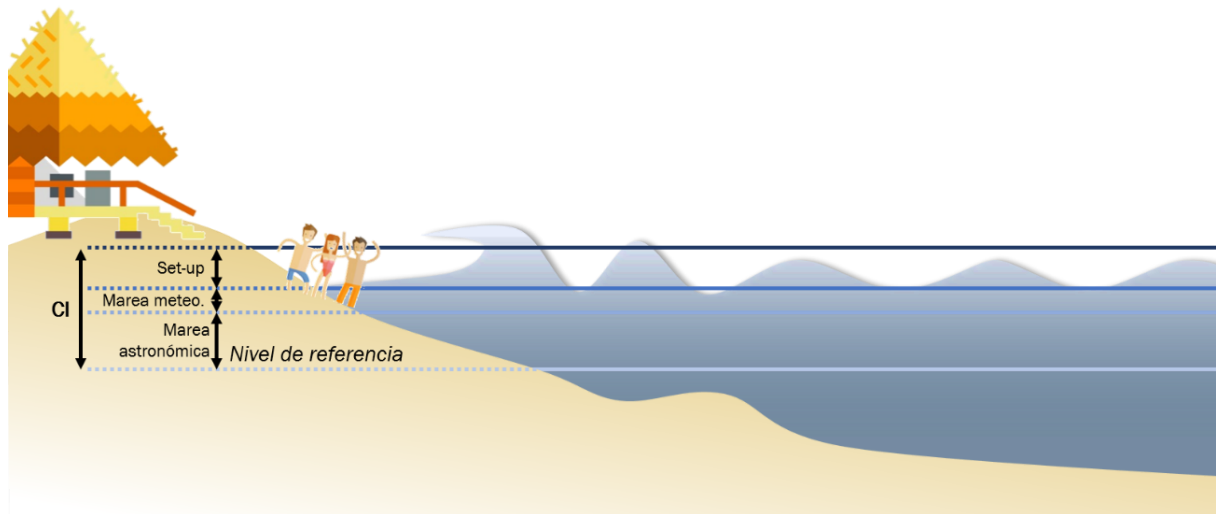


Figura 5. Componentes de la cota de inundación (CI) en cualquier punto de la costa para el clima presente, donde el set-up corresponde a la contribución del oleaje al nivel total. Para obtener la cota de inundación en el futuro, el nivel de referencia debe ser modificado para incorporar el ANMM



Figura 6. Ubicación de los puntos 497 puntos en los que se han construido las series de CI

donde CI es la cota de inundación o indicador del nivel del mar total, Su es el set-up del oleaje, MM es la marea meteorológica, MA es la marea astronómica y ANMM es el aumento relativo del nivel medio del mar local.

El run up es el ascenso de la lámina de agua sobre el talud de la costa asociado a los procesos de rotura del oleaje. En el run up se pueden distinguir dos componentes, el set up o ascenso del nivel medio debido a la rotura del oleaje, y el swash que representa el ascenso y descenso de una fina lámina de agua sobre el talud de la playa una vez que se ha producido la rotura. En este estudio se ha considerado el set-up como la componente del run up originadora de inundación permanente.

Para determinar la contribución del oleaje a la cota de inundación se pueden emplear modelos de procesos que permiten resolver la hidrodinámica en la zona de rompientes con mucha precisión (Liu y Losada, 2002; Losada et al., 2008; Lara et al., 2011), o se puede sustituir el uso de modelos por el de formulaciones semi-empíricas (Stockdon et al., 2006; Pullen et al., 2007).

La formulación general de Stockdon et al. (2006) define la zona inundada de un perfil de playa, a través del run-up del ($R_{2\%}$), como aquella alcanzada por el 2% de las olas en un estado de mar y depende de la altura de ola (H_0), la longitud de onda (L_0) y la pendiente del perfil sumergido (β_f). La formulación completa (ecuación (2)) permite considerar el ascenso de la lámina de agua en rotura considerando, tanto la contribución de las ondas de corto periodo (set-up) como la de las ondas infragravitatorias.

Por la manera en la que se fuerza el modelo de inundación, en este estudio se ha partido de la formulación (2), pero utilizando únicamente la contribución asociada a la componente de set-up (ecuación (3)).

$$R_{2\%} = 1,1 \left(0,35\beta_f(H_0L_0)^{\frac{1}{2}} + \frac{[H_0L_0(0,563\beta_f^2 + 0,004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (2)$$

$$R_2 = 0,35\beta_f(H_0L_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Stockdon et al. (2006)

Para poder aplicar la formulación es necesario obtener la pendiente del perfil de playa, β_f . Para ello, y siguiendo las recomendaciones de Stockdon et al. (2006), se ha seguido el siguiente procedimiento.

Primero se ha realizado una segmentación de la línea de costa en segmentos separados cada kilómetro, utilizando la línea de costa del percentil 50% del nivel del mar generada por el IMFIA dentro del marco de este proyecto. Luego se ha obtenido la dirección asociada a la perpendicular a la línea de costa, y se ha generado un corte con el MDT (la batimetría disponible tenía una resolución muy baja, 1 kilómetro), para obtener el perfil. Después se ha calculado la pendiente de cada perfil.



Figura 7. Ejemplo de un tramo perfilado de la costa

Las pendientes obtenidas se han limitado a los rangos de valores habituales de pendientes de playas disipativas y reflejantes (playa reflejante, $0,07 < \beta_f < 0,2$; playa disipativa, $0,01 < \beta_f < 0,03$; Holman et al., 1986), y luego se ha aplicado un suavizado para evitar la aparición de cambios bruscos entre las pendientes. En la Figura 8 se muestra la variación espacial de las pendientes obtenidas.

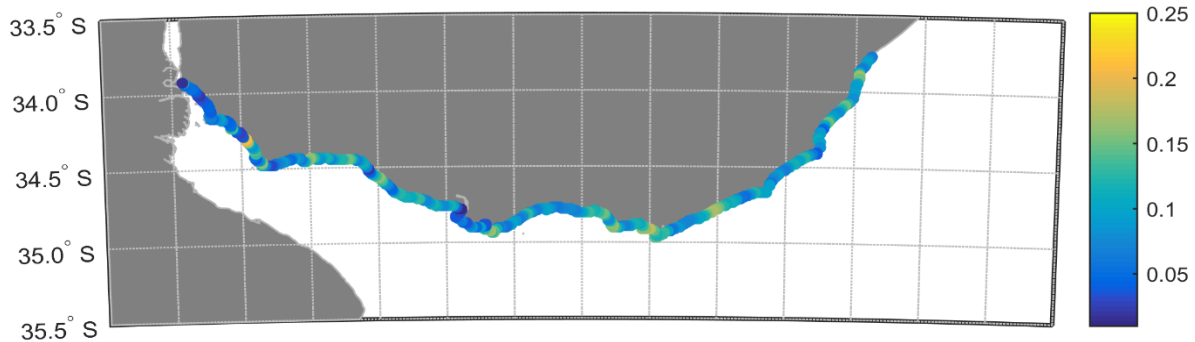


Figura 8. Variación espacial de la pendiente.

Por último, otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de calcular la cota de inundación es la consideración de los efectos locales en la altura de ola debido a la presencia de obstáculos o infraestructuras de protección. Estos elementos generan la difracción del oleaje y la consiguiente disminución de la altura de ola que, a su vez, reduce la contribución del oleaje a la cota de inundación. Por ello, para zonas en las que el oleaje se ve difractado, se reduce la altura de ola, de forma simplificada, haciendo uso de los ábacos de difracción del Shore Protection Manual (Shore Protection Manual, 1984).

Validación de la formulación de Stockdon con XBeach

Dado que la formulación de Stockdon es una aproximación semi-empírica obtenida a partir de datos de campo, se ha realizado un ejercicio de validación de la formulación haciendo uso del modelo de procesos XBeach (Smit et al., 2010) y, por tanto, incluyendo a priori todos los procesos que contribuyen a la inundación por oleaje. Además, se ha hecho un análisis de la aplicación de la formulación completa frente a la reducida empleada en este estudio.

Aplicando una metodología híbrida (Camus et al. 2011a; Camus et al. 2011b) que utiliza herramientas estadísticas y técnicas de reconstrucción, se ha reconstruido las series horarias de set-up y runup, propagadas con XBeach, en un perfil seleccionado representativo de la costa con $\beta_f = 0,09$ (Figura 9).

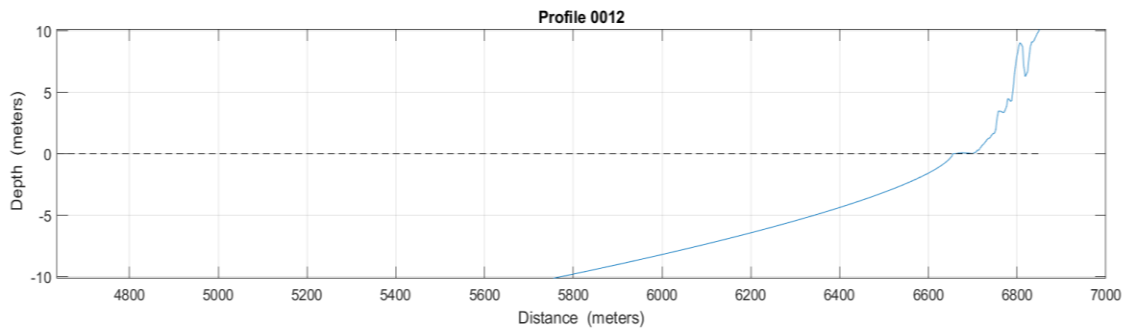


Figura 9. Perfil utilizado para la validación de la formulación de Stockdon mediante la aplicación del modelo de procesos XBeach

En el panel superior de Figura 10 se muestran los resultados de la comparación de las series temporales de nivel del mar + set-up (primera componente de la formulación de Stockdon) con los resultados obtenidos con XBeach. En el panel inferior, se muestra la comparación de las series temporales de nivel del mar + runup (formulación completa de Stockdon) con los resultados obtenidos con XBeach. En general, se aprecia una buena correlación de los resultados para este tipo de perfil y tanto, para la formulación completa como la que incluye únicamente el término de set-up. Por tanto, se puede concluir que, para el tipo de perfil y la aplicación requerida en Uruguay, la utilización de esta formulación semi-empírica reducida es suficientemente adecuada para analizar la contribución del oleaje a la cota de inundación que posteriormente se utilizará para obtener la inundación en la costa.

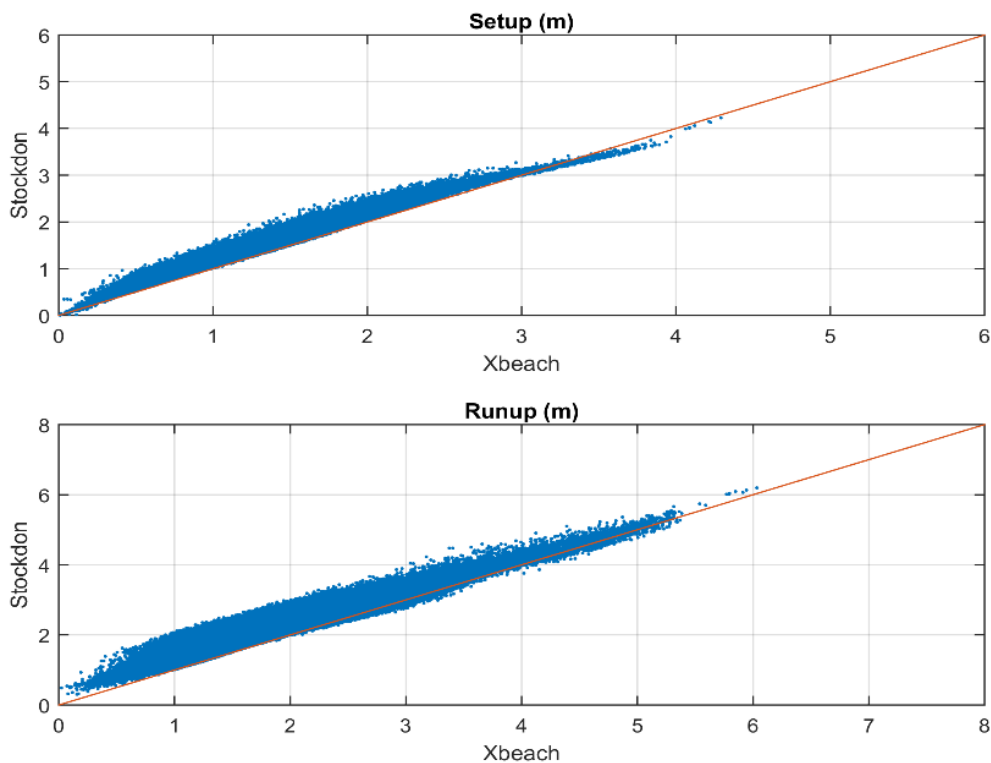


Figura 10. Validación de las series temporales de nivel del mar + setup (gráfico superior) y nivel del mar + runup (gráfico inferior) obtenidas con XBeach y la formulación de Stockdon

3.2.4. Cota de inundación de las dinámicas fluviales

Como se mencionaba anteriormente en el apartado de bases de datos de reanálisis, en el marco del proyecto se han generado series diarias de caudal en el punto de cierre de 23 cuencas (IMFIA, 2018b). Para poder alimentar el modelo de inundación no sólo con información de las dinámicas costeras, sino también con información de las dinámicas fluviales, ha sido necesario transferir la información de los puntos de cierre a puntos situados aguas arriba de la cuenca, para poder generar una condición de borde variable a lo largo del cauce de los ríos.



Figura 11. Ubicación de los puntos de cierre de las cuencas (Fuente: IMFIA, 2018b).

Para transferir la información de caudal de los puntos de cierre a puntos aguas arriba de la cuenca se ha utilizado la expresión empírica (2), que relaciona el caudal medio con el área de la cuenca.

$$Q = bA^c \quad (2)$$

donde Q es el caudal medio, A es el área de la cuenca, y b y c son coeficientes variables. En este estudio se ha asumido una relación lineal entre caudal y área, y se ha considerado $c = 1$ (Whipple, 2004). Para determinar el valor de b se ha utilizado el valor de la pendiente del ajuste área – caudal de las 23 cuencas en las que se disponía de información de caudal.

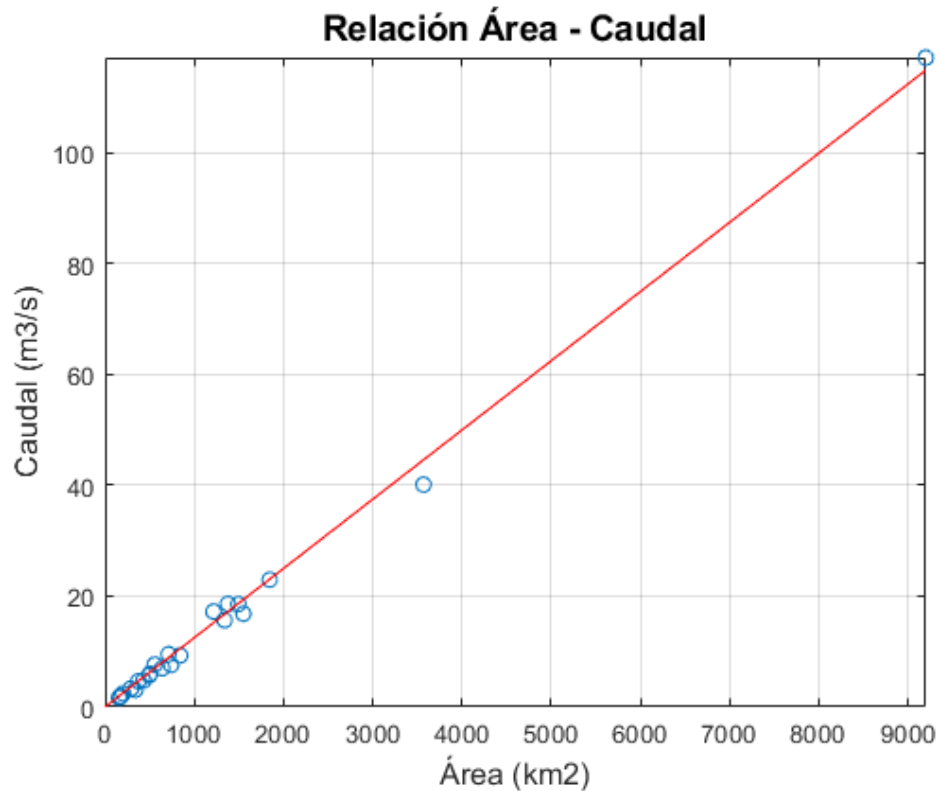


Figura 12. Ajuste lineal que relaciona el área de la cuenca con el caudal para las 23 cuencas consideradas en el estudio.

Para hacer un análisis análogo a la cota de inundación costera, se ha elaborado un indicador de cota de inundación de las dinámicas fluviales ($CI_{continental}$). Este indicador es la altura de la lámina sobre el cauce, y se determina a través de la formulación de Manning (ecuación (3)), la idealización de la sección transversal de los cauces en una sección rectangular (Figura 13), y la relación del área inundable con la anchura del cauce y altura de la lámina de agua (ecuación (5)). Es necesario hacer constar que la idealización en una sección rectangular puede contribuir a sobreestimar las cotas de inundación a lo largo del río.

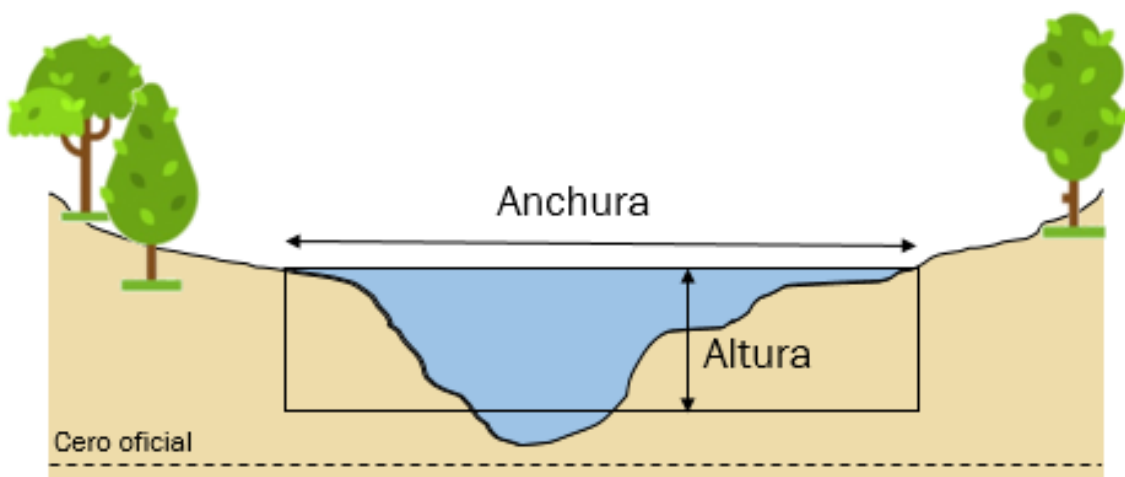


Figura 13. Idealización de la sección transversal del cauce en una sección rectangular.

Formulación de Manning:

$$Q = S \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{P} \quad (3)$$

donde S es el área inundable, n es la rugosidad de Manning, R_h es el radio hidráulico y P es la pendiente. Se ha considerado un valor de rugosidad n igual a 0,045, y una pendiente igual a 0,001 (Alonso et al., 2018).

Al idealizar la sección del cauce en una sección rectangular se puede calcular el radio hidráulico de manera más sencilla:

$$R_h = \frac{by}{b + 2y} \quad (4)$$

donde R_h es el radio hidráulico, b es la anchura y y es la altura de la lámina de agua o $CI_{continental}$

Finalmente, para convertir el área inundable en cota de inundación, se relaciona el área inundable con la anchura del cauce y la altura de la lámina de agua:

$$S = by \quad (5)$$

donde S es el área inundable, b es la anchura y y es la altura de la lámina de agua o $CI_{continental}$.

