

**ericc**

Evaluación de Riesgos
e Impactos derivados del
Cambio Climático en España

Costas y medio marino



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Este capítulo forma parte de la siguiente publicación:

Título

Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España (ERICC-2025)

Edición 2025

Asistencia técnica

Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria (IH Cantabria)

Tecnalia Research and Innovation (Tecnalia)

Basque Centre for Climate Change (BC3)

Coordinación

Oficina Española de Cambio Climático: Patricia Klett Lasso de la Vega; Sara Rodríguez Rego; Francisco J. Heras Hernández; María Salazar Guerra; Vidal Labajos Sebastián

Fundación Biodiversidad: Ana Lancho Lucini

IH Cantabria: Íñigo Losada Rodríguez, Laro González Canoura, Javier López Lara

Tecnalia: Efrén Feliu Torres, Beñat Abajo Alda, María Puig Fuentenebro

BC3: María José Sanz

Con la colaboración de la Fundación Biodiversidad.

Autoría del capítulo

Autores: Alexandra Toimil Silva (IH Cantabria), Iñigo Losada Rodríguez (IH Cantabria)

Contribuyentes: Samuel Sainz Villegas (IH Cantabria)

Agradecimientos: Diego Kersting (IATS-CSIC)



MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Edita: © SUBSECRETARÍA Gabinete Técnico

NIPO (línea en castellano): 665-25-058-6

ISBN: 978-84-18778-84-1

Edición y maquetación

Grupo Tangente S. Coop. Mad.

AVISO LEGAL: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados citando la fuente, y la fecha, en su caso, de la última actualización.

Este capítulo debe citarse de la siguiente manera:

Toimil, A. y Losada, I. J. (2025) Costas y medio marino. En Losada, I.J., Feliu, E. y Sanz, M.J. (Coords.) 2025. Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España (ERICC-2025). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.



Contenido

- 1. Aspectos metodológicos y contenido del capítulo** / pág. 712
- 2. Introducción** / pág. 714
- 3. Riesgos relevantes** / pág. 717
- 4. Riesgos clave** / pág. 732
 - 4.1. RC6.1. Riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo. / pág. 733
 - 4.2. RC6.2. Riesgos de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos. / pág. 746
 - 4.3. RC6.3. Riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos. / pág. 760
 - 4.4. RC6.4. Riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano / pág. 773
- 5. Análisis de riesgos complejos** / pág. 785
- 6. Caso de estudio** / pág. 788
- 7. Limitaciones y particularidades metodológicas del sector** / pág. 790
- 8. Referencias** / pág. 793



1. Aspectos metodológicos y contenido del capítulo

Este documento corresponde al **Capítulo Sectorial Costas y Medio Marino** de la **Evaluación de Riesgos e Impactos derivados del Cambio Climático en España** (ERICC-2025).

El análisis de riesgos utiliza el marco conceptual desarrollado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en la sexta evaluación (AR6, 2022). En este contexto, el riesgo de que se produzca un impacto o un conjunto de impactos derivados del cambio climático es el resultado de la integración de tres componentes: peligro, exposición y vulnerabilidad. De acuerdo con dicho marco, los riesgos se incrementan si aumenta la peligrosidad de origen climático, la exposición o la vulnerabilidad o cualquier combinación de los anteriores. De igual modo, cualquier acción que contribuya a disminuir la peligrosidad, la exposición o la vulnerabilidad conduce a una reducción del riesgo. El estudio se desarrolla a nivel nacional, indicando adicionalmente la distribución territorial de cada riesgo clave en los casos en que éstos no presentan una homogeneidad geográfica. Asimismo, se hace énfasis en la actualización de la literatura y de las evidencias disponibles desde la publicación del estudio de "Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España" llevada a cabo en 2020.

La metodología seguida para la elaboración de los capítulos sectoriales sigue tres pasos. Inicialmente, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica y una búsqueda de impactos históricos asociados a cada ámbito sectorial, con los que identificar los riesgos denominados genéricamente "riesgos relevantes"¹ del sector. A continuación, sobre este listado inicial de riesgos se ha aplicado un análisis multicriterio (AMC) basado en criterios análogos a los que establece el IPCC (p. ej. alcance espacial del riesgo, afección a la población, impacto económico, irreversibilidad, entre otros), para la selección de los denominados "riesgos clave"² sectoriales. Finalmente, se ha realizado un análisis más detallado de los riesgos identificados como clave. Este análisis abarca tanto los componentes del riesgo (peligro, exposición y vulnerabilidad), como diversos aspectos transversales relevantes. Entre ellos se incluyen los efectos transfronterizos, los riesgos com-

¹ Se define riesgo relevante como aquel que tiene un potencial de generar consecuencias adversas significativas para sistemas humanos o ecológicos en el sector o ámbito de estudio derivadas del cambio climático, directa o indirectamente.