Utilizando las ecuaciones (3), (4) y (5) podemos interpolar la $CI_{continental}$.

La $CI_{continental}$ aguas arriba de los ríos sirve como condición de contorno del modelo de inundación en las zonas donde no hay influencia de las dinámicas costeras. En las zonas donde solamente hay influencia de las dinámicas costeras la condición de contorno del modelo es la $CI_{costera}$, mientras que, en las zonas con influencia de dinámicas costeras y continentales, como las desembocaduras de los ríos, la condición de contorno es la suma de la $CI_{costera}$ y la $CI_{continental}$.

Para definir la zona de influencia de las dinámicas costeras se ha utilizado la capa de salinidad del DINAMA y la línea de costa Q80 generada por el IMFIA dentro del marco del proyecto. Esta línea de costa fue determinada como la intersección del modelo digital de terreno con el plano horizontal que pasa por el percentil del 80% del nivel del mar.

3.2.5. Estudio de extremos

Dado que el objetivo del análisis es caracterizar los eventos extremos que dan lugar a inundación, se ha estudiado el régimen extremal de las series de CI situadas a lo largo de toda la costa, y se han ajustado los valores máximos anuales a una distribución de valores extremos generalizada (GEV) (Figura 14). Del ajuste extremal se puede obtener la cota de inundación asociada a un evento con una probabilidad o periodo de retorno determinado.

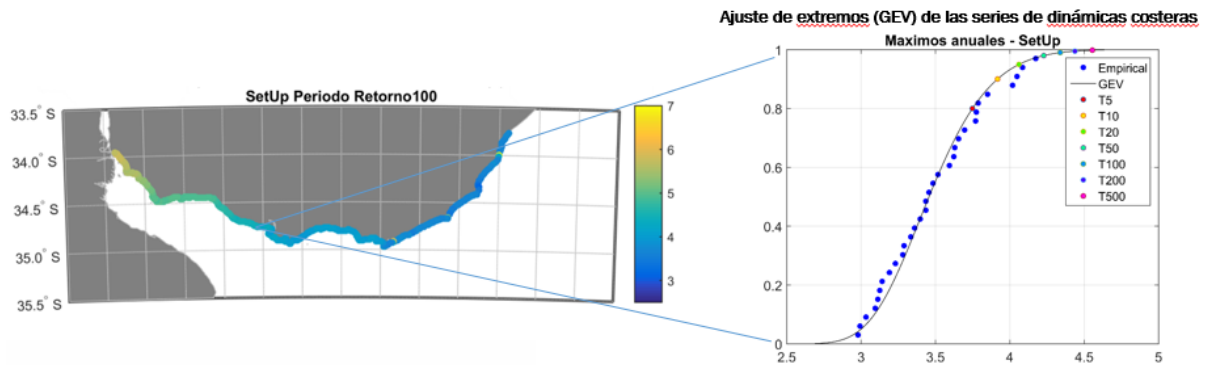


Figura 14. Ajuste de extremos de la cota de inundación (CI) asociada a las dinámicas costeras.

3.2.6. Escenarios de inundación costera

Para el RCP4.5 y el RCP8.5, los horizontes temporales presente, 2050 y 2100, y teniendo en cuenta que las dinámicas costeras se consideran el forzamiento principal y las dinámicas continentales un forzamiento complementario, se han definido los escenarios climáticos de inundación recogidos en la Tabla 3.

Estos escenarios incluyen la simulación de un conjunto de situaciones de dinámicas diferentes que incluyen: un forzamiento de condiciones medias, correspondiente al percentil del 80% del nivel del mar incluyendo la marea astronómica y meteorológica, y la simulación de 6 forzamientos adicionales correspondientes a eventos extremos costeros, asociadas a los siguientes periodos de retorno: $TR_i=5, 10, 25, 50, 100$ y 500 años de la CI costera. En todos los escenarios se considera además la CI continental asociada al caudal fluvial medio. La selección del percentil del 80% como condición media para el nivel del mar, es consistente con el hecho de que la línea de costa generada por IMFIA corresponde a ese mismo percentil.

La CI del evento extremo se obtiene de los ajustes extremales calculados anteriormente. La combinación de estos siete forzamientos (condiciones medias y eventos extremos) con los diferentes RCPs y horizontes temporales seleccionados, arroja un total de 70 escenarios climáticos de inundación distintos. En las proyecciones futuras, los valores de ANMM considerados son los que se recogen en la Tabla 2.

Tabla 3. Escenarios climáticos de inundación costera.

| Horizonte | Escenario climático | Características del forzamiento | | |
|-----------|---------------------|--|---------------|-----------------------|
| | | Condiciones oleaje y nivel del mar | ANMM | RCP |
| Presente | E1 | Condiciones medias | - | - |
| | E2-E7 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2050 | E8 | Condiciones medias | Percentil 5% | Media RCP4.5 y RCP8.5 |
| | E9-E14 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2050 | E15 | Condiciones medias | Valor medio | Media RCP4.5 y RCP8.5 |
| | E16-E21 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2050 | E22 | Condiciones medias | Percentil 95% | Media RCP4.5 y RCP8.5 |
| | E23-E28 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2100 | E29 | Condiciones medias | Percentil 5% | RCP4.5 |
| | E30-E35 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2100 | E36 | Condiciones medias (0) | Valor medio | RCP4.5 |
| | E37-E42 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2100 | E43 | Condiciones medias | Percentil 95% | RCP4.5 |
| | E44-E49 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2100 | E50 | Condiciones medias | Percentil 5% | RCP8.5 |
| | E51-E56 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2100 | E57 | Condiciones medias | Valor medio | RCP8.5 |
| | E58-E63 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |
| 2100 | E64 | Condiciones medias | Percentil 95% | RCP8.5 |
| | E65-E70 | Eventos extremos (Tr=5, 10, 25, 50, 100, 500 años) | | |

Los eventos simulados tienen la forma de un hidrograma triangular, cuyo pico es igual a la CI (+ANMM, cuando se trata de CI futura), con una duración igual a 12 horas (un ciclo completo de marea). Una de las limitaciones del modelo utilizado es la incertidumbre de los resultados al inundar con varios eventos consecutivos, debido al mecanismo de mojado-secado de las celdas utilizado. Por tanto, los eventos simulados se consideran eventos independientes.

Dado que combinar un evento extremo de inundación (p.e., evento asociado a la CI de un periodo de retorno de 50 años o probabilidad de ocurrencia igual a 0,02) con un evento extremo fluvial de igual probabilidad de ocurrencia (0,02), daría lugar a un evento extremo con una probabilidad de ocurrencia mucho más pequeña (0,0004), los eventos extremos simulados combinan condiciones extremas de las dinámicas costeras con condiciones medias fluviales.

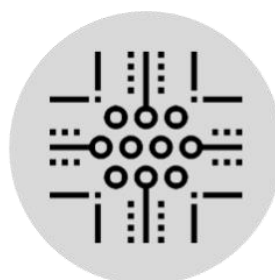
3.3. Análisis de la Exposición

En este apartado se presentan las variables e indicadores utilizadas para caracterizar la exposición frente a la amenaza de inundación. El objetivo de este apartado es la caracterización de la distribución espacial de las personas, activos producidos por el hombre (stock construido) y ecosistemas naturales susceptibles de ser afectados por la inundación costera considerada en el estudio.

Los efectos sobre las categorías de exposición anteriores tienen efectos que pueden ser considerados de dos formas distintas. Por un lado, la afección propia sobre el activo (personas, edificios, infraestructuras o ecosistemas) que puede ser cuantificado como daño directo. Por otro lado, aparecen efectos indirectos relativos al desplazamiento de la población y al cese de actividades económicas que tienen efectos sobre el comportamiento general de la economía, que pueden diferirse en el tiempo y tener efectos indirectos afectando a otros sectores no implicados directamente.

Estas magnitudes se analizan de dos formas muy diferentes. En el primer caso, se analiza una exposición diseminada en el espacio de forma variable. En el segundo, sin embargo, se deben analizar los elementos de la exposición como una red, un modelo de nodos y enlaces, cuya afección ocasiona un efecto en cadena cuyas consecuencias se van desplazando por los elementos de la red. Los daños en una cuenca causan daños industriales locales en la cuenca, pero también eventuales daños sectoriales en el país a causa de la escasez industrial, siendo los daños locales insignificantes.

En este estudio y para la escala nacional considerada, no se han considerado los daños indirectos, centrándose el objetivo de la metodología en determinar la cuantificación numérica y distribución espacial de los activos existentes susceptibles de sufrir daños por los impactos de inundación costera. Estos activos se han clasificado en tres categorías diferentes: la población; los activos socioeconómicos, que actúan como proveedores de servicios económicos y sociales, incluyendo los activos construidos (divididos en residencial, industrial y servicios); las infraestructuras críticas y, por último, los activos naturales, proveedores de servicios ecosistémicos.



3.3.1. Población

En todo estudio, la exposición debe ser definida de acuerdo con el impacto considerado. En este caso, y para la caracterización de la exposición de la población, se ha definido ésta por la distribución espacial y la cuantificación del número de personas residentes en el territorio.

Este proceso de determinación de la población expuesta pasa por la localización de la población en las diferentes unidades espaciales, ya sea a partir de la información suministrada por los centros oficiales de distribución de estadísticas (Instituto Nacional de Estadística, Oficina del Catastro, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente), ya sea a partir de la proveniente de fuentes internacionales como WorldPop o UNEP, para las que será necesario realizar la correspondiente reducción de escala. En este proceso el papel que deben desempeñar las fuentes locales e internacionales depende de la disponibilidad de datos en las estadísticas locales. Si no son lo suficientemente detalladas o tienen una distribución irregular por país, servirán para normalizar los valores.

En concreto, en este estudio, para caracterizar la población expuesta se han utilizado los datos disponibles de dos fuentes distintas:

- Por un lado, se ha utilizado la información del Censo de 2011 del Instituto Nacional de Estadística. Esta información se encuentra en formato SHP y dispone del número de personas que habitan en cada uno de los polígonos que representan las unidades censales.
- Por otro lado, se ha dispuesto de la información del Catastro Nacional, que representa gráficamente los edificios construidos.

Ambas capas de información han servido para la caracterización de la población en el territorio. La capa del Catastro con la información de los edificios se ha utilizado para distribuir espacialmente la población en el territorio, partiendo de la premisa de que la población reside en los edificios.

Este procedimiento de downscaling de la población está limitado por la existencia de parcelas catastrales. Es decir, en aquellas zonas donde no exista información catastral pero sin embargo se encuentre población asentada, no se podrá realizar imputación alguna de la población.

3.3.2. Activos socioeconómicos

Dentro de las variables socioeconómicas que se han utilizado, se ha procedido a la caracterización de los activos que actúan como proveedores de servicios económicos y sociales, incluyendo aquí los activos construidos (divididos en residencial, industrial y servicios) y las infraestructuras críticas.

Para caracterizar estos activos expuestos a los efectos de inundación costera se ha utilizado igualmente la información disponible en el Catastro Nacional, que proporciona tanto la distribución espacial como el valor de los activos construidos. Aunque se reconocen las diferencias que pueden existir entre el valor de las edificaciones proporcionado por Catastro Nacional y el precio real de mercado de las mismas, se recurre al empleo de esta fuente por su disponibilidad y homogeneidad de datos en todo el territorio de Uruguay.

Los activos construidos se han clasificado en tres tipologías diferentes: residenciales, industriales y de servicios. Para ello se ha recurrido a la base de datos Global Assessment Report (GAR) del Programa de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), que tiene una resolución espacial de 1 km y proporciona el porcentaje de activos en cada una de las categorías. Se ha realizado una reducción de la escala espacial de esta información, que ha permitido caracterizar los activos económicos expuestos y distribuir espacialmente el capital construido en función de las actividades industriales, de servicios y residenciales.

Además, se ha tenido en cuenta en el estudio aquellas infraestructuras consideradas como críticas (definidas como infraestructuras nodales). Las infraestructuras analizadas se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4. Infraestructuras críticas consideradas en el estudio.

| INFRAESTRUCTURA | Información disponible |
|--------------------|--|
| AEROPUERTOS | Localización de las terminales |
| CEMENTERIOS | Localización de los cementerios |
| EDUCACIÓN | Localización de los centros educativos, públicos y privados |
| PUERTOS | Localización de las terminales |
| SALUD | Localización de los centros de salud y hospitales, públicos y privados |

La información de exposición se ha utilizado para caracterizar activos locales susceptibles de ser dañados y como indicador de la distribución espacial de las actividades.

3.3.3. Ecosistemas

Por último, se han identificado también los principales hábitats de la zona costera potencialmente afectados por la inundación costera, a fin de evaluar su exposición. No sólo es necesario seleccionar y clasificar los hábitats objetivo, sino también su área de distribución espacial en un tiempo de referencia, que se ha obtenido a partir de la mejor información disponible para el área de estudio.

En el caso de los ecosistemas, se ha caracterizado su exposición natural con base a la relevancia ecológica del área de estudio (ecosistemas situados en la franja costera). Para ello, se ha utilizado el índice de relevancia ecológica costera (IREC) de Brazeiro et al. (2009) y la clasificación de usos del suelo de DINAMA (MVOTMA). Este índice considera la riqueza potencial de especies, el número de especies amenazadas (moluscos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos), el número de formaciones vegetales y el número de formaciones amenazadas y divide los ecosistemas en tres categorías en función de cómo de amenazados se encuentran, distinguiendo entre ecosistemas vulnerables, amenazados y críticamente amenazados.

3.4. Análisis de la Vulnerabilidad

El objetivo de esta fase de la metodología es la caracterización de la sensibilidad o fragilidad de los componentes del sistema y de los flujos expuestos a las amenazas, y de su capacidad de adaptación o recuperación. En esta metodología, la vulnerabilidad se caracteriza con la introducción de funciones individuales que actúan como atributos de los elementos expuestos.

La evaluación de la vulnerabilidad ha consistido en identificar la magnitud del cambio esperado a través de un indicador que, cuando se aplica a la exposición, determina el daño esperado debido al

impacto de una determinada intensidad de la amenaza. La población y activos identificados anteriormente han sido objeto de un “experimento simulado” en el que su respuesta prevista a las condiciones físicas creadas por los eventos ha servido de predicción del daño esperado.

Para ello, se ha generado un conjunto de funciones de predicción de daños y pérdidas que permiten predecir el daño medio para diferentes amenazas. Estas funciones, denominadas curvas de vulnerabilidad o curvas de daño, son específicas para cada caso, tanto para los elementos expuestos como para las amenazas. Las curvas de vulnerabilidad cuantifican el nivel de daño que sufre el activo expuesto para un cierto nivel de amenaza, y también son capaces de evaluar las pérdidas causadas por la alteración de los flujos económicos.

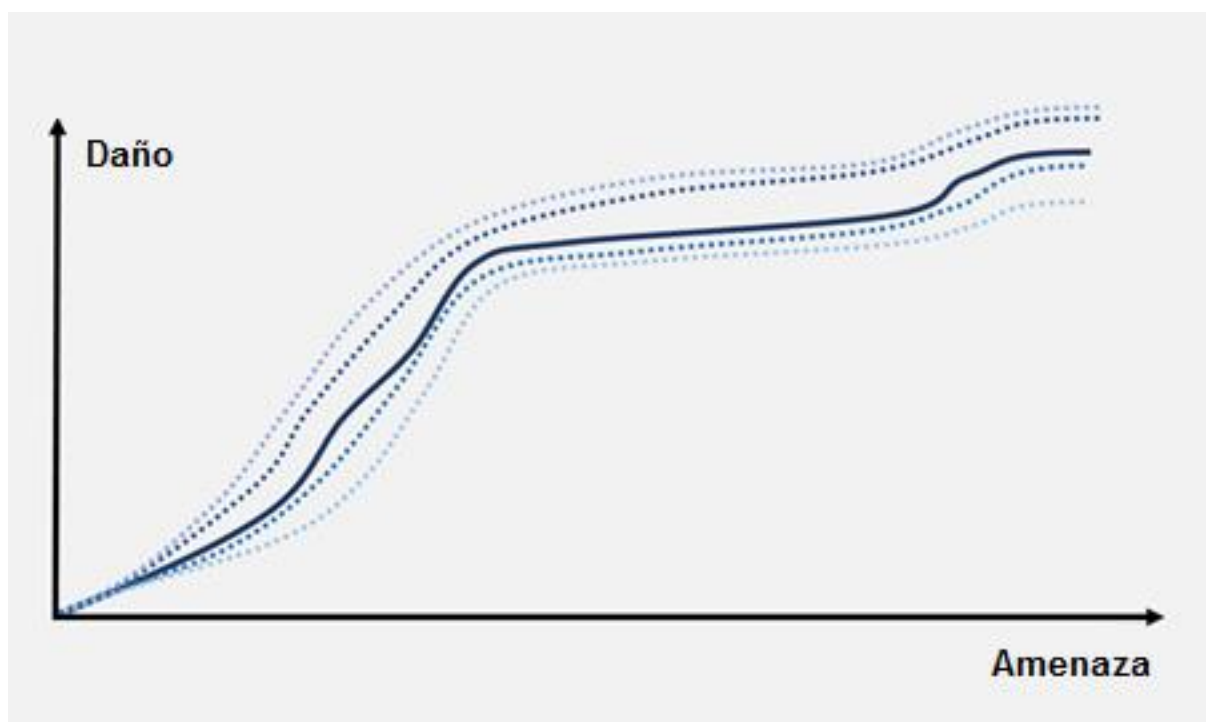


Figura 15. Ejemplo de función de vulnerabilidad.

A continuación, se describe el proceso de construcción de las curvas de vulnerabilidad para la población, las actividades económicas, y los ecosistemas.

3.4.1. Población

Cuando se trata de personas, no es razonable expresar el impacto de la amenaza como un daño gradual; el daño no es diferente cuando una persona se ve afectada por una inundación de 0,5 m de profundidad que cuando se ve afectada por una inundación por encima de 1 m. Por lo tanto, la curva de vulnerabilidad de la población generalmente no tiene una forma creciente en función de la amenaza, sino que se recurre a curvas tipo “umbral”, en las que simplemente se determina un punto en el cual la población pasa a ser considerada como “afectada” por la amenaza. El objetivo en este punto de la metodología es determinar ese umbral a partir del cual se considera la afección sobre la población.

Se ha trabajado por tanto con una función de daño que sólo cuantifica las personas afectadas. Es importante destacar que en este estudio no se han determinado los daños sobre las personas, sino que simplemente se ha contabilizado el número de aquellas que, llegado a una determinada intensidad de la amenaza (en este caso la inundación costera), se ven afectadas en su vida diaria y deben abandonar el lugar en el que se encuentran.

El umbral elegido para el caso de la población, después de análisis previos y puesta en común con miembros de las distintas autoridades uruguayas involucradas en el proyecto, es de 0,30 metros. De forma complementaria, se ha utilizado también un umbral mínimo de 0,01 metros para caracterizar la población situada en la zona inundada, aunque en realidad esta población pueda no resultar afectada por cotas tan bajas de inundación.

3.4.2. Activos socioeconómicos

En el caso del stock físico construido, se han desarrollado curvas de vulnerabilidad ad hoc para caracterizar el impacto en los sectores residencial, industrial y de servicios. Para la generación de las curvas se ha utilizado la base de datos de Huizinga et al. (2017), desarrollada por el JRC (Joint Research Centre). Esta base de datos es una base de datos global que incluye funciones de daño de inundación para 214 países y seis categorías de daño (edificios residenciales, comercio, industria, transporte, infraestructura y agricultura).