² Los riesgos clave son aquellos potencialmente graves que pueden traducirse en impactos en la actualidad y que pueden incrementar su severidad con el tiempo debido a cambios en la naturaleza de los peligros y/o a la exposición/vulnerabilidad que presentan los elementos analizados ante dichos peligros (IPCC, 2022). En este estudio los riesgos clave se identifican de manera comparada intra-sectorialmente a través de un análisis multicriterio que incluye los tres componentes del riesgo.



puestos, impactos en cascada, y otros aspectos como la vulnerabilidad social o territorial frente al riesgo o posibles casos de maladaptación. Además, se indica la gobernanza existente y las principales carencias de información, entre otros aspectos.

Los capítulos sectoriales se estructuran en siete secciones. En primer lugar, se presenta una **introducción** que contextualiza el sector y define el alcance del análisis realizado. A continuación, se expone el **marco conceptual** de los riesgos derivados del cambio climático en el sector, incluyendo sus distintos componentes y la identificación de los riesgos más relevantes. Una vez identificados, estos riesgos clave se analizan en detalle mediante **cadena de impacto, fichas específicas y un examen de sus interconexiones**, las cuales se desarrollan con mayor profundidad en el Capítulo de Riesgos Complejos. **Con carácter ilustrativo, se incorpora un caso de estudio** representativo que contribuye a visibilizar buenas prácticas y a promover el intercambio de conocimiento entre territorios. Posteriormente, el **apartado de limitaciones y particularidades metodológicas** recoge los principales déficits de información detectados y formula recomendaciones orientadas a su superación, con el fin de reforzar futuras evaluaciones. Finalmente, la **bibliografía** reúne las fuentes utilizadas en el análisis, garantizando la trazabilidad y verificación de la información presentada.

La metodología aplicada para la identificación y desarrollo de los riesgos ha sido desarrollada en conjunto entre los autores principales de la Evaluación, la Oficina Española de Cambio Climático y un Grupo Asesor de Expertos, y se puede encontrar descrita con más detalle en el Capítulo de Metodología.

Además, el presente capítulo incorpora notas a pie de página con definiciones de ciertos términos específicos del sector, mientras que el glosario de los términos más comunes del proyecto figura como un anexo al documento general de la ERICC.



2. Introducción

El presente informe evalúa los principales riesgos climáticos a los que se ve sometido el sector Costas y Medio Marino en España, centrándose en los impactos del aumento del nivel medio del mar relativo, los eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento, y el calentamiento y acidificación del océano. Se analizan riesgos como la pérdida de superficie costera emergida, la salinización de acuíferos y suelos, las inundaciones episódicas, la pérdida de operatividad en infraestructuras portuarias y de protección, la pérdida de hábitats y biodiversidad costera y marina, y la proliferación de especies invasoras y blooms algales nocivos³. Estos riesgos se abordan en términos de peligros climáticos, exposición y vulnerabilidad, atendiendo a consecuencias de diversa índole y diferentes escalas temporales.

España cuenta con más de 8.000 km de costa, incluyendo la península ibérica, los archipiélagos balear y canario, y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla en el norte de África (Instituto Geográfico Nacional). Este litoral alberga una gran diversidad de tipos de costa, desde playas arenosas y acantilados hasta marismas, estuarios, deltas y sistemas dunares (Losada *et al.*, 2014). Más del 40 % de la población reside en zonas costeras, muchas de ellas densamente urbanizadas, con elevada dependencia de los ecosistemas marinos y costeros (MAPA, 2020). El litoral español alberga 27 puertos de interés general y más de 380 puertos autonómicos, que concentran el 80 % del comercio exterior por volumen (Puertos del Estado, 2023). A nivel económico, el turismo costero y marino representa una parte fundamental del PIB nacional, contribuyendo con hasta un 13,4 % y una proporción similar del empleo (INE, 2023). Además, cerca del 30 % del suelo agrícola de regadío se localiza en llanuras litorales vulnerables a la salinización y la pérdida de suelo fértil (MAPA, 2023). Las costas españolas también concentran morfologías singulares, como el delta del Ebro, y ecosistemas de alto valor ecológico como las praderas de *Posidonia oceanica*, cuya función protectora y climática es crítica (Liquete *et al.*, 2013).