En esta fase de la metodología se ha buscado la generación de las funciones daño-pérdida que presentan las consecuencias de los diferentes niveles de amenaza (altura o profundidad de la inundación), para permitir la estimación de los daños locales. El análisis se ha centrado en cuantificar los daños sufridos por los diferentes niveles de amenaza (altura o profundidad de la inundación), y se ha expresado como funciones de pérdida. Las curvas de vulnerabilidad se han obtenido de estas relaciones, y cuantifican el nivel de daño que sufre el activo expuesto para un cierto nivel de amenaza.

En concreto se ha procedido a realizar un ensemble de las curvas propuestas por la base de datos anterior, ponderando las curvas propuestas para América del Sur, América del Norte y Europa, utilizando distintos factores correctivos para cada una de ellas en base a las tipologías edificativas observadas en la zona de estudio (Figura 16).





Figura 16. Edificaciones de distintos puntos de la costa uruguaya. En la imagen superior, la zona de Piriápolis. En la imagen inferior izquierda, Atlántida. En la imagen inferior derecha, Colonia (Fuente: Google Maps).

Las curvas de vulnerabilidad obtenidas se representan en la Figura 17.

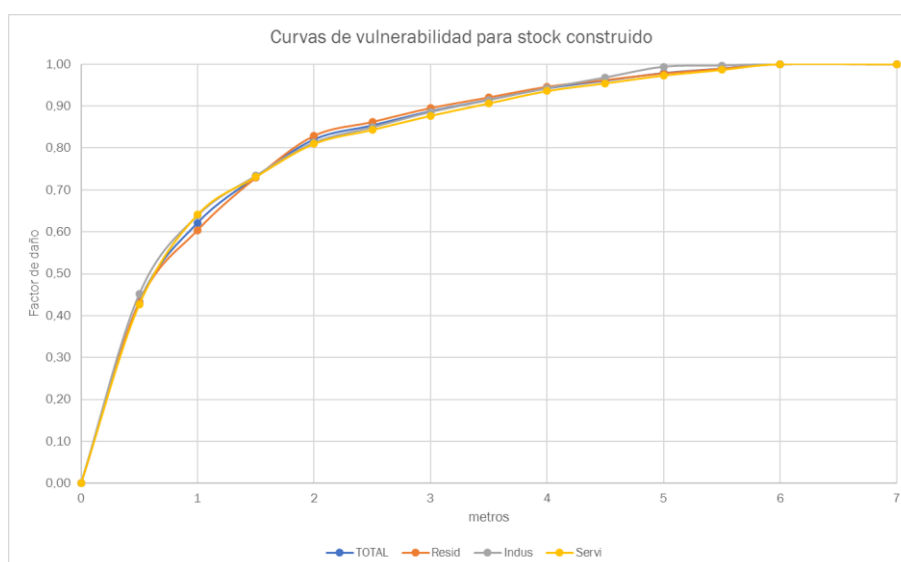


Figura 17. Curvas de vulnerabilidad para las distintas categorías de stock construido propuestas en este estudio, basadas en las curvas de vulnerabilidad de Huizinga et al. (2017).

Se aprecia que las diferencias entre categorías de stock son mínimas. Es por ello que, finalmente, se recurre a utilizar una única curva de vulnerabilidad, combinación de las específicas para cada tipo de stock y cuyos valores se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Curva de vulnerabilidad promedio para el stock construido.

| Cota de inundación (metros) | Factor de daño | Cota de inundación (metros) | Factor de daño |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| 0 | 0,0000 | 3 | 0,8876 |
| 0,5 | 0,4332 | 3,5 | 0,9149 |
| 1 | 0,6215 | 4 | 0,9422 |
| 1,5 | 0,7304 | 4,5 | 0,9604 |
| 2 | 0,8203 | 5 | 0,9786 |

| | | | |
|-----|--------|-----|--------|
| 2,5 | 0,8540 | 5,5 | 0,9893 |
| | | 6 | 1,0000 |

Para las infraestructuras críticas, sin embargo, se ha procedido de forma similar a como se ha realizado con la población. Se han determinado unos umbrales de amenaza a partir de los cuales se ha considerado que la infraestructura está afectada y que, por lo tanto, no puede considerarse operativa y/o en servicio, provocando su fallo y un problema para la sociedad a la que da servicio. El umbral elegido en este caso, de acuerdo con las autoridades uruguayas, ha sido de 0,25 metros de cota de inundación.

3.4.3. Ecosistemas

La vulnerabilidad de los activos naturales se ha basado en la susceptibilidad a la destrucción del hábitat físico, considerando la posible destrucción inherente de los ecosistemas existentes y su capacidad de recuperación y adaptación a las nuevas condiciones climáticas.

Se ha analizado la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros en función de su nivel de protección para su conservación. En la costa uruguaya se encuentran varias figuras de protección a diferentes niveles (por ejemplo, el Sistema Nacional de Áreas Protegidas "Laguna de Rocha" a nivel nacional y la Reserva de la Biosfera "Bañados del Este" a nivel internacional). Además, las especies amenazadas o vulnerables según la Lista Roja de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) (por ejemplo, *Melanophryniscus montevidensis*) y otras especies emblemáticas de especial interés para la conservación están estrechamente vinculadas a los ecosistemas costeros y su presencia hace que los hábitats sean potencialmente más sensibles al cambio climático. Igualmente se ha considerado la relevancia ecológica del área de estudio (ecosistemas situados en la franja costera), utilizando el índice de relevancia ecológica costera (IREC) de Brazeiro et al. (2009) y la clasificación de usos del suelo de DINAMA (MVOTMA).

De nuevo en este caso se ha utilizado un umbral, superado el cual se considera que el ecosistema resulta afectado por la inundación. Después de análisis previos y puesta en común con miembros de las distintas autoridades uruguayas involucradas en el proyecto durante los talleres que tuvieron lugar en Uruguay en mayo de 2019, se ha optado por un umbral de 0,80 metros.

3.5. Modelado del Impacto

3.5.1. Modelo de inundación

El modelo elegido para simular numéricamente la inundación costera ha sido el RFSM-EDA (Rapid Flood Spreading Method - Explicit Diffusion wave with Acceleration term) (Jamieson et al., 2012), un modelo hidrodinámico bidimensional de procesos desarrollado inicialmente en HR Wallingford y diseñado para funcionar de manera eficiente en todas las escalas, proporcionando profundidades de agua sobre el terreno y velocidades con tiempos de ejecución cortos. El modelo es sensible a la rugosidad y resuelve la inundación en tierra debida a condiciones hidrodinámicas costeras y continentales (oleaje, caudal, precipitación, etc.). Está basado en el método de almacenamiento de celdas y responde a una aproximación difusiva de las ecuaciones de aguas someras (SWE, por sus siglas

en inglés). Difiere del resto de modelos difusivos por incorporar un término adicional: la aceleración local (o inercia local), que proporciona mayor estabilidad y menores tiempos de ejecución (Bates et al., 2010). Su algoritmo permite considerar rasgos característicos de la topografía, como crestas y puntos bajos, derivados de un MDT de alta resolución, utilizando elementos computacionales relativamente grandes y por tanto empleando tiempos de ejecución pequeños, pero con buena precisión.

Las hipótesis de partida en las que se basa el modelo son las siguientes:

- El dominio puede ser dividido en depresiones topográficas discretas e hidráulicamente consistentes llamadas Impact Zones (IZs).
- La cota de la superficie de agua en cada IZ es constante.
- La relación entre la cota de la superficie de agua y el volumen en una IZ puede ser definido por una relación no-histerética.
- El flujo entre dos IZs adyacentes se calcula linealmente a lo largo de la interfaz entre ellas, independientemente del resto vecindades.
- La interfaz puede ser caracterizada mediante una relación nivel-anchura, donde se asume que la anchura aumenta cuando lo hace el nivel.

La malla computacional que utiliza RFSM-EDA se basa en la topografía subyacente y está formada por IZs, una serie de polígonos irregulares. Cada una de las IZs está compuesta por celdas (llamadas Impact Cells) que drenan al mismo punto bajo, conocido como Punto de Acumulación. Las interfaces entre IZs son crestas topográficas o puntos altos. La cota más baja de cada interfaz entre IZs corresponde al punto a través del cual el agua fluye entre celdas y se conoce como Punto de Comunicación (Figura 18 y Figura 19).

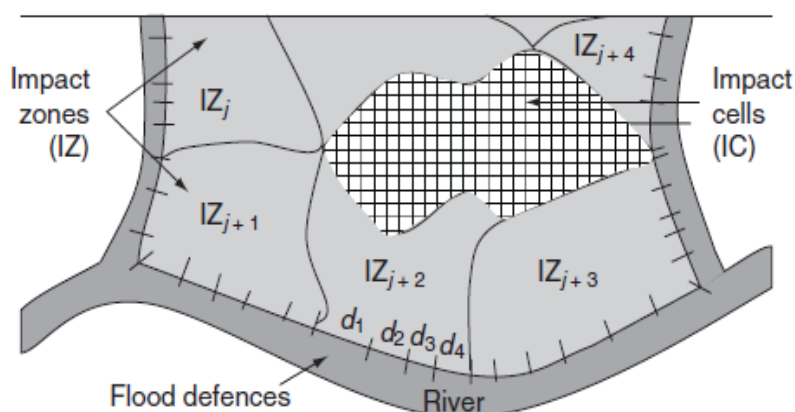


Figura 18. Representación conceptual de las Impact Zones (Gouldby et al., 2008).

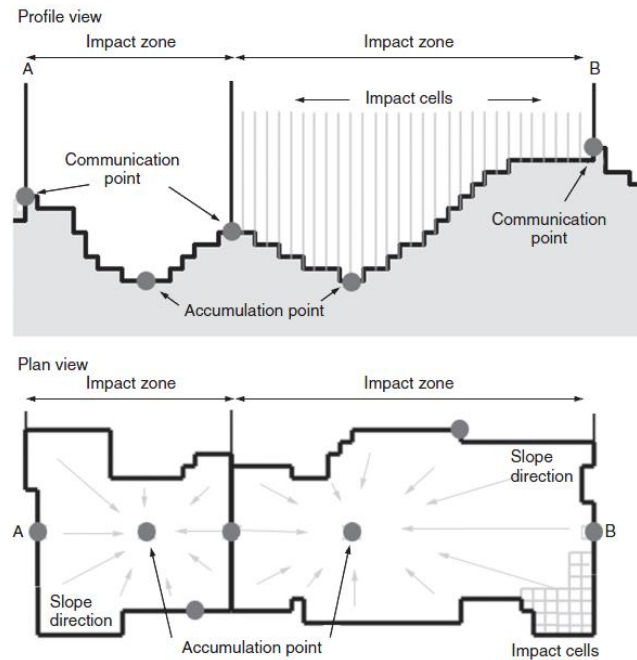


Figura 19. Representación conceptual de los Puntos de Acumulación y Comunicación en una IZ (Gouldby et al., 2008).

Durante la simulación hidráulica, el modelo recibe volúmenes de descarga en la llanura de inundación a través de cada IZ costera (Figura 19). Esos volúmenes de inundación se computan como la diferencia entre la CI del punto más cercano del conjunto de puntos en los que se ha reconstruido la serie de nivel y el correspondiente contorno.

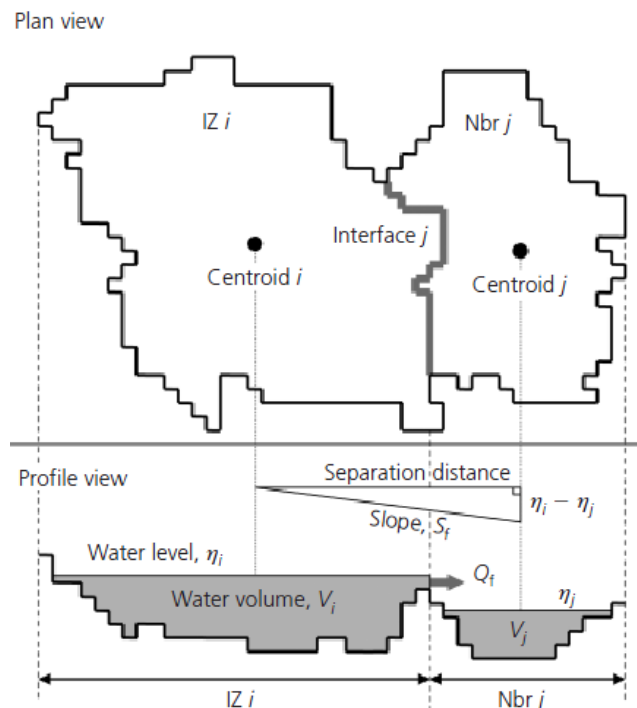


Figura 20. Representación conceptual de dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).

El flujo entre dos IZs se calcula mediante la ecuación de momento:

$$Q_f^{t+\Delta t} = \sum_p \frac{(Q_p^t - g \cdot \Delta t \cdot A_p^t \cdot S_f^t)}{1 + g \cdot \Delta t \cdot n^2 \cdot |Q_p^t| / A_p^t \cdot (R_p^t)^{4/3}} \quad (6)$$

donde Q_f es el flujo que pasa a través de la interfaz (m^3/s), Q_p es el flujo en cada sub-elemento celda (m^3/s), Δt es el paso de tiempo (s), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), A_p es el área de la celda (m^2), R_p es el radio hidráulico, que incluye fricción vertical y horizontal (m), n es el coeficiente de rugosidad de Manning y S_f es la pendiente de la superficie del agua, calculada como la diferencia entre niveles de IZs adyacentes dividida entre la distancia que separa sus centroides.

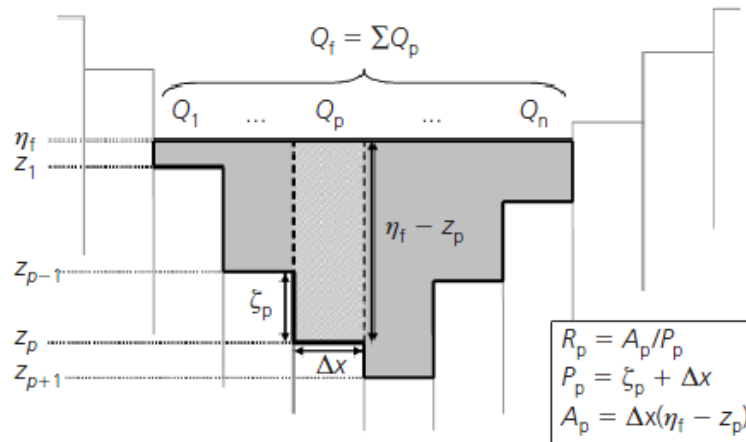


Figura 21. Representación conceptual de la sección transversal de una interfaz entre dos IZs adyacentes (Jamieson et al., 2012).

Una vez iniciada la simulación, ésta progresa mediante la aplicación de la ecuación continuidad (ley de conservación de la masa) para cada IZ:

$$V_i^{t+\Delta t} = V_i^t + \Delta t \cdot \sum_{j=1}^n Q_f^{t+\Delta t} \quad (7)$$

donde V_i es el volumen de la IZ_i (m^3) y n es el conjunto de IZs adyacentes. La estabilidad del modelo y, por tanto, su paso de tiempo adaptativo, están sujetos a la condición de Courant-Freidrichs-Lewy (CFL), que se satisface asegurando que el dominio de dependencia de las interfaces de una IZ no excede el área de la IZ. El máximo paso de tiempo admisible viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta t_{max} = \alpha_{min} \frac{A_i^t}{\sum_j w_f \cdot \max(\|u_i^t\| + c_i^t, \|u_j^t\| + c_j^t)} \quad (8)$$

donde α es el parámetro utilizado para escalar el paso de tiempo, A_i es el área de la IZ_i (m^2), w_f es la anchura de la interfaz (m), u_i es la magnitud del vector velocidad de la IZ_i (m/s) y c_i es la celeridad de la onda (m/s). El hecho de que RFSM-EDA tenga como sub-elemento de la malla computacional la propia topografía es una ventaja y a la vez una limitación pues la resolución del MDT restringe la calidad y fiabilidad de los resultados del modelo. Por otro lado, cabe puntualizar que no es el modelo más adecuado para resolver la inundación en estuarios ya que no propaga la onda de marea.

3.5.2. Bases de datos de exposición física

Topografía

El estudio de la inundación costera se limita a las zonas costeras de baja altitud (LE CZ, por sus siglas en inglés), término que se define en McGranahan et al. (2007) como el área contigua a la costa que se encuentra a menos de 10 metros sobre el nivel del mar. De esta manera, el área de estudio de la costa de Uruguay (o el área costera potencialmente inundable) se define cortando la topografía a una cota de 10 metros.

La topografía viene caracterizada por el Modelo Digital de Terreno (MDT). El MDT disponible, con una resolución horizontal de 2,5x2,5 metros, fue encargado por el MVOTMA y desarrollado por IDEUy dentro del marco del proyecto. Dado que el modelo de inundación utiliza la topografía subyacente, es fundamental que en el MDT estén correctamente definidos los elementos que configuran la costa y que ejercen de sistema de protección frente a inundaciones y erosiones. El MDT se ha revisado y modificado para incluir las defensas costeras.

Además, se ha recortado el cauce de los principales cursos fluviales para poder introducir la condición de contorno. En la Figura 22 se muestra una zona del MDT, cortado a cota 10 para definir la zona potencialmente inundable, y con el cauce principal del río recortado, lo que permite introducir condición de contorno tanto en la costa como en el cauce del río.

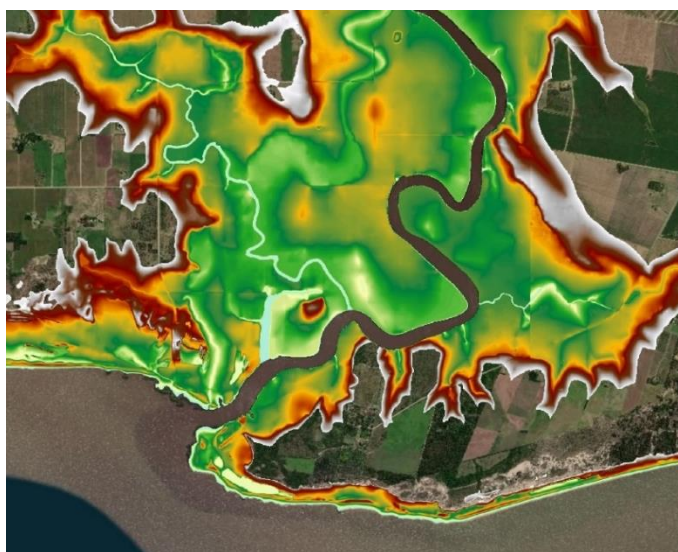


Figura 22. MDT de la zona potencialmente inundable, con vaciado del cauce principal del río.

Rugosidad

El modelo de inundación es sensible a la rugosidad del terreno, por lo que se asigna a cada tipo de suelo un coeficiente de rugosidad de Manning. Para identificar los distintos tipos de suelo se ha utilizado la clasificación del Atlas de Cobertura del Suelo del Uruguay (2015), basado en el Land Cover Classification System (LCCS). En la Tabla 6 se muestran los tipos de uso del suelo considerados y los coeficientes de rugosidad asociados, obtenidos o interpolados de valores existentes en la literatura (Barnes, 1967; Arcement y Schneider, 1989 via Bunya et al., 2010; Chow, 1959).

Tabla 6. Clasificación de los usos del suelo y coeficiente de rugosidad asociado.

| Usos del suelo | Coficiente de rugosidad de Manning |
|---|------------------------------------|
| Áreas Terrestres Cultivables y Manejables | 0,04 (Chow, 1959) |
| Vegetación Natural y Seminatural | 0,06 (Chow, 1959) |
| Vegetación Natural y Seminatural Acuática o Regularmente Inundada | 0,03 (Bunya et al., 2010) |
| Superficies Artificiales y Áreas Asociadas | 0,12(Bunya et al., 2010) |
| Áreas Descubiertas o Desnudas | 0,03 (Bunya et al., 2010) |
| Cuerpos Artificiales de Agua, Nieve y Hielo | 0,02 (Bunya et al., 2010) |
| Cuerpos Naturales de Agua, Nieve y Hielo | 0,02 (Bunya et al., 2010) |

3.5.3. Mallas de cálculo

El modelo crea una malla irregular basada en la topografía subyacente, por ello la importancia de disponer de un MDT de alta resolución. La malla está formada por polígonos irregulares denominados Impact Zones (IZs), y que están formados a su vez por celdas (Impact Cells). Tanto la malla computacional como los mapas de inundación que se generan tienen siempre la misma resolución que el MDT.