Las comunidades autónomas costeras españolas presentan gran heterogeneidad en cuanto a configuración geomorfológica, usos del suelo e infraestructuras. Cataluña, la Comunidad Valenciana y Andalucía oriental se caracterizan por tener litorales densamente urbanizados y con importantes concentraciones turísticas e infraestructuras portuarias y agrícolas, muchas de ellas en llanuras deltaicas altamente expuestas a la inundación costera y la intrusión salina (Sánchez-Arcilla *et al.*, 2008). En el norte, Galicia, el Principado de Asturias, Cantabria y el País Vasco cuentan con costas abruptas que albergan playas encajadas y estuarios, así como infraestructuras industriales,

³ Floraciones masivas de algas nocivas.



logísticas y energéticas, incluyendo refinerías, centrales térmicas y nodos de transporte marítimo (Bonachea *et al.*, 2024). El litoral de las Islas Baleares y Canarias presenta una alta dependencia del turismo costero y concentra infraestructuras críticas como puertos, aeropuertos y plantas desaladoras y energéticas (Escudero-Gómez *et al.*, 2022; Cruz-Pérez *et al.*, 2022). Andalucía occidental, donde se encuentran el estuario del Guadalquivir y Doñana, presenta una coexistencia entre ecosistemas de alto valor ecológico y usos agrícolas intensivos, una combinación que plantea tensiones de compatibilidad no solo frente a los impactos del cambio climático (Couto *et al.*, 2024), sino también debido a presiones subyacentes y condicionantes sistémicos de gran relevancia. En todas estas regiones, la concentración de población, infraestructuras y actividad económica en la franja costera actual, junto con su tendencia de crecimiento (Neumann *et al.*, 2015; Reimann *et al.*, 2018), amplificará los riesgos futuros.

Los impactos climáticos en el sector Costas y Medio Marino generan impactos en cascada que afectan transversalmente a sectores estratégicos. En el ámbito de la paz, seguridad y cohesión social, la degradación de territorios habitables y la pérdida de medios de vida tradicionales inducen desplazamientos forzados, tensiones por el uso del suelo y conflictos sociales, como ya se ha observado en comunidades pesqueras del delta del Mekong o en poblaciones costeras del Sahel occidental, donde el retroceso del litoral y la salinización de los suelos han provocado migraciones internas y disputas por el acceso a tierras más seguras (IPCC, 2022). Estos procesos, descritos por Adger *et al.*, (2022), tienden a agravarse si los territorios que reciben población desplazada no disponen de los recursos, infraestructuras o marcos institucionales necesarios para facilitar una integración adecuada. En el sector salud, los eventos extremos costeros pueden producir impactos directos sobre la población, incluyendo la pérdida de vidas humanas, lesiones físicas, así como efectos inmediatos sobre la salud mental (Yenew *et al.*, 2025). Además, los daños sobre infraestructuras sanitarias, la pérdida de acceso a agua potable por intrusión salina y el aumento de enfermedades infecciosas y crónicas asociadas a condiciones de insalubridad y humedad tras episodios de inundación afectan de forma sostenida tanto la salud física como mental de las poblaciones costeras (Haine *et al.*, 2006). En España, las inundaciones costeras figuran entre los riesgos naturales con mayor impacto en salud pública: el Plan Nacional de Salud y Medio Ambiente (MITECO, 2022a) destaca que los efectos sobre la salud mental, como el estrés postraumático y la ansiedad, son frecuentes tras eventos como las DANAs en el litoral mediterráneo. Simultáneamente, el sector del urbanismo se enfrenta al colapso funcional de redes viarias, edificaciones y equipamientos urbanos, lo que obstaculiza el acceso a servicios básicos y complica la movilidad y resiliencia urbana (Ridha *et al.*, 2022). En cuanto al patrimonio, la destrucción de elementos culturales compromete la memoria colectiva y la diversidad cultural (Pörtner *et al.*, 2022).