La costa de Uruguay tiene una longitud de aproximadamente 700 km, lo que imposibilita el uso de una única malla computacional. Se ha dividido la zona de estudio (área costera con elevación < 10 metros) en subzonas de aproximadamente 60 km de costa cada una, asegurando un solape de 1 km entre ellas y teniendo cuidado en realizar el solape en zonas altas (y, por ende, zonas con poca área potencialmente inundable). Inicialmente el número de celdas computacionales (igual al número de píxeles del MDT) de las subzonas sobrepasaba la capacidad de computación del modelo, por lo que para reducir el número de celdas se decidió bajar la resolución del MDT de 2,5 a 4 metros, que en un estudio a escala nacional sigue siendo una resolución muy alta.

Se ha trabajado con un total de 13 mallas computacionales (Figura 23) formadas por IZs con un tamaño mínimo de 5.000 m² y un tamaño máximo de 10.000 m². Como se puede observar en la Figura 23, la extensión de la malla viene limitada por el número de celdas computacionales de la misma, y por eso las mallas con menor extensión en el eje x tienen mayor extensión en el eje y (p.e., la malla morada, que se corresponde con el estuario del río Santa Lucía), y las mallas con mayor extensión en el eje x tienen menor extensión en el eje y (p.e., la malla amarilla, que se corresponde con Montevideo). En la Figura 24 se puede ver una ampliación del mapa de IZs en la desembocadura del río Santa Lucía, y se puede apreciar cómo las IZs se adaptan a la topografía, especialmente a lo largo del cauce.

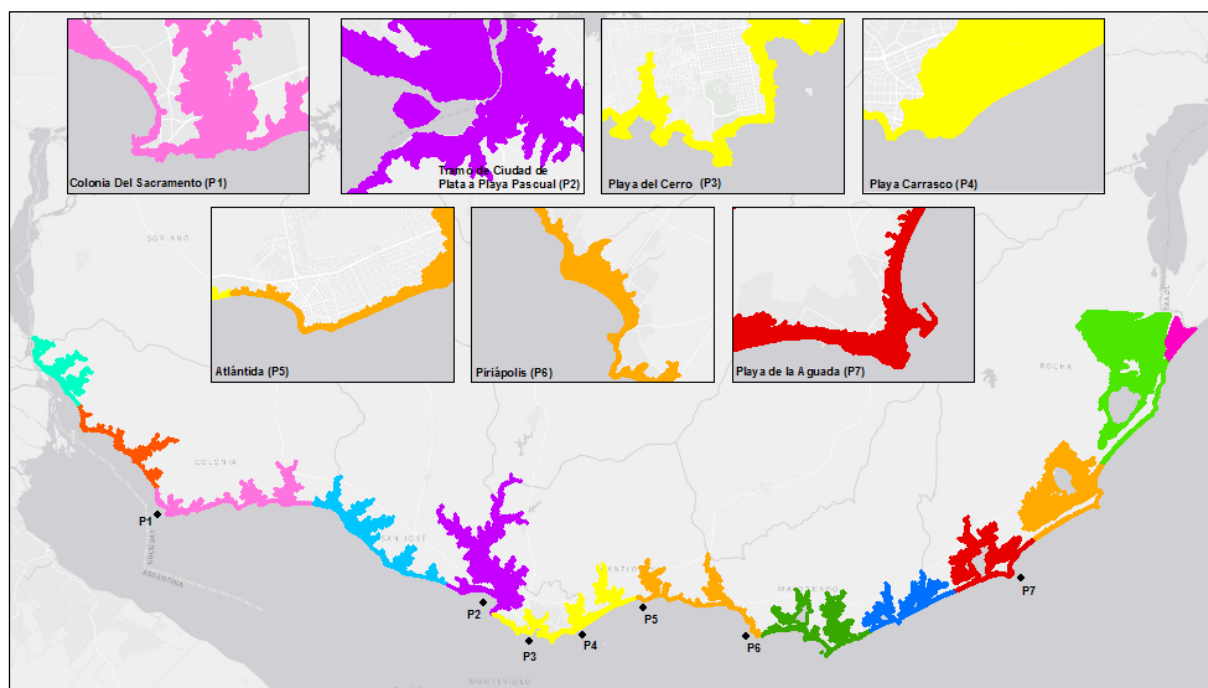


Figura 23. Zonificación de la costa uruguaya en 13 mallas computacionales.



Figura 24. Mapa de Impact Zones en la desembocadura del río Santa Lucía.

Una vez generadas las mallas computacionales, se ha forzado el modelo con información de la cota de inundación, CI, a lo largo de toda la costa y de los cauces de los ríos, para cada uno de los escenarios definidos previamente, y se han obtenido los mapas de inundación. En la Figura 25 se muestra el mapa de inundación (extensión y altura de inundación, expresada en metros) asociado a la CI de periodo de retorno de 100 años, para el horizonte 2100, RCP8.5, valor medio de ANMM, generado en las mallas.

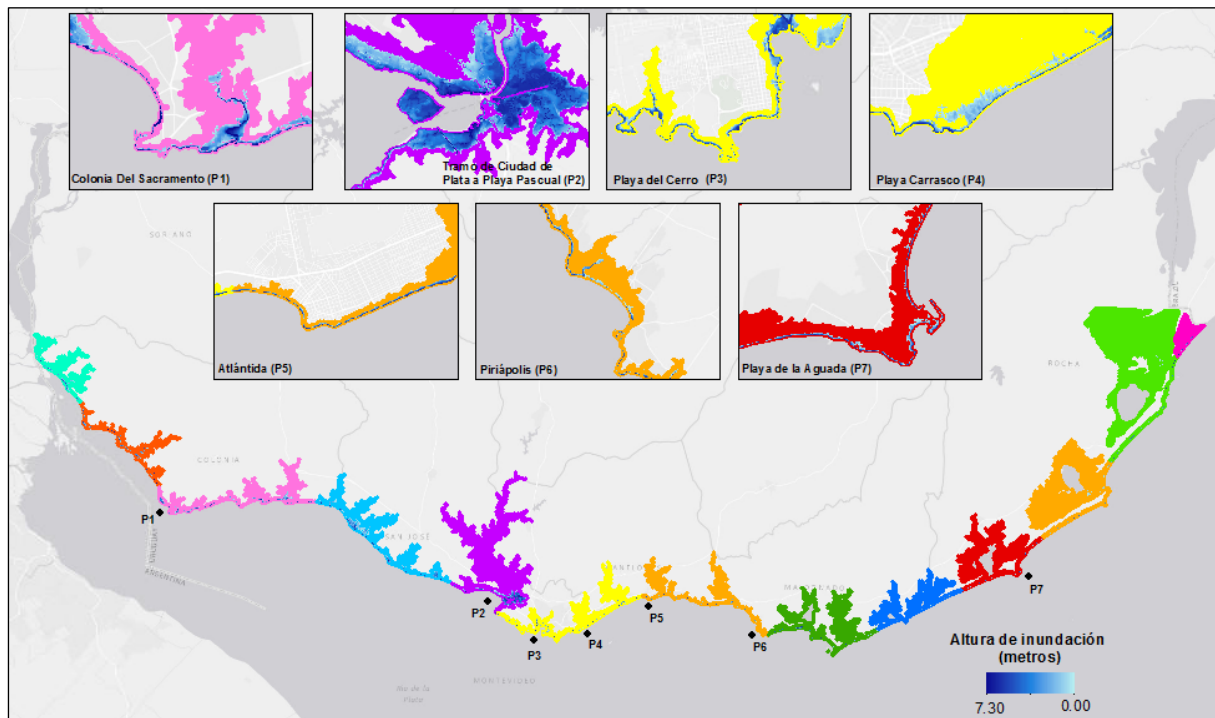


Figura 25. Extensión y altura (m) de la inundación asociada a la CI de retorno de 100 años en 2100, para el RCP8.5.

3.6. Análisis del Riesgo

El objetivo de este paso de la metodología es definir la distribución espacial y temporal de riesgo, cuya magnitud viene determinada por la distribución de la probabilidad de daño existente en las diferentes categorías de exposición.

Tal y como se ha definido al inicio del documento, el riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y la peligrosidad, y lleva asociado una determinada probabilidad de ocurrencia (periodo de retorno, T_r). De esta manera, una vez obtenidos los mapas de inundación, estos se han cruzado con los datos de exposición. Los valores de la altura de inundación alcanzada en cada uno de los píxeles del mapa de inundación se introducen en las curvas de vulnerabilidad correspondientes, obteniéndose un factor de daño, que, combinado de nuevo con la exposición, da finalmente el resultado esperado de las consecuencias del riesgo.

En la Figura 26 se muestra, como ejemplo, el cruce del mapa de inundación asociado a la CI de periodo de retorno 100 años, para el horizonte 2100, RCP8.5, con la capa de activos construidos, incluyendo el stock residencial, industrial y de servicios, en Carrasco (Montevideo). Se pueden identificar claramente las playas, zonas bajas y activos construidos que resultan afectados por la inundación, y se puede observar cómo la altura de inundación (expresada en metros), disminuye a medida que avanza la inundación tierra adentro.

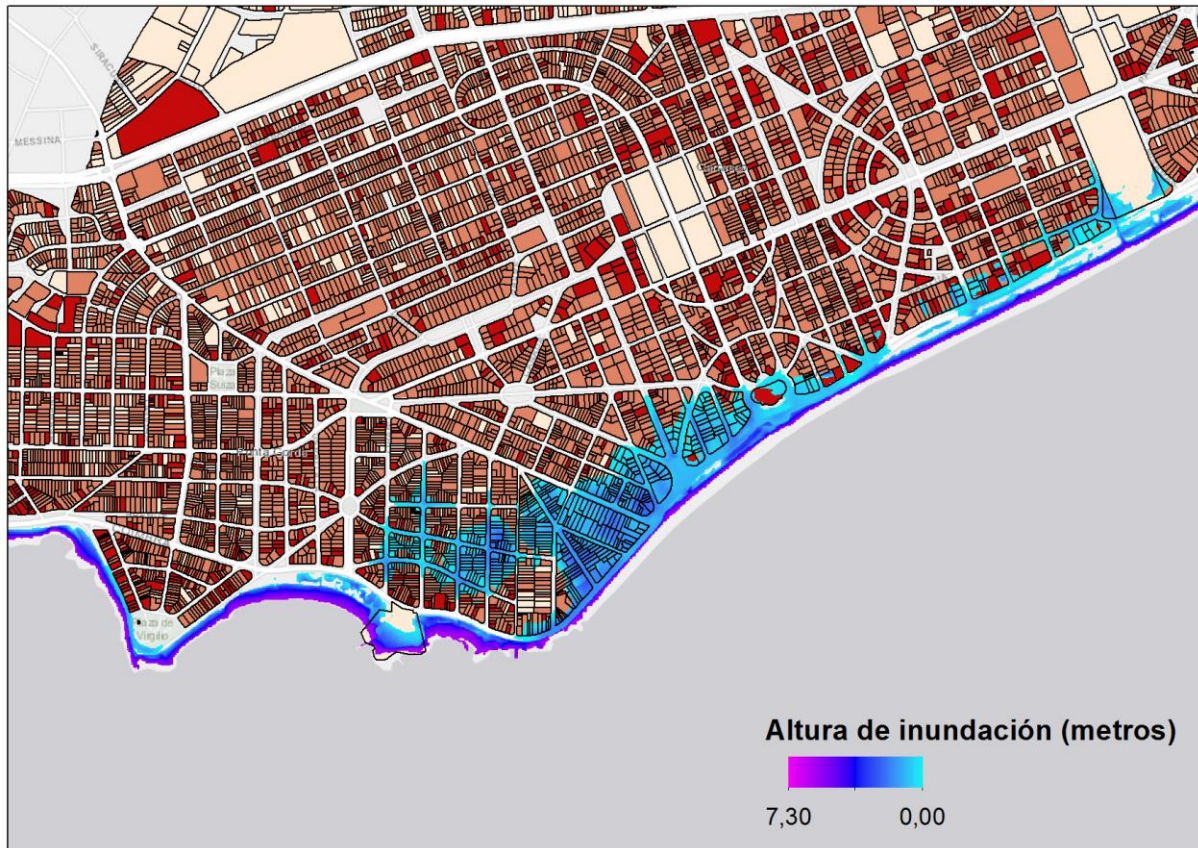


Figura 26. Cruce de del mapa de inundación asociada a la CI de 100 años de periodo de retorno, para el horizonte 2100, RCP8.5, valor medio de ANMM, con la capa de activos construidos (incluyendo el stock residencial, industrial y de servicios) (Carrasco, Montevideo).

Con el cruce de las capas de inundación con las capas de exposición y la aplicación de la función de vulnerabilidad, se obtiene un conjunto de mapas espaciales de riesgo de inundación costera, así como un conjunto de indicadores numéricos, sobre la población, el stock construido (residencial, industrial y servicios), las infraestructuras críticas y los ecosistemas (Tabla 7), para los escenarios climáticos de inundación recogidos en la Tabla 3.

Tabla 7. Activos considerados en la evaluación del daño.

| Activos | |
|---------------------------|-------------|
| Población | |
| Stock construido | Residencial |
| | Industrial |
| | Servicios |
| Infraestructuras críticas | |
| Ecosistemas | |

Es habitual representar la información anterior en una gráfica como la que se muestra en la Figura 27, en la que, para un activo determinado, un horizonte temporal y escenario, se obtienen los daños para cada periodo de retorno. Como puede observarse en este caso, los eventos con mayores periodos de retorno son más improbables, pero producen daños mayores. De esta gráfica se pueden obtener indicadores sintéticos que permiten comparar el riesgo de forma más sintética. Uno de los indicadores más utilizados es el Daño Anual Esperado (DAE), que expresa de forma anualizada los daños observados para distintos periodos de retorno, y que se calcula integrando el área bajo la curva (Olsen, 2015).

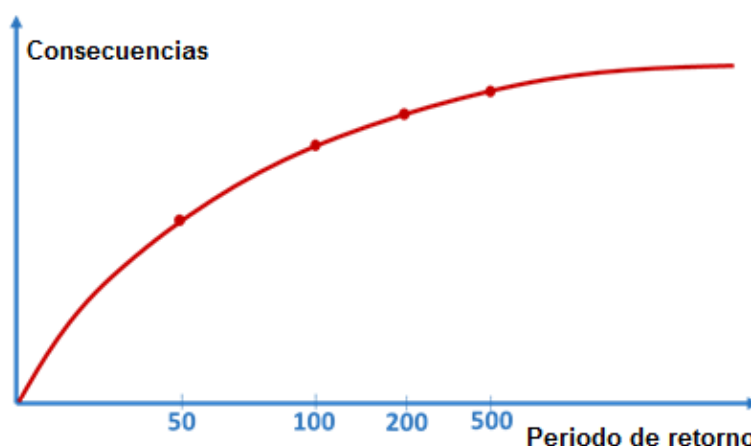


Figura 27. Representación teórica de las consecuencias producidas por eventos de diferente periodo de retorno sobre un activo determinado para un horizonte temporal y escenario dados.

El análisis de los diferentes indicadores de riesgo asociados a los activos puede ser expresado para distintas escalas espaciales. Aunque en este análisis se ha obtenido la información con muy alta resolución espacial (mapas de peligrosidad y exposición con resolución de 4x4 metros), se ha agregado la información a nivel nacional, nivel de intendencia, y nivel de municipio/ departamento censal (Tabla 8), para facilitar la visualización de los resultados.

Tabla 8. Escalas de agregación de los resultados

| Escala de agregación de los resultados |
|---|
| Nacional – Toda la costa uruguaya |
| Nivel de intendencia (Colonia, San José, Montevideo, Canelones, Maldonado, Rocha) |
| Nivel de municipio/ departamento censal |

3.6.1. Población

El riesgo sobre la población se ha cuantificado a través de la cuantificación directa de las personas que resultan afectadas por el impacto de inundación costera teniendo en cuenta el umbral definido en la vulnerabilidad.

3.6.2. Activos socioeconómicos

El riesgo sobre el stock construido se ha cuantificado en unidades monetarias, puesto que en la caracterización de la exposición se ha obtenido la valoración económica de los edificios construidos.

El riesgo sobre las infraestructuras críticas se ha cuantificado, al igual que para la población, mediante la contabilidad directa de las infraestructuras afectadas bajo el umbral considerado.

3.6.3. Ecosistemas

El riesgo sobre los ecosistemas viene determinado, en una primera aproximación, por la cuantificación de la superficie afectada, dado el impacto y la vulnerabilidad definidas. Esta superficie se puede expresar en unidades monetarias si se dispone de la valoración económica de los servicios proporcionados por cada uno de los servicios ecosistémicos presentes en los ecosistemas afectados por la inundación.

Como resultado, siguiendo con el ejemplo de la Figura 26, se representa en la Figura 28 el Daño Anual Esperado sobre los activos construidos, agregado a nivel municipal/ departamento censal y presentado en el formato de mapa que se ha generado para el Entregable D4.1 (IHCantabria, 2019b).

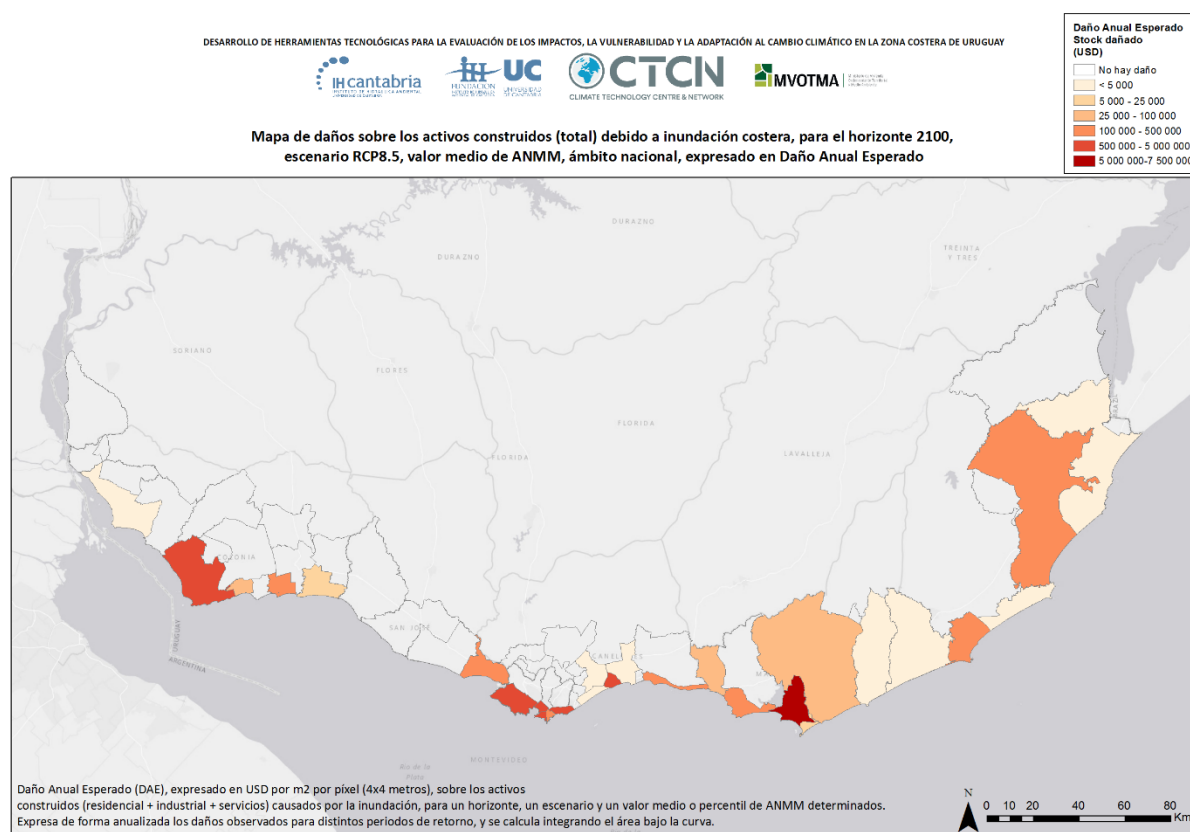


Figura 28. Distribución espacial del Daño Anual Esperado, para el horizonte 2100 y el RCP8.5, debido a la inundación costera asociada a la CI de periodo de retorno 100 años, para el horizonte 2100, RCP8.5, valor medio de ANMM, sobre los activos construidos.

3.7. Resumen de resultados del Riesgo de Inundación Costera

En la tabla siguiente se recogen los resultados que se han obtenido de cada fase de la metodología de evaluación del riesgo de inundación costera, para cada uno de los escenarios recogidos en la Tabla 3.

Tabla 9. Resumen de resultados obtenidos de la metodología de evaluación del riesgo de inundación costera.

| COMPONENTE DEL RIESGO | RESULTADOS DE CADA FASE METODOLÓGICA |
|-----------------------|--|
| EXPOSICIÓN | <u>Mapas de exposición de alta resolución</u> <ul style="list-style-type: none"> • Población • Stock construido total • Stock construido residencial • Stock construido industrial • Stock construido servicios • Infraestructuras críticas • Ecosistemas naturales |
| VULNERABILIDAD | <u>Curvas de vulnerabilidad para cada uno de los activos</u> |
| IMPACTO | <u>Mapas de inundación de alta resolución</u> <ul style="list-style-type: none"> • Inundación asociada a la CI del nivel del mar de percentil 80% • Inundación asociada a la CI de periodo de retorno $Tr= 5, 10, 25, 50, 100$ y 500 años |
| RIESGO | <u>Mapas de consecuencias de alta resolución para cada uno de los activos (población, stock – total, residencial, industrial, servicios –, infraestructuras críticas, ecosistemas naturales)</u> <u>Indicador de daño anual esperado (AED) para cada uno de los activos (población, stock – total, residencial, industrial, servicios –, infraestructuras críticas, ecosistemas naturales), para cada uno de los escenarios, para todo el país y para cada una de las intendencias.</u> |

4. ANÁLISIS DE LA EROSIÓN

La erosión inducida por el cambio climático es uno de los impactos más graves a los que se enfrentan los sistemas costeros en todo el mundo. Debido a su complejidad y dinamismo, las playas experimentan cambios en un gran rango de escalas espaciales y temporales, y su forma no es fija en el tiempo, sino que está en constante evolución (Stive et al., 2002, 2009; Miller y Dean, 2004). Los procesos erosivos vienen dados por una serie de factores físicos, en particular, por variaciones en el nivel del mar, en la altura y dirección del oleaje o en las aportaciones directas de sedimento, lo que conduce a un desequilibrio en el balance sedimentario. El aumento de las inundaciones debidas a eventos extremos, la inundación permanente de las zonas bajas, la aceleración de la erosión costera, la pérdida de humedales y el incremento de la intrusión salina se encuentran entre los principales impactos potenciales del ANMM (Wong et al., 2014).

El análisis de la migración de la línea de costa puede simplificarse disociando los procesos longitudinales (p.e., Zacharioudaki y Reeve, 2011; Vitousek et al., 2017), que son los principales responsables de los cambios a largo plazo, de los ocasionados por procesos transversales (p.e., Callaghan et al., 2008; Wainwright et al., 2015) que tienden a producir cambios en escalas temporales mucho menores. Sin embargo, y como excepción a esta generalización, los cambios en la línea de costa producidos por las variaciones en el nivel medio del mar provocan un reajuste del perfil a las nuevas condiciones de nivel y, por tanto, una respuesta transversal del mismo (Miller y Dean, 2004).

4.1. Resumen de la metodología utilizada

De manera análoga a como se ha formulado para la inundación, la metodología de evaluación del riesgo de erosión costera planteada en este estudio propone que la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad se desarrollan de forma individual, y se integran para obtener estimaciones del riesgo en términos económicos.

La hipótesis de trabajo fundamental se basa en asumir que la evolución de la línea de costa se puede evaluar analizando, de forma separada, los cambios en los procesos de transporte transversales (perpendiculares a la costa) y longitudinales (paralelos a la costa). A su vez, los procesos transversales incluyen dos escalas temporales: los cambios de corto plazo inducidos por los cambios en el oleaje y nivel del mar (incluyendo la marea astronómica y meteorológica) y los de largo plazo debidos esencialmente al aumento del nivel medio del mar. Por otro lado, para el transporte longitudinal se considera únicamente los cambios inducidos por el oleaje. De igual manera que se hizo para la inundación y dado que los cambios proyectados en la marea meteorológica y el oleaje son pequeños, se ha considerado que el análisis de riesgo se puede hacer considerando las series históricas de oleaje y marea meteorológica combinadas con las proyecciones del aumento del nivel medio del mar como forzamiento principal, pero no exclusivo, de la erosión futura.

En la Figura 29 se muestra el diagrama de flujo que se ha seguido para la obtención de los cambios en la línea de costa.

Para la aplicación de la metodología propuesta, el primer paso es, tal y como aparece en las cajas azules de la Figura 29, construir con las series históricas y futuras de oleaje y nivel del mar (incluyendo

la marea astronómica y la marea meteorológica) y la serie de aumento del nivel medio del mar, los escenarios climáticos a simular (peligrosidad).

Para la aplicación de la metodología propuesta, el segundo paso es aplicar un modelado del transporte transversal, que tenga en cuenta la erosión por oleaje, nivel y aumento del nivel medio del mar; y un modelado del transporte longitudinal, que tenga en cuenta la erosión por oleaje, con el objetivo de obtener una estimación de los cambios en la línea de costa inducidos por efectos de corto y largo plazo, tal y como aparece en las cajas moradas de la Figura 29.

En el tercer paso, la exposición de las playas se define a través de criterios ambientales y sociales, y factores que tengan en cuenta las características, calidad y servicios de cada playa. En el cuarto paso, la vulnerabilidad de las playas se determina por medio de la aplicación de funciones de daño. Como resultado se tiene el riesgo de pérdida de valor recreativo y de protección de las playas de estudio.

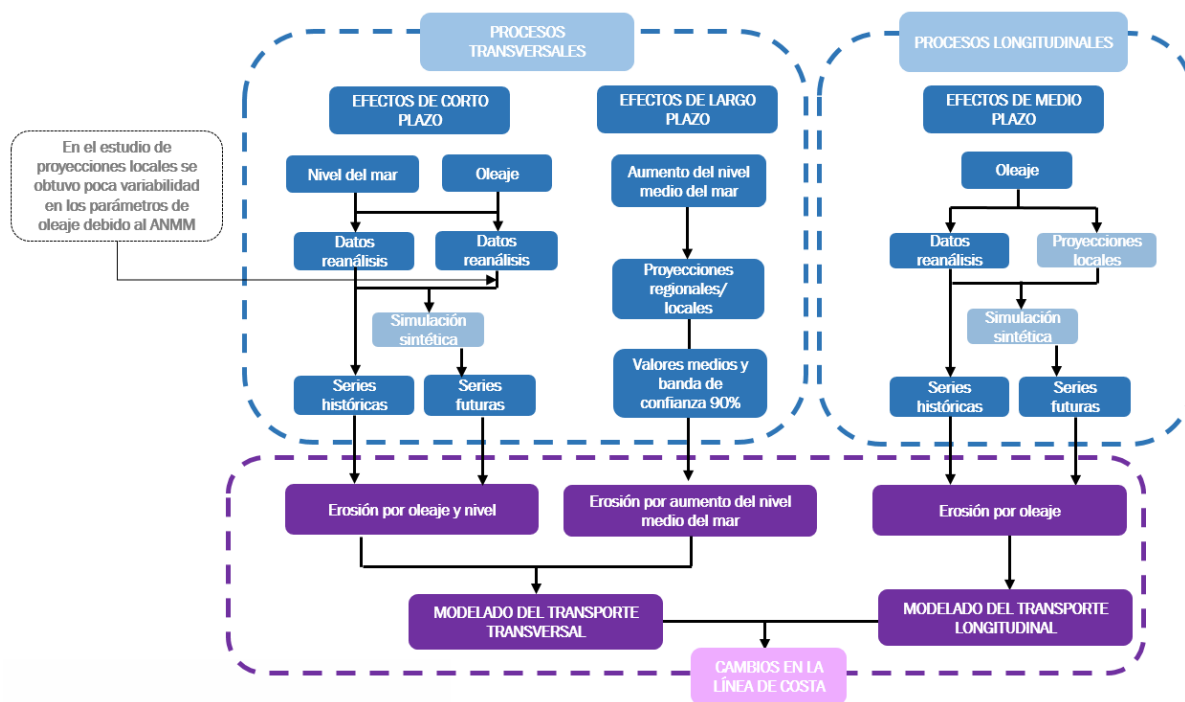


Figura 29. Diagrama de flujo de la metodología seguida para obtener los cambios en la línea de costa

4.2. Análisis de la Peligrosidad (amenaza)

4.2.1. Bases de datos de reanálisis y proyecciones

Al igual que en el impacto de inundación costera, el estudio del oleaje y el nivel del mar se ha realizado a partir de las bases de datos históricas generadas por el IMFIA dentro del marco del proyecto (IMFIA 2018a; IMFIA 2018b). El oleaje se ha propagado hasta la rotura con la formulación de Snell, utilizando el criterio de rotura espectral ($\gamma=0,55$).

Como se menciona en la sección 3.2.2, dado que los cambios en los parámetros de oleaje y el residuo del nivel del mar debido al ANMM son pequeños, no se han considerado cambios en el oleaje o el residuo del nivel del mar. Las series futuras de oleaje y nivel del mar (considerando como futuro el

periodo 2010-2100) se han generado a partir de la sucesión de las series históricas. A diferencia de inundación, donde se trabaja con el ANMM asociado a horizontes temporales determinados, en erosión se trabaja con la evolución temporal de la línea de costa lo que requiere hacer uso de la evolución temporal de las dinámicas. Para ello, se ha considerado la evolución temporal del ANMM a lo largo del siglo XXI, para el RCP4.5 y el RCP8.5, y se ha tomado el valor medio y la banda de confianza del 90% (Figura 4) (Church et al., 2013). De igual manera que en el impacto de inundación, dado que las proyecciones de ANMM divergen a partir de la mitad del siglo XXI (Figura 4), como proyecciones de ANMM, en 2050, con el fin de reducir el número de casos a considerar, se ha tomado el valor medio de los RCPs disponibles.

4.2.2. Escenarios de erosión costera

La respuesta de una playa ante un evento de erosión depende no sólo de los eventos o forzamientos actuales, sino también de los eventos que hayan tenido lugar en el pasado, de manera que la respuesta de la playa a un evento actual es la respuesta acumulada ante una sucesión de eventos pasados. Debido a la influencia de la cronología en la erosión costera, para determinar el retroceso o avance de una playa en un horizonte determinado (p.e., 2050) es fundamental tener en cuenta las series temporales de las dinámicas.

Por ello, para determinar el retroceso de las playas debido a la erosión costera provocada por el oleaje, la marea astronómica, la marea meteorológica y el aumento del nivel medio del mar en los horizontes 2050 y 2100, se ha reconstruido la serie temporal de evolución de la línea de costa durante el periodo histórico 1985-2016, y durante los periodos futuros 2010-2050 y 2010-2100 (Tabla 10).

Al disponer de la serie temporal de evolución de la línea de costa, se pueden obtener los resultados siguientes: retroceso estructural asociado al ANMM y retroceso de periodo de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. Obsérvese que existe una diferencia esencial con los resultados obtenidos para la inundación. Mientras que en esta metodología los mapas de peligrosidad de la inundación corresponden a periodos de retorno del evento extremo que genera la inundación, para la erosión se obtiene el retroceso de un periodo de retorno dado, independientemente de cuál haya sido la combinación de forzamientos que haya dado lugar a dicho retroceso. Esto se debe esencialmente al hecho de que la inundación se ha gestionado habitualmente a partir de este tipo de mapas y existe normativa específica que obliga a obtener los mapas de peligrosidad para periodos de retorno determinados. Sin embargo, esta práctica no es habitual para la erosión, donde lo que promueve la acción en términos de la reducción de riesgo o adaptación es no superar un retroceso determinado. Mediante la metodología propuesta se obtiene una serie temporal de evolución de la línea de costa del presente a fin de siglo que permite ajustar una función de extremos a los retrocesos para obtener la evolución de la línea de costa para diferentes periodos de retorno.

Conviene remarcar también que el impacto de inundación, para los escenarios climáticos con horizonte 2050, se ha modelado la inundación considerando el ANMM de la media del RCP4.5 y RCP8.5. Se ha procedido de esta manera ya que no tiene sentido generar mapas de inundación para el RCP4.5, mapas de inundación para el RCP8.5, y luego obtener la media de cada celda del mapa para obtener mapas asociados al ANMM medio de los dos RCPs. Por el contrario, en el impacto de erosión,

al trabajar con la serie temporal de la evolución de la línea de costa, es más lógico simular por un lado la evolución de la línea de costa asociada al RCP4.5, y por otro la evolución de la línea de costa asociada al RCP8.5. El retroceso (tanto el retroceso estructural como el retroceso de un periodo de retorno) de la línea de costa en 2050 es la media del retroceso para el RCP4.5 y el RCP8.5.

Tabla 10. Escenarios climáticos de erosión costera

| Horizonte | Escenario climático | Características del forzamiento | | | |
|-----------|---------------------|---------------------------------|--|--|--------|
| | | Periodo simulado | Condiciones oleaje y nivel del mar | ANMM | RCP |
| Presente | E1 | 1985-2016 | Serie histórica de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | - | - |
| 2050 | E2 | 2010-2050 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 5% | RCP4.5 |
| 2050 | E3 | 2010-2050 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al valor medio | RCP4.5 |
| 2050 | E4 | 2010-2050 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 95% | RCP4.5 |
| 2050 | E5 | 2010-2050 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 5% | RCP8.5 |
| 2050 | E6 | 2010-2050 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al valor medio | RCP8.5 |
| 2050 | E7 | 2010-2050 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 95% | RCP8.5 |
| 2100 | E8 | 2010-2100 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 5% | RCP4.5 |
| 2100 | E9 | 2010-2100 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al valor medio | RCP4.5 |
| 2100 | E10 | 2010-2100 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 95% | RCP4.5 |
| 2100 | E11 | 2010-2100 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 5% | RCP8.5 |
| 2100 | E12 | 2010-2100 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al valor medio | RCP8.5 |
| 2100 | E13 | 2010-2100 | Series futuras de oleaje en rotura, marea meteorológica y marea astronómica | Serie de ANMM correspondiente al percentil 95% | RCP8.5 |

4.3. Análisis de la Exposición

Como ya se ha comentado, la exposición debe siempre adaptarse a la amenaza e impactos bajo consideración. Para el estudio de la erosión costera, el activo susceptible de ser afectado por la misma se reduce a las playas del litoral uruguayo. El análisis de la exposición debe centrarse, por tanto, en caracterizar estas playas.

Esta caracterización tiene una primera vertiente física, en la que una playa viene definida por sus parámetros más puramente descriptivos, principalmente (pero no exclusivamente) sus dimensiones, que nos permiten obtener su superficie. Sin embargo, para poder obtener un resultado más homogéneo con el análisis de la inundación costera y comparable con otros estudios, resulta muy interesante determinar el valor económico de las playas. Para realizar esta cuantificación económica se ha recurrido al estudio de la playa como un ecosistema que proporciona servicios ecosistémicos.



Figura 30. Servicios ecosistémicos (EMA, 2005)

Los servicios ecosistémicos que puede proporcionar un ecosistema se pueden agrupar en cuatro grandes categorías (FAO, 2019):

- Servicios de abastecimiento: son los beneficios materiales que las personas pueden obtener de la explotación de los ecosistemas, por ejemplo, el suministro de alimentos, agua, fibras, madera y combustible.
- Servicios de regulación: son los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos y de las variables ambientales y climatológicas, por ejemplo, la regulación de la

calidad del aire y la fertilidad de los suelos, el control de las inundaciones y las enfermedades y la polinización de los cultivos.

- Servicios de apoyo: son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, por ejemplo, ofreciendo espacios en los que viven las plantas y los animales, permitiendo la diversidad de especies y manteniendo la diversidad genética.
- Servicios culturales: son los beneficios inmateriales, culturales y recreativos que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo, la fuente de inspiración para las manifestaciones estéticas y las obras de ingeniería, la identidad cultural y el bienestar espiritual.

Dentro de cada una de estas categorías, aparecen posibles servicios ecosistémicos que pueden ser analizados de forma independiente y que ayudan a obtener el valor total de los servicios proporcionados por un ecosistema.

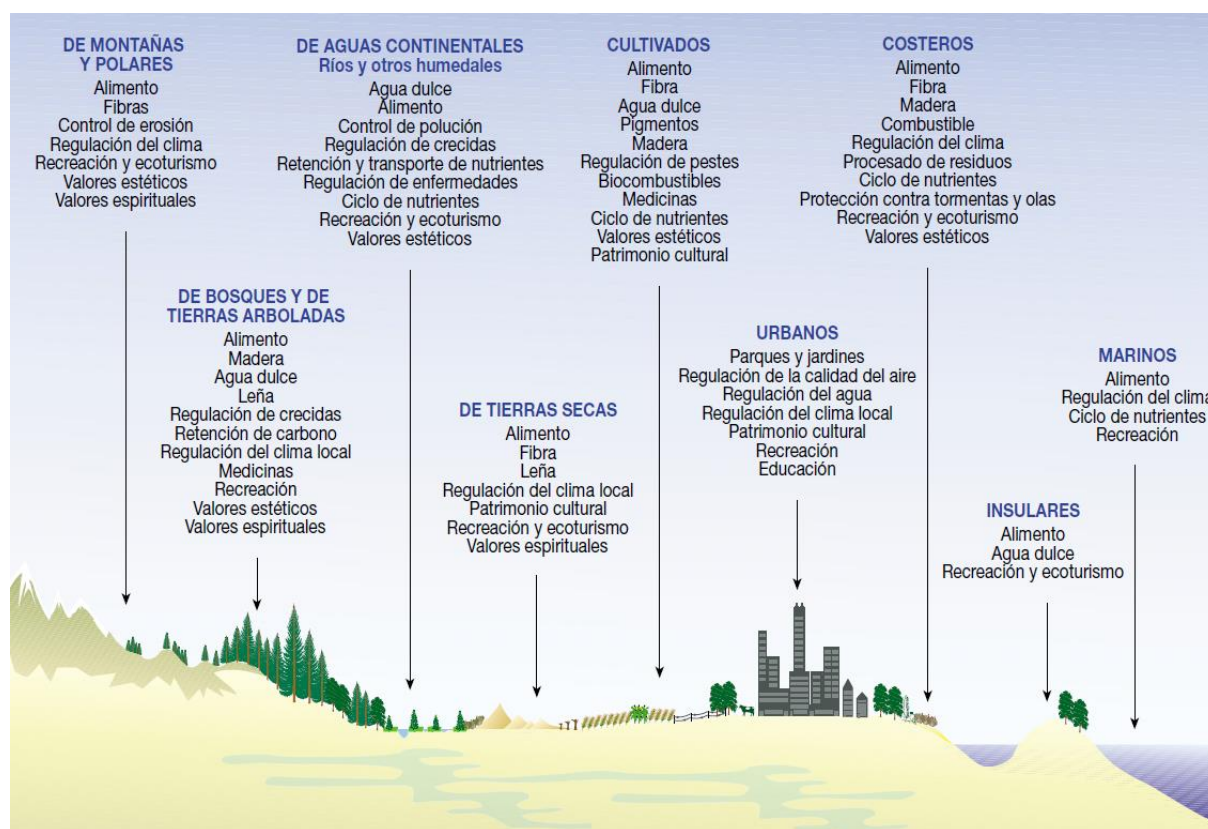


Figura 31. Ejemplos de servicios ecosistémicos proporcionados por los ecosistemas (EMA, 2005)

En este proyecto, en una primera aproximación y para la escala nacional, se ha recurrido a estudiar dos de todos los servicios proporcionados por las playas: el valor de protección frente a inundación (de regulación), y el valor recreativo (cultural).

Este valor obtenido es un indicador expresado en unidades monetarias cuya estimación nos permite determinar diferencias entre arenas a través de la cuantificación del valor recreativo y de protección proporcionado por las playas.

Es necesario aclarar en este punto que el valor que se obtenga de la playa como activo económico será siempre una cota inferior, al no ser posible en la práctica valorar económicamente todos los servicios que proporciona la playa como ecosistema natural.

Es igualmente importante destacar que esta valoración económica en ningún momento representa un precio de mercado de las playas de Uruguay.

4.3.1. Valor de protección

El valor de protección frente a inundación proporcionado por las playas viene determinado por la cantidad de activos que se encuentran en su cercanía, y que son los que se ven protegidos por la propia existencia de la playa como disipadora de la energía del oleaje. Cuanto mayor es la cantidad y el valor de edificios (residenciales, industriales, de servicios, gubernamentales...) existentes junto a la línea de costa, protegidos por la playa, mayor es el servicio de protección proporcionado por la misma.

Por lo tanto, para determinar el valor de protección que proporciona una determinada superficie de playa, éste se ha asimilado al valor de los activos en la zona inmediatamente adyacente a la misma. Este valor de los activos ya ha sido calculado con anterioridad (Apartado 3.3.2) y no es otro que el valor de la exposición caracterizada frente a inundación. En este valor no se han considerado las infraestructuras contenidas en esa misma zona, como pueden ser ramblas, calles, paseos marítimos o redes de servicios (electricidad, agua, saneamiento...), por lo que el valor obtenido será una cota inferior del valor protegido.

De acuerdo con el equipo de trabajo del MVOTMA, el valor de protección proporcionado por una determinada playa se ha asimilado a la suma de todos los activos existentes en un polígono delimitado por la línea superior 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 en la metodología se basa en que, si no existiese la playa, todos esos activos situados en la franja de 300 metros se verían afectados lo que supondría a efectos prácticos evaluar la exposición. Para ajustar esta cantidad, después de análisis previos y puesta en común con miembros de las distintas autoridades uruguayas involucradas en el proyecto, se ha optado por aplicar distintos factores correctores a los activos expuestos en función de la cercanía a la playa. Estos factores se recogen en la Tabla 11.

Tabla 11. Factor de corrección aplicado según la distancia a la playa

| Distancia a la playa (metros) | Factor de corrección |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| 0 – 100 | 0,35 |
| 100 – 200 | 0,15 |
| 200 – 300 | 0,05 |

Estos factores de corrección representan el porcentaje de activos expuestos que en realidad se podrían ver dañados si la playa desapareciese, partiendo de la hipótesis de que no todos los activos se verían dañados y no todos los dañados resultarían destruidos al 100%.

Los valores obtenidos han sido contrastados con el coste de construir un dique de protección a lo largo de toda la longitud de cada una de las playas, estimando un coste por metro lineal de 15.000 USD (Jonkman, 2013; Prah, 2018; Risc-Kit Project, 2019), resultando los obtenidos ligeramente menores con respecto a esta posible aproximación (un 60% de media).

4.3.2. Valor recreativo

El valor recreativo proporcionado por las playas viene determinado por 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 usuarios realiza de la playa. Habrá usuarios que acudan a una playa para disfrutar del sol, otros para realizar surf, y otros para poder nadar. En la mayoría de los casos, el valor recreativo de una playa viene determinado por la suma de las valoraciones que cada uno de los usuarios realiza.

Ante la imposibilidad de realizar estudios de detalle basados en métodos de preferencias reveladas o declaradas (es habitual recurrir a valoraciones contingentes o al método del coste de viaje para la valoración de estos servicios) o datos ya existentes, para obtener el valor recreativo por metro cuadrado de las playas se ha abordado el siguiente enfoque, adaptado de Toimil et al. (2018).

Siguiendo esta propuesta, se han determinado una serie de parámetros, como el área requerida por un usuario para estar cómodamente en la playa, el número medio de horas al año que las playas de estudio prestan servicios recreativos a los usuarios, la temporada (de playa o no), las condiciones geográficas (p. ej., el número de días y horas potenciales en los que poder usar la playa como activo recreativo) así como información acerca del comportamiento de los usuarios (p.e., cuándo van a la playa).

Tabla 12. Parámetros utilizados para la estimación del valor recreativo de las playas.

| Parámetro | Valor usado |
|--|--------------------------|
| Área de playa por usuario | 15 m ² |
| Horas de uso de playa al año por usuario | 479 h/año |
| Valor del tiempo de ocio | Variable por intendencia |

Un parámetro de suma importancia a considerar dentro de este análisis es el valor del tiempo de ocio. En este caso, se ha recurrido al empleo del gasto medio por turista y día proporcionado por fuentes locales.

Con todos estos datos, se ha obtenido un valor preliminar al que luego se ha aplicado un factor correctivo que representa la importancia de la playa con respecto al conjunto del país. Este factor, proporcionado por el MVOTMA (Informe “Valoración Económica de Activos en la Faja Costera uruguaya”), 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 la calidad de la playa. De todo ello se ha obtenido una estimación del valor recreativo de la playa en base al uso que los usuarios realizan de la misma.

4.4. Análisis de la Vulnerabilidad

Al igual que se planteaba para el estudio de los efectos de la inundación, la evaluación de la vulnerabilidad consiste en identificar la magnitud del cambio esperado a través de un indicador que, cuando se aplica a la exposición, determina el daño esperado debido al impacto de una determinada intensidad de la amenaza.

De forma paralela a como se planteaba para la inundación, la vulnerabilidad de las playas frente a la erosión costera se ha abordado también a través de curvas de vulnerabilidad.

Para ello, ha sido necesario generar una nueva función que cuantifique el nivel de daño que sufre el servicio que ofrece la playa para cada nivel de amenaza. El enfoque que se ha planteado en este estudio es asociar la vulnerabilidad de la playa junto con la utilidad marginal de la misma. De esta forma, la valoración del daño que realiza un usuario cuando una playa pierde una primera unidad de superficie debido al efecto de la erosión es distinto (tiene una menor importancia) que cuando la erosión ha destruido gran parte de la playa y desaparece una unidad extra más. Este enfoque pretende representar la utilidad marginal decreciente que la playa tiene como activo económico para los usuarios.

La forma de la función de vulnerabilidad que se plantea tiene una forma como la que se recoge en la Figura 32, en la que se puede apreciar gráficamente lo que se acaba de comentar: el factor de daño de los primeros metros de playa erosionados es menor que el de los últimos cuando la playa ya está cerca de desaparecer.

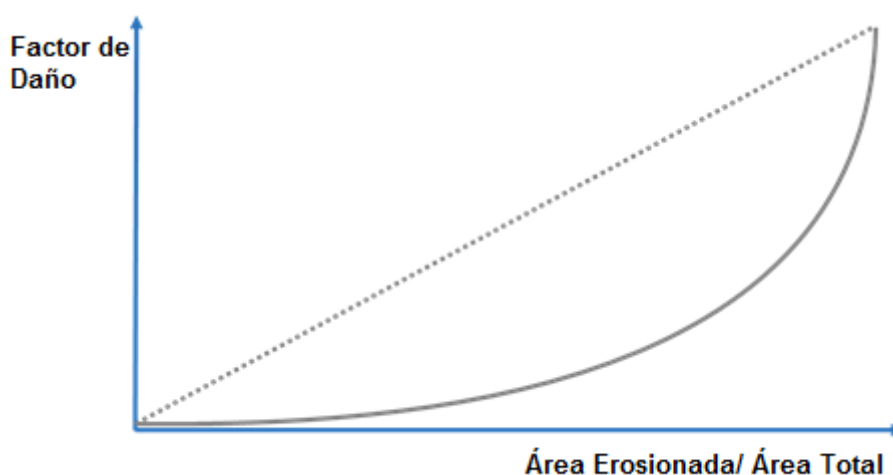


Figura 32. Curva de vulnerabilidad para la erosión de una playa.

Después de análisis previos y puesta en común con miembros de las distintas autoridades uruguayas involucradas en el proyecto, la forma final que se plantea para esta función de vulnerabilidad es la que se recoge en la ecuación (9).

$$\text{Factor de Daño} = \left(\frac{\text{Área Erosionada}}{\text{Área Total}} \right)^2 \quad (9)$$

4.5. Modelado del Impacto

A diferencia de la mayor parte de estudios nacionales que hacen un análisis de la erosión basada en indicadores, en este estudio, para modelar la evolución de la línea de costa a lo largo del siglo veintiuno en cada playa de estudio, se ha empleado un modelo eficiente de procesos cuyo coste computacional es bajo pero que a la vez permite tener en cuenta todas aquellas dinámicas generadoras de la erosión costera, es decir, el oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica y el ANMM.

Los modelos bidimensionales y tridimensionales que permiten simular de manera acoplada la hidrodinámica y la morfodinámica, como el Delft 3D o el XBeach, resuelven casi todos los procesos físicos importantes que intervienen en la evolución de la costa. Estos modelos son capaces de simular la erosión de una playa debida a una tormenta en escalas de tiempo de días a semanas. Sin embargo, la simulación de los cambios en la línea de costa a gran escala (por ejemplo, 100 km) o largo plazo (escala de tiempo anual a decenal) es muy costosa computacionalmente, y los resultados que se obtienen no presentan una mejora considerable en comparación con los que se obtienen con modelos simplificados. En lugar de resolver todos los procesos de la hidrodinámica y la morfodinámica, los modelos simplificados se centran en resolver un proceso físico, de manera que son sencillos y eficientes desde el punto de vista computacional. No obstante, solamente obtienen buenos resultados en zonas donde la línea de costa no se ve afectada por procesos que no son resueltos por el modelo (Vitousek et al., 2017).

La metodología desarrollada para evaluar el impacto de erosión tiene un carácter modular y resuelve de manera desacoplada, como se propone en Vitousek et al. (2017), y por medio de formulaciones semi-empíricas, los procesos de transporte transversal y longitudinal.

Tabla 13. Módulos del modelo de evolución de la línea de costa aplicado

| | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|---|--------------------------------|------|
| Cambios en la línea de costa | = | Transporte transversal | + | Transporte longitudinal | (10) |
| $\frac{dS(t)}{dt}$ | | $\frac{dy(t)}{dt}$ | | $R_{LST}(t)$ | |

4.5.1. Módulo de transporte transversal

La metodología incluye un módulo de transporte transversal que emplea un modelo de evolución de la línea de costa basado en la observación general de que la línea de costa tiende exponencialmente a alcanzar una posición de equilibrio cuando está sujeta a forzamientos constantes, de acuerdo con la siguiente ecuación diferencial de gobierno:

$$\frac{dy(t)}{dt} = k (y_{eq}(t) - y(t)) \quad (11)$$

donde $y(t)$ es la posición de la línea de costa en el tiempo t , debida a procesos transversales; $y_{eq}(t)$ es la posición de equilibrio determinada por el forzamiento en el tiempo t ; y k es la constante que gobierna la tasa a la cual la línea de costa se acerca al equilibrio.

Miller y Dean (2004) usaron diferencias finitas para reescribir la ecuación (11) y obtener así la respuesta del perfil de playa frente a variaciones del nivel del mar local (i.e., run-up del oleaje, marea meteorológica y marea astronómica):

$$y^{n+1} = \frac{y^n + Q[(y_{eq}^{n+1} + y_{eq}^n) - y^n]}{1 + Q}, \quad Q = \frac{k\Delta t}{2} \quad (12)$$

donde n es el paso de tiempo de la simulación; y Δt es el paso de tiempo de las series temporales (p.e., 1 hora).

La posición de equilibrio de la línea de costa y_{eq} está gobernada en cada instante por el cambio en la línea de costa de equilibrio Δy_{eq} de acuerdo con:

$$y_{eq}(t) = \Delta y_0 + \Delta y_{eq}(t) \quad (13)$$

donde Δy_0 es un parámetro empírico; y Δy_{eq} responde a los movimientos de erosión o acreción de la línea de costa con respecto al equilibrio.

Asumiendo la teoría del perfil de equilibrio y una conservación de volumen similar a la de Bruun (1962), Miller y Dean (2004) propusieron una ecuación empírica en la que los cambios en la línea de costa de equilibrio (Δy_{eq}) se expresan como combinación del run-up del oleaje y de la marea meteorológica. No obstante, y dada la importancia de la marea meteorológica en algunas playas (i.e., playas macromareales), en Toimil et al. (2017b) ésta se incorpora como un término adicional. El efecto de la marea astronómica acentúa los procesos erosivos y lleva a acreciones más rápidas, mejorando así el comportamiento de las playas en las que esta dinámica es dominante. Por lo tanto, Δy_{eq} se puede expresar como:

$$\Delta y_{eq}(t) = -W^*(t) \left(\frac{0,106H_b(t) + MM(t) + MA(t)}{B + 2H_b(t)} \right) \quad (14)$$

Toimil et al. (2017b)

donde W^* es el ancho del perfil activo; H_b es la altura de ola de rotura; y B es la altura de la berma.

Cualquier cambio a largo plazo en la línea de costa viene dado por la combinación de efectos de corto plazo (i.e., oleaje y nivel del mar) y del ANMM. En este estudio se ha aplicado la modificación de Toimil et al. (2017b) del modelo de Miller y Dean (2004) para incluir la marea astronómica y se ha incluido también el “efecto Bruun”, y que no es otra cosa que el movimiento hacia arriba y hacia tierra del perfil (Bruun, 1962) (Figura 33), pero dependiente del tiempo. La ecuación (13) puede reescribirse como:

$$y_{eq}(t) = \Delta y_0 + \Delta y_{eq}(t) + R_{Bruun}(t) \quad (15)$$

Toimil et al. (2017b)

donde R_{Bruun} representa el movimiento hacia arriba y hacia tierra del perfil (Figura 33) debido al ANMM y se obtiene como:

$$R_{Bruun}(t) = -W^* \frac{ANMM(t)}{B + h^*} \quad (16)$$

Bruun, 1962

donde h^* es la profundidad de cierre del perfil, que se ha calculado con la formulación empírica de Birkemeier (1985), ecuación (17).

$$h^* = 1,75H_{s_{12}} - 57,9 \frac{H_{s_{12}}^2}{gT_{p_{12}}^2} \quad (17)$$

Birkemeier, 1985

donde $H_{s_{12}}$ es la altura de ola significativa superada 12 horas al año, y $T_{p_{12}}$ es el periodo de pico asociado a $H_{s_{12}}$.

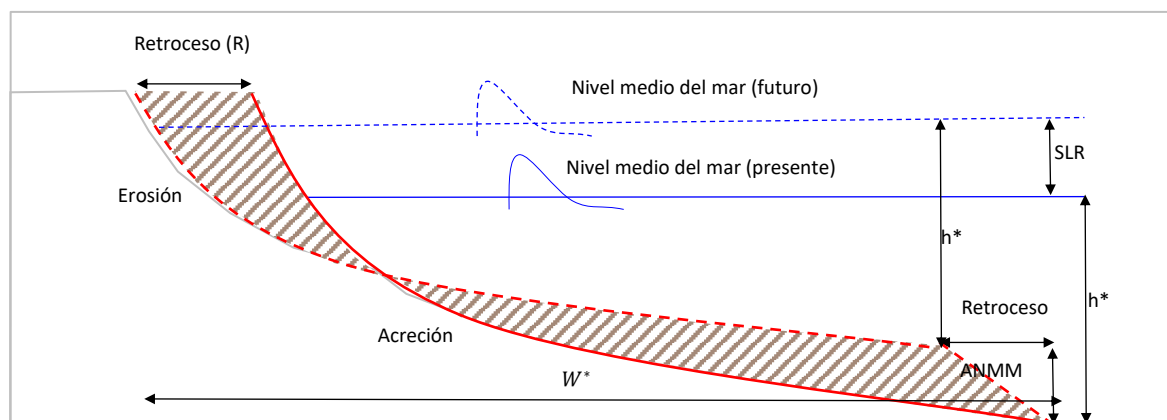


Figura 33. Retroceso de la línea de costa debido al ANMM

4.5.2. Módulo de transporte longitudinal

Al desacoplar el transporte transversal y el transporte longitudinal y al plantear la metodología de manera modular, al modelo de equilibrio descrito en la sección anterior, que contempla el transporte transversal y los cambios en el perfil debidos al ANMM, se le puede acoplar un módulo que resuelva el transporte longitudinal de sedimentos, tal y como se propone en Vitousek et al. (2017). Esto permite la aplicación del modelo, tanto en playas abiertas como en playas encajadas.

El transporte longitudinal se puede resolver de manera aproximada con formulaciones integradas que relacionan la tasa de transporte longitudinal a lo largo de la costa con parámetros del oleaje y de la playa. La formulación integrada más utilizada para estimar las tasas de transporte longitudinal es la fórmula del CERC (ecuación (18)). Esta formulación se basa en la hipótesis de que la tasa total de transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa es proporcional al flujo de energía (Smith et al., 2003). La fórmula del CERC viene dada por:

$$Q = K \left[\frac{\rho\sqrt{g}}{16\gamma^{\frac{1}{2}}(\rho_s - \rho)(1 - n)} \right] H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b) \quad (18)$$

Shore Protection Manual (1984)

donde K es una constante de calibración adimensional, ρ_s es la densidad del sedimento, ρ es la densidad del agua, γ es el criterio de rotura, g es la gravedad, n es la porosidad del sedimento, H_b es la altura de ola de rotura, y α_b es la dirección del oleaje en rotura.

Una de las alternativas más usadas a la fórmula del CERC es la fórmula de Kamphuis (1991):

$$Q(m^3/h) = 7,3H_b^2T_p^{1,5}m_b^{0,75}D_{50}^{-0,25}\sin^{0,6}(2\alpha_b) \quad (19)$$

Kamphuis (1991)

donde T_p es el periodo de pico, m_b es la pendiente de la playa, D_{50} es el tamaño medio del sedimento, H_b es la altura de ola de rotura, y α_b es la dirección del oleaje en rotura.

Finalmente, Van Rijn (2014) propone:

$$Q\left(\frac{kg}{s}\right) = C \cdot K_{swell} \cdot \rho_s \cdot (\tan\beta)^{0,4} \cdot (D50)^{-0,6} \cdot H_b^{2,6} \cdot V_{total} \quad (20)$$

Van Rijn (2014)

donde C es igual a 0,0006, K_{swell} es un factor de corrección para el oleaje de mar de fondo, ρ_s es la densidad del sedimento, $\tan\beta$ es la pendiente en la zona de rompientes, H_b es la altura de ola de rotura, y V_{total} es la velocidad efectiva longitudinal (corriente de marea y corriente inducida por el oleaje).

$$V_{total} = V_{wave} + V_{tide}$$

$$V_{wave,L} = 0,3(gH_b)^{0,5}\sin(2\theta_b)$$

Dado que se dispone de información relativa a las corrientes, en este estudio se ha aplicado la formulación de Van Rijn para estimar la tasa de transporte longitudinal.

4.5.3. Evaluación integrada de los cambios en la línea de costa

Análisis en celdas litorales

Para la evaluación de la morfodinámica costera, se han considerado los dos mecanismos de transporte de sedimentos fundamentales, el transversal y el longitudinal. Para el acoplamiento de estos dos procesos, se ha dividido la costa en transectos que delimitan las celdas litorales. En el caso del transporte transversal en el perfil, se aplica un modelo de evolución evaluado en cada uno de los transectos. Por otro lado, el avance y retroceso de la línea de costa debidos a gradientes en el transporte longitudinal es evaluado en cada celda litoral y su contribución es añadida a la evolución transversal de los transectos que la delimitan. En las playas encajadas, únicamente se considera el transporte transversal, al considerarse nulo los gradientes longitudinales de caudal sólido. Asimismo, en playas abiertas se considera tanto la contribución del transporte longitudinal evaluado en las celdas litorales como del transversal calculado en los transectos que limitan las celdas. Finalmente, la línea de costa en un instante concreto se construye al unir las posiciones de los diferentes transectos. Las celdas litorales planteadas constan de transectos separados aproximadamente 2 km. El sedimento se mueve dentro de cada celda y pasa de una celda a otra en función de la dirección del oleaje y de la

orientación de la línea de costa. En la Figura 34 se plantea el esquema conceptual de las celdas litorales y los tipos de transporte y sus dinámicas generadoras considerados en el estudio.

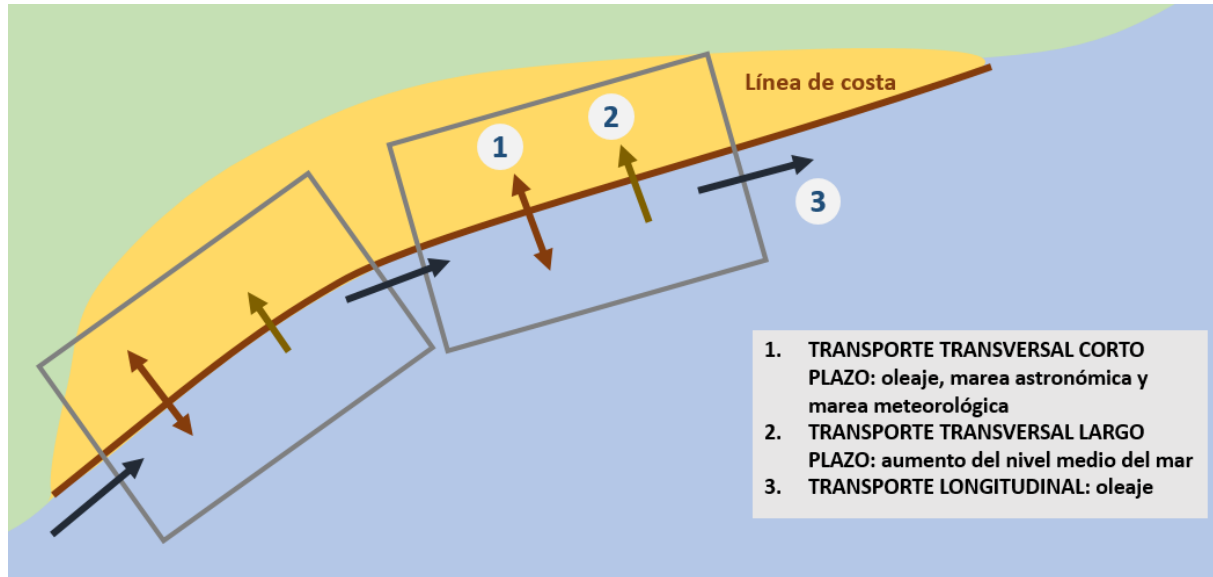


Figura 34. Esquema conceptual de las celdas litorales y tipos de transporte considerados en el estudio

En cada celda se evalúa gradiente neto en el transporte longitudinal, $(Q_{in} - Q_{out})/dy$ (m^3/h), que dependiendo de si es una tasa negativa o positiva se traduce en retroceso o avance de la línea de costa (m/h). Los cambios en la línea de costa de la celda litoral debido al transporte longitudinal (R_{LST}) se evalúan por medio de la ecuación de continuidad:

$$R_{LST}(t) = dx = \frac{Q_{neto}(t)}{dy(d_b + d_c)} \quad (21)$$

donde dy es la distancia a lo largo de la costa en la que se evalúa el transporte, Q_{neto} es el transporte neto longitudinal en la celda litoral, dx es el avance o retroceso de la línea de costa en la celda, d_b es la altura de la berma y d_c la profundidad de cierre. La interrupción del transporte longitudinal que se produce en presencia de obstáculos se tiene en cuenta al no permitir el intercambio de sedimento entre las celdas adyacentes al obstáculo. A cada playa analizada se le ha asociado la media del retroceso o avance de las celdas litorales que se han empleado en su discretización.

Acoplamiento de los módulos de transporte

Los cambios en la línea de costa debidos al transporte longitudinal (R_{LST}) calculado en la sección anterior) se integran en el modelo de Miller y Dean (2004) como un sumidero o fuente de descarga de arena, según la tasa de transporte sea negativa o positiva, de igual manera que en Toimil et al. (2017b) se integra como un sumidero de arena el retroceso de una playa cercana a un estuario debido a la adaptación de éste al ANMM.

$$\frac{dS(t)}{dt} = k \left(y_{eq}(t) - y(t) \right) + R_{LST}(t) \quad (22)$$

Adaptado de Toimil et al. (2017b)

4.5.4. Bases de datos de exposición física

Las playas se han definido con la capa de polígonos de playa de OpenStreetMap (OSM). Esta capa se ha corregido con la capa de playas del DINAMA, que identifica con puntos la localización de las playas.

Para caracterizar los parámetros morfológicos de las playas se han utilizado, cuando ha sido posible, los perfiles topo-batimétricos y las curvas granulométricas incluidos en el Informe Técnico 14 correspondiente a la campaña de topografía de costas realizada en noviembre 2018 (Gas Sayago S.A., diciembre 2018). En las playas no incluidas en el informe se ha inferido el tamaño de sedimento y la pendiente del Informe Técnico Freplata A10.4b. (López Laborde, 2003) y del informe UNESCO (1979) (Figura 35). En las playas donde no se disponía de información se ha asumido un tamaño de sedimento representativo de la costa, $D_{50} = 0,3 \text{ mm}$ (Solari et al., 2018).

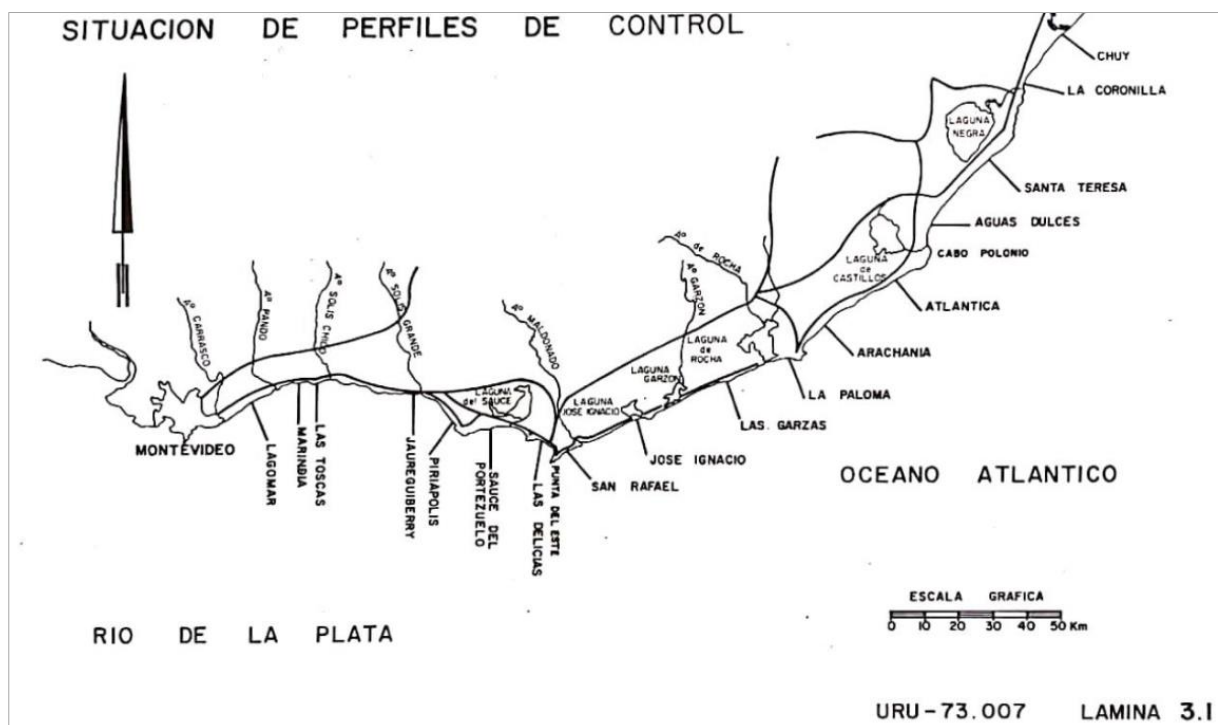


Figura 35. Ubicación de las playas con información disponible sobre el tamaño de sedimento (UNESCO, 1979).

La altura de berma de las playas se ha estimado como el percentil del 50% de la serie temporal de bermas, determinada mediante la formulación de Takeda y Sunamura (1982), asumiendo que es el oleaje medio el que forma la berma.

$$d_b = 0,125 (g T_p^2)^{\frac{3}{8}} H_b^{\frac{5}{8}} \quad (23)$$

Takeda y Sunamura (1982)

donde d_b es la altura de la berma, H_{sb} es la altura de ola de rotura, y T_p es el periodo de pico.

La pendiente de la playa se ha determinado de manera análoga a las pendientes determinadas para el cálculo de *set-up* con la formulación de Stockdon (Sección 3.2.3).

4.5.5. Resultados

El modelo desarrollado permite reconstruir la evolución de la línea de costa y obtener la respuesta acumulada de la línea de costa. De esta manera, se ha aplicado el modelo y se ha reconstruido la serie temporal de evolución de la línea de costa de un total de 212 tramos de playa. Se han excluido del análisis las playas fluviales, puesto que están dominadas por otro tipo de procesos.

Con el modelo se ha reconstruido, para cada playa, la serie temporal de evolución de la línea de costa (serie de erosión-acreción, Figura 37), tanto en el periodo histórico (1985-2016), como en el periodo futuro (2010-2050 y 2010-2100), para el RCP4.5 y el RCP8.5. Para simular las series futuras el modelo se ha inicializado con la posición media de la playa en el año 2009.

De las series de evolución de la línea de costa se ha obtenido el retroceso estructural de la línea de costa debido al aumento del nivel medio del mar como la diferencia entre la posición media de la playa de los últimos cinco años y la posición media de los primeros cinco años de la serie. Este retroceso estructural tiene en cuenta las variaciones de la línea de costa a lo largo del tiempo.

Los valores máximos anuales de la serie de evolución de la línea de costa se han ajustado a una distribución de valores extremos generalizada (GEV). Del ajuste se han obtenido los retrocesos de la línea de costa de periodo de retorno 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Como ejemplo, en la Figura 36 se muestra la evolución de la línea de costa de Playa Ramírez en el periodo histórico (1985-2016), y en la Figura 37 se muestra la evolución de la misma playa durante el periodo futuro 2010-2100, para el RCP8.5, percentil del 50%. En la Figura 36 se pueden apreciar las oscilaciones (erosión-acreción) de la línea de costa debidas a las fluctuaciones de las dinámicas costeras. En la Figura 37 se puede apreciar la repetición de eventos extremos que tienen lugar en el periodo histórico (p.e., el evento extremo que tiene lugar al final del periodo histórico en la Figura 36 se repite en la Figura 37 antes de 2020, antes de 2050, y un poco después de 2080), puesto que las series futuras de oleaje y nivel del mar se han generado a partir de las series históricas. En la Figura 37 se puede observar la influencia del aumento del nivel medio del mar, que hace que la serie de erosión (valores negativos) - acreción (valores positivos) de la línea de costa tenga una tendencia cada vez más erosiva.

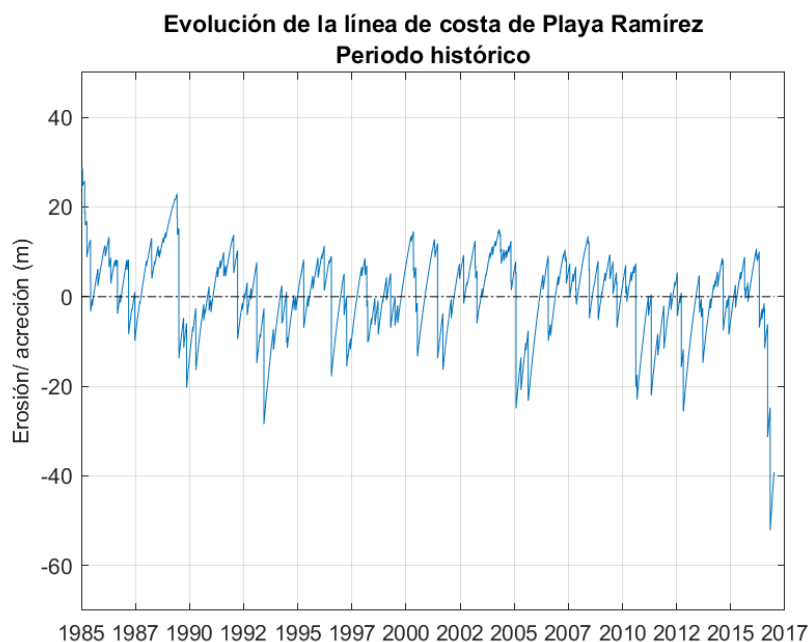


Figura 36. Evolución de la línea de costa de Playa Ramírez en el periodo histórico.

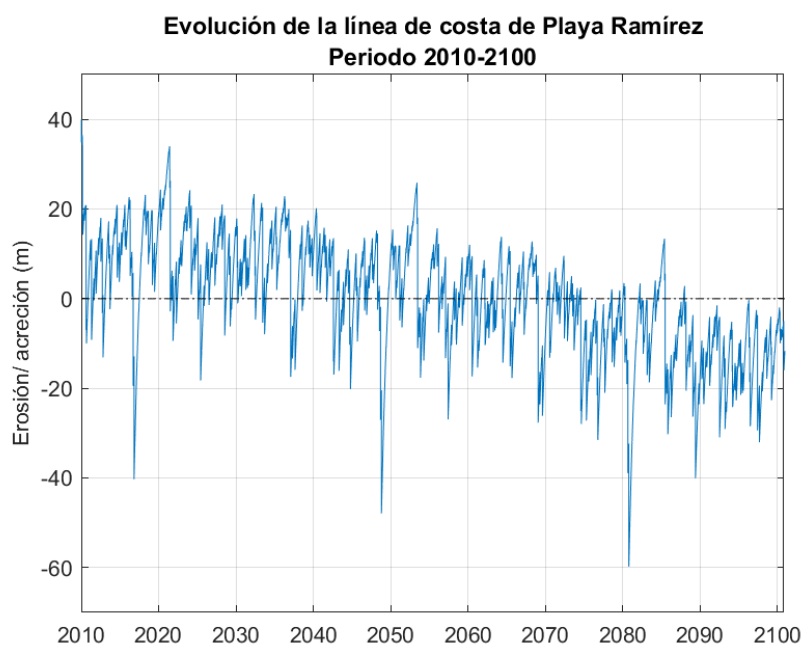


Figura 37. Evolución de la línea de costa de Playa Ramírez a lo largo del siglo XXI, para el RCP8.5, valor medio de ANMM.

Finalmente, en la Figura 38 se muestra el retroceso estructural de la línea de costa de Uruguay en el horizonte 2100, para el RCP8.5, valor medio de ANMM. Como se puede observar, en la mayor parte de la costa el retroceso esperado en 2100 es de 15 - 20 metros, y las playas ubicadas al este son las que tienen el menor retroceso esperado, 10 – 15 metros.

En la Figura 41 se muestra el retroceso estructural de la línea de costa en 2100 de Playa Verde, Playa de la Mulata y Playa Carrasco. Como se puede observar, el retroceso estructural de Playa Verde se

encuentra en el rango 15 – 20 metros, igual que el retroceso de Playa de la Mulata, pero de Playa Carrasco se espera que tenga en 2100 un retroceso estructural entre 20 y 25 metros.



Figura 38. Retroceso estructural de la línea de costa en el horizonte 2100, para el RCP8.5, valor medio de ANMM.

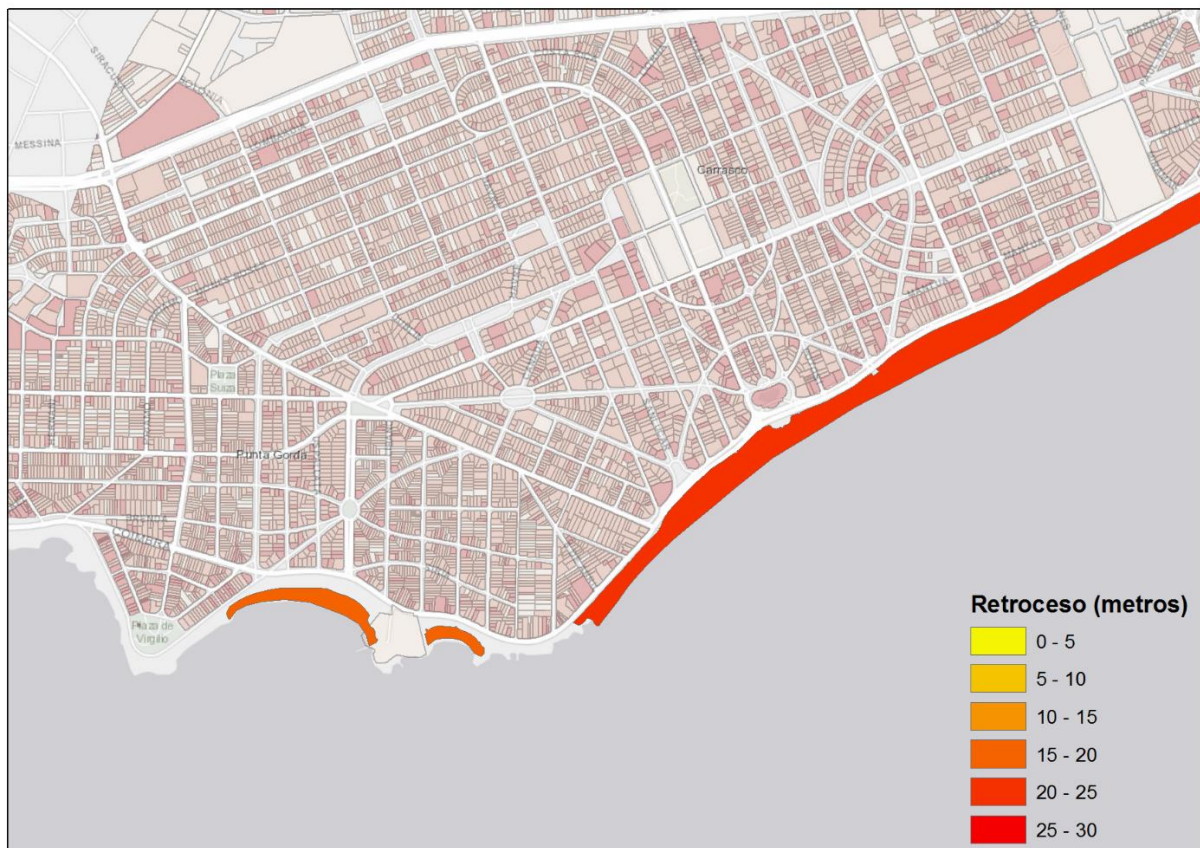


Figura 39. Retroceso estructural de la línea de costa de Playa Verde, Playa de la Mulata y Playa Carrasco en el horizonte 2100, para el RCP8.5, valor medio de ANMM.

4.5.6. Calibración del modelo

Los modelos propuestos para la estimación de los cambios en la línea de costa están basados en formulaciones semi-empíricas que son muy sensibles, en el caso de la formulación potencial de transporte longitudinal, de la constante de la formulación, y, en el caso del modelo de equilibrio, de los parámetros de erosión y acreción.

Para calibrar la constante de la formulación potencial de transporte longitudinal se ha estimado un transporte en los sitios piloto (playas de Carrasco, del Cerro, Aguada, Piriápolis, Atlántida, Colonia del Sacramento y Playa Pascual) en base a la evolución histórica de las playas. En el caso de Carrasco, el avance en 18 años de la flecha (1.000 de longitud y 60 metros de anchura) en la desembocadura de Arroyo Carrasco ha permitido estimar el transporte longitudinal de sedimentos en la zona. Asumiendo una profundidad de cierre de 4,5 metros y una berma de 1,2 metros, el volumen de sedimento acumulado en la flecha en 18 años es de 342.000 m³, que equivale a un transporte anual de 19.000 m³.

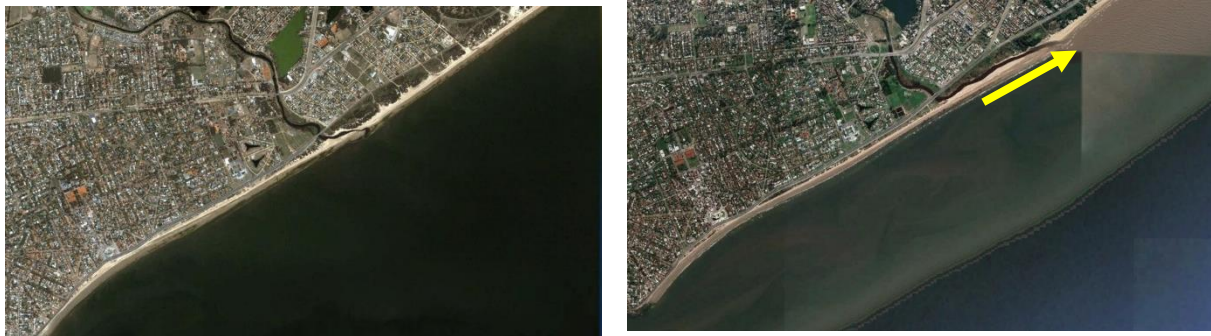


Figura 40. Situación de la desembocadura de Arroyo Carrasco en 2001 (imagen de la izquierda) y en 2019 (imagen de la derecha).

Para calibrar los parámetros de erosión acreción se ha utilizado información disponible de la evolución histórica (evolución del área de playa medida a partir de imágenes de satélite) de la Playa Ramírez (Gutiérrez et al., 2015; Panario et al., 2008) (Figura 41). Se ha elegido la Playa Ramírez por ser una playa encajada, donde no existe transporte longitudinal y, por tanto, donde podemos calibrar las constantes de erosión/ acreción del modelo de Miller y Dean; por disponer de información relativa a la evolución del área de playa; y por no haber sufrido, al contrario de la Playa Pocitos, grandes actuaciones antrópicas.

En la Figura 41 se muestra la información relativa a la evolución del área de playa de Playa Ramírez, medida a partir de imágenes de satélite (Gutiérrez et al., 2015), utilizada para calibrar el modelo.

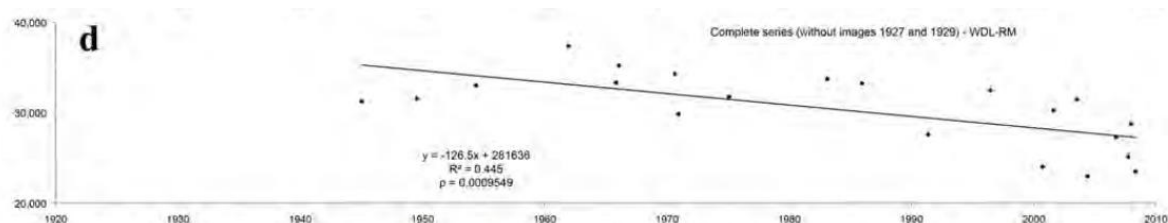


Figura 41. Evolución histórica del área de playa de la Playa Ramírez (Gutiérrez et al., 2015)

En la Figura 42 se muestran en rojo los puntos de la Figura 41 a partir de 1985, que es cuando comienzan las series de dinámicas y por tanto las series de evolución de la línea de costa que se obtienen del modelo, y en azul los resultados obtenidos del modelo, para los parámetros de erosión y acreción utilizados. Los puntos en azul se han calculado como la media anual de la variación de la línea de costa de Playa Ramírez. Se puede observar en la Figura 42 que los resultados del modelo de erosión siguen las fluctuaciones de las mediciones de las imágenes de satélite, y que ambos resultados tienen una tendencia decreciente. El error relativo entre los resultados del modelo de erosión y los resultados de las imágenes de satélite se considera asumible. De los resultados del modelo de erosión en el periodo 1985-2010 (periodo de tiempo en el que coinciden las series de dinámicas y el gráfico de imágenes de satélite de Gutiérrez et al., 2015) se obtiene una tendencia decreciente del área de playa de $57 \text{ m}^2/\text{año}$.

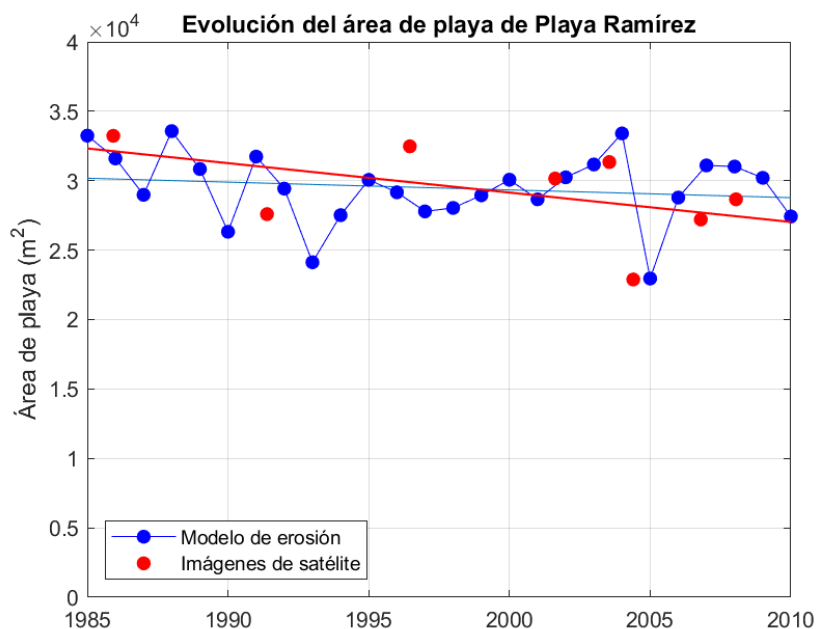


Figura 42. Calibración de la evolución del área de playa de Playa Ramírez.

4.6. Análisis del Riesgo

El objetivo de este paso de la metodología es evaluar la pérdida de valor recreativo y de protección de la playa debido a la erosión costera. La disponibilidad de las series de evolución de la línea de costa ha permitido obtener el riesgo de pérdida anual de valor recreativo y de protección asociado al retroceso estructural de la línea de costa y al retroceso de un conjunto de periodos de retorno ($T_r=5, 10, 25, 50, 100$ y 500 años). Los retrocesos de la línea de costa se han utilizado para determinar los factores de daño a través de la curva de vulnerabilidad definida. Estos factores, combinados con los valores de exposición de las playas, han dado lugar finalmente a las consecuencias del riesgo. Adicionalmente, se ha determinado el indicador de daño anual esperado para los eventos extremos de erosión.

Por tanto, de esta fase se han obtenido los siguientes tipos de resultados:

ENTREGABLE 4.2. INFORME TÉCNICO SOBRE LA METODOLOGÍA APLICADA EN EL PROYECTO. ESCALA NACIONAL

- Pérdida anual de valor recreativo y de protección de la playa asociado al retroceso estructural
- Pérdida anual de valor recreativo y de protección de la playa asociado a eventos extremos
- Daño total anual esperado, que se obtiene de acumular el daño anual esperado a lo largo de los años

Estos valores anuales, que tendrán lugar en los distintos años desde el presente hasta cada horizonte considerado (2050 y/o 2100), se pueden sumar para obtener un daño acumulado representativo de todo el valor perdido en el horizonte. Este acumulado es el valor presente descontado de todos los flujos de daños anuales sufridos, aplicando una tasa de descuento que para este estudio se tomará del 4%.

A modo de ejemplo, en la Figura 43 se muestra la pérdida anual del valor recreativo y de protección de las playas en el horizonte 2100 asociado al retroceso estructural, resultado de cruzar la capa de retrocesos con la capa de valor recreativo y de protección de las playas y de aplicar una función de vulnerabilidad. En la Figura 44 se muestra el daño anual total esperado en Playa Verde, Playa de la Mulata y Playa Carrasco.



Figura 43. Daño anual total (protección + recreativo) esperado asociado al retroceso estructural de la línea de costa en el horizonte 2100, para el RCP8.5, valor medio de ANMM.



Figura 44. Daño anual total (protección + recreativo) esperado asociado al retroceso estructural de la línea de costa de Playa Verde, Playa de la Mulata y Playa Carrasco en el horizonte 2100, para el RCP8.5, valor medio de ANMM.

4.7. Resumen de resultados del Riesgo de Erosión Costera

En la tabla siguiente se recogen los resultados que se han obtenido de cada fase de la metodología de evaluación del riesgo de erosión costera, para cada uno de los escenarios recogidos en la Tabla 10.

Tabla 14. Resumen de resultados obtenidos de la metodología de evaluación del riesgo de erosión costera

| COMPONENTE DEL RIESGO | RESULTADOS DE CADA FASE METODOLÓGICA |
|-----------------------|---|
| EXPOSICIÓN | <u>Mapas de exposición de alta resolución</u> <ul style="list-style-type: none"> • Valor de protección de las playas • Valor recreativo de las playas |
| VULNERABILIDAD | <u>Curva de vulnerabilidad</u> |
| IMPACTO | <u>Modelo de evolución de la línea de costa que tiene en cuenta el transporte transversal debido al oleaje, la marea astronómica, la marea meteorológica y el aumento del nivel medio del mar; y el transporte longitudinal debido al oleaje.</u> <u>Estimación del retroceso de la línea de costa</u> <ul style="list-style-type: none"> • Retroceso estructural • Retroceso de periodo de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años |
| RIESGO | <u>Pérdida del valor de exposición de las playas (valor recreativo y valor de protección)</u> <u>Indicador de daño anual esperado (AED) para cada el valor de exposición de las playas (valor recreativo y valor de protección)</u> |

5. REFERENCIAS

Alonso, R., Solari, S., Teixeira, L. (2018). Erosion Problem on a Fluvial Beach. The Case Study of “La Concordia” in the Uruguay River, Uruguay, South America. *Journal of Coastal Research*, 85, pp. 131-135.

Arcement Jr, G.J., Schneider, V.R. (1989). Guide for selecting Manning’s roughness coefficients for natural channels and flood plains. *US Geological Survey Water-Supply Paper*, 2339, 38 p.

Ballesteros, C., Jiménez, J.A., Viavattene, C. (2017). Evaluación del riesgo de inundación a múltiples componentes en la costa del Maresme. *Ribagua*, 4:2, pp .110-129.

Barnes, H. H., Jr (1967). Roughness characteristics of natural channels. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper* 1849, 213 pp.

Bates, P.D., Horritt, M.S., Fewtrell, T.J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387 (1-2), pp. 33-45.

Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of prole change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111, pp 598-602.

Brazeiro A., Toranza C. y Bartesaghi L. (2009). Proyecto de Biodiversidad costera. Informe final del Convenio Facultad de Ciencias – ECOPLATA 46 pp.

Bruun, P. (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88, 117-130.

Bunya, S., Dietrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., Jensen, R., Resio, D.T., Luettich, R.A., Dawson, C., Cardone, V.J., Cox, A.T., Powell, M.D., Westerink, H.J., Roberts, H.J. (2010). A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model development and validation. *Monthly Weather Review*, 138 (2), pp. 345-377.

Callaghan, D., Ranasinghe, R., Nielsen, P., Larson, M., Short, A. (2008). Process-determined coastal erosion hazards. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, pp. 4227-4236.

Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S. (2011a). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58 (6), pp. 453-462.

Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R. (2011b). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58 (9), pp. 851-862.

Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, 680 pp.

Church, J. A., P. Clark, A. Cazenave, J. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. Merrifield, G. Milne, R.S.Nerem, P. Nunn, A. Payne, W. Pfeffer, D. Stammer, and A. Unnikrishnan (2013). Sea level change, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY. USA.

EMA (2005). Ecosystems and human well-being (Vol. 5). Ecosystem Millennium Assessment. Washington, DC. United States. Island press.

FAO (2019). Servicios ecosistémicos y biodiversidad. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia. [Consulta: 12 marzo 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>.

Gas Sayago S.A. (diciembre, 2018). Informe Técnico 14. Campaña de topografía de costas de noviembre 2018.

Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Piñeiro, G., Montes, C. (2015). Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. RGCI [online]. 2015, vol.15, n.4, pp.467-484.

Hervouet, J.M. (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method. John Wiley & Sons, Hoboken.

Holman, R.A. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. Coastal Engineering, 9(6), pp. 527–544.

Huizinga, J., de Moel, H., Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines. EUR 28552 EN.

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. D3.2: Proyecciones de cambio climático. Oleaje, residuo del nivel del mar y nivel medio del mar en 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. D4.1: Informe técnico sobre los resultados del proyecto. Escala nacional.

IMFIA (2018a). Informe de actividades en el marco del proyecto: URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Entregable E.1.1.

IMFIA (2018b). Informe de actividades en el marco del proyecto: URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Entregable E.1.2.

IMFIA (2018c). Informe de actividades en el marco del proyecto: URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay. Entregable E.2.1.

IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC (2014). Summary for policymakers. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [eds CB Field al.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, pp. 1-32.

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.

Jonkman S.N., Hillen M.M., Nicholls R.J., Kanning W. y van Ledden M. (2013). Costs of Adapting Coastal Defences to Sea-Level Rise— New Estimates and Their Implications. *Journal of Coastal Research*, Vol. 29, Issue 5: pp. 1212 – 1226.

Kamphuis, J.W. (1991). Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 117 (6), 624–641.

Lara, J.L., Ruju, A., Losada, I.J. (2011). Reynolds averaged Navier-Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 467 (2129), pp. 1215-1242.

Liu, P.L.-F., Losada, I.J. (2002). Wave propagation modeling in coastal engineering. *Journal of Hydraulic Research* 40(3):229-240.

Losada, I.J., Lara, J.L., Guanache, R., Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, Vol. 55(1), pp. 47 - 62.

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

McGranahan, G., Balk, D., Anderson, B. (2007). The rising tide: Assessing the risk of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Adapting Cities to Climate Change: Understanding and Addressing the Development Challenges*, pp. 51-76.

Miller, J.K., Dean, R.G. (2004). A simple new shoreline change model, *Coastal Engineering*, Vol. 51(7), pp. 531-556.

Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H.C., Aerts, J.C.J.H., Ward, P.J. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature Communications*, Vol. 7, 11969.

Olsen, A.S.; Zhou, Q.; Linde, J.J.; Arnbjerg-Nielsen, K. (2015) Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. *Water*, 7, 255-270.

Panario D., Gutiérrez O., Piñeiro G. (2008). Propuesta técnica para la conservación y recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe Final.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4), pp. 275-289.

Prahl, B.F., Boettle, M., Costa, L., Kropp, J.P., Rybski, D. (2018). Data Descriptor: Damage and protection cost curves for coastal floods within the 600 largest European cities. *Scientific Data*, 5, art. no. 180034.

Pullen, T., Allsop, W., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., van der Meer, J. (2007). Wave overtopping of sea defenses and related structure: Assessment manual. www.overtopping-manual.com

Reguero, B.G., Losada, I.J., Díaz-Simal, P., Méndez, F.J., Beck, M.W. (2015). Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS ONE*, 10 (7), art. no. e0133409.

Risc-Kit Project. (2019). Consulta online vía <https://www.coastal-management.eu/>.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M.H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Van Den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 91 (8), 1015–1057.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Yu.-T., Chuang, H.-y, Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M.P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *J. Clim.* 27 (6), 2185–2208.

Shore Protection Manual, 1984. Department of the Army. US. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Research Center. Washington D.C., 20314.

Smit, P., Stelling, G., Roelvink, J.A., van Thiel de Vries, J.S.M., McCall, R.T., Dongeren, A.R.V., Zwinkels, C., Jacobs, R. (2010). XBeach: Non-Hydrostatic Model: Validation, Verification and Model Description; Technical Report; Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2010.

Smith, E. R., Wang, P., and Zhang J. (2003). Evaluation of the CERC Formula Using Large- Scale Laboratory Data. Tampa, FL: Geology Faculty Publications, 238.

Solari, S., Alonso, R., Teixeira, L. (2018). Analysis of Coastal Vulnerability along the Uruguayan coasts. *Journal of Coastal Research*, 85, pp. 1536-1540.

Stive, M.J.F., Aarninkhof, S.G.J., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K.M., Nicholls, R.J., Capobianco, M. (2002). Variability of shore and shoreline evolution, *Coastal Engineering Vol. 47*, pp. 211-235.

Stive, M.J.F., Ranasinghe, R., Cowel, P. (2009). Sea level rise and coastal erosion. Y. Kim (Ed.), *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, World Scientific (2009), pp. 1023-1038.

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger Jr., A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53 (7), pp. 573-588.

Takeda, I., Sunamura, T. (1982). Formation and Height of Berms. Transactions Japanese Geomorphological Union, Vol. 3, pp- 145-157.

The WAVEWATCH III Development Group (WWW3DG) (2016). User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp.

Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P. (2016). Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias. RIBAGUA 3 (2), pp. 56-65.

Toimil, A., Losada, I.J., Diaz-Simal, P., Izaguirre, C., Camus, P. (2017a). Multi-sectoral high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding. Climatic Change, 145 (3-4), pp. 431-444.

Toimil, A., Losada, I.J., Camus, P., Diaz-Simal, P. (2017b). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. Coastal Engineering, 128, pp. 106-122.

Toimil, A., Diaz-Simal, P., Losada, I.J., Camus, P. (2018). Estimating the risk of loss of beach recreation value under climate change. Tourism Management, 68, pp. 387-400.

UNESCO (1979). Conservación y mejora de playas. URU. 73.007. Montevideo.

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

Vitousek, S., Barnard, P.L., Limber, P., Erikson, L., Cole, B. (2017). A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122 (4), pp. 782-806.

Wainwright, D.J., Ranasinghe, R., Callaghan, D.P., Woodroffe, C.D., Jongejan, R., Dougherty, A.J., Rogers, K., Cowell, P.J. (2015). Moving from deterministic towards probabilistic coastal hazard and risk assessment: Development of a modelling framework and application to Narrabeen Beach, New South Wales, Australia. Coastal Engineering, 96, pp. 92-99.

Whipple, K.X. (2004). Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens, Annual Reviews Earth and Planetary Sciences, Vol. 32, pp. 151-185.

Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A., (2014). Coastal systems and low-lying areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [eds CB Field al.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, pp. 361-409.

Zacharioudaki A., Reeve, D. (2011). Shoreline evolution under climate change wave scenarios. Climatic Change, Springer, vol. 108(1), pp. 73-105.