El turismo costero, particularmente en regiones dependientes del modelo de sol y playa, sufre una pérdida de atractivo y viabilidad económica ante la degradación de playas, dunas y humedales, y



por la interrupción del tráfico portuario y de cruceros (Arabadzhyan *et al.*, 2021). Según el Observatorio de la Sostenibilidad (2023), más del 65 % de los municipios turísticos costeros en España están expuestos a riesgos asociados a la erosión o la inundación, lo que representa una amenaza directa al modelo económico del litoral. A su vez, la agricultura y la ganadería costeras enfrentan la pérdida de suelos fértiles, la salinización de acuíferos y la destrucción de infraestructuras (Gopalakrishnan *et al.*, 2019), reduciendo la seguridad alimentaria. En el litoral andaluz y levantino, se han identificado más de 40.000 hectáreas agrícolas vulnerables a intrusión salina y anegamiento, especialmente en cultivos intensivos próximos a marismas o al Mar Menor (MITECO, 2020a). En España, el sector industrial, energético y de servicios pueden verse comprometidos por el anegamiento de instalaciones, la alteración de cadenas de suministro y la pérdida de conectividad crítica. Esto es especialmente relevante en infraestructuras costeras estratégicas como los puertos —por ejemplo, Algeciras, Valencia, Barcelona o Bilbao— que manejan más del 60 % del tráfico marítimo nacional. Su disfunción podría elevar costes logísticos y productivos, afectar el abastecimiento de bienes esenciales y, en casos extremos, repercutir en rutas comerciales internacionales clave (Becker *et al.*, 2018). Por último, la pérdida de superficie costera emergida y la erosión acelerada afectan gravemente al patrimonio natural, provocando la degradación de hábitats como marismas y praderas marinas, disminuyendo la biodiversidad y comprometiendo servicios ecosistémicos esenciales como la protección frente a tormentas o la regulación climática (Roy *et al.*, 2023). A ello se suman otros peligros climáticos que afectan al medio marino, como el aumento de la temperatura del agua, la acidificación oceánica o la disminución del oxígeno disuelto, que alteran los ecosistemas marinos y costeros, reducen su resiliencia y agravan la pérdida de biodiversidad. Los riesgos costeros actúan como catalizadores de riesgos sistémicos intersectoriales, cuya gestión requiere respuestas integradas y coordinadas en distintos niveles de gobernanza. Estos riesgos afectan no solo a las infraestructuras costeras, sino también al transporte marítimo, la pesca y la acuicultura, y generan repercusiones sustanciales en sectores como el financiero y asegurador, dada su exposición a pérdidas acumuladas, interrupciones operativas y desplazamientos de actividad económica.



3. Riesgos relevantes

Los riesgos relevantes sobre el sector Costas y Medio Marino son aquellos con alto potencial de generar impactos sobre los sistemas físicos, ecológicos y socioeconómicos tanto en el litoral como en el medio marino, afectando negativamente su integridad, el funcionamiento de infraestructuras críticas, la provisión de servicios ecosistémicos esenciales (p. ej., la protección frente a inundaciones, la pesca o el turismo), así como el bienestar y la seguridad de la población costeras. Estos riesgos son el resultado de la interacción entre peligros climáticos, los elementos expuestos y su nivel de vulnerabilidad, y factores que condicionan su capacidad de respuesta (IPCC, 2022).

El **peligro** crónico más relevante en el sector es el aumento del nivel medio del mar relativo, que combina el ascenso del nivel medio del mar debido al cambio climático con procesos locales no climáticos como la subsidencia del terreno⁴, provocada por la compactación de sedimentos, la sobreexplotación de acuíferos o cargas excesivas sobre el suelo (Oelsmann *et al.*, 2024). Este aumento del nivel medio del mar sostenido a largo plazo produce **impactos crónicos o acumulativos**, como la pérdida de superficie emergida por inundación permanente, la regresión del litoral por erosión progresiva, la salinización de acuíferos y suelos agrícolas, o la degradación de hábitats costeros de elevado valor ecológico, como playas, sistemas dunares, marismas, humedales, o deltas (Nicholls & Cazenave, 2010; Cazenave & Le Cozannet, 2014). Además de este peligro, destacan otros crónicos con especial incidencia sobre el medio marino y costero. El aumento de la temperatura superficial del mar intensifica la estratificación de la columna de agua y reduce la mezcla vertical, lo que disminuye la disponibilidad de nutrientes y altera la cantidad y la calidad de la producción primaria. A su vez, esta elevación de la temperatura altera la distribución y fenología de especies marinas, favorece la expansión de especies invasoras y reduce la resiliencia de hábitats vulnerables. La acidificación oceánica, resultado del mayor contenido de CO₂ en la atmósfera, disminuye el pH del agua y debilita organismos calcificantes como moluscos y corales. En el caso de las fanerógamas marinas, no actúa por calcificación, sino a través de cambios en la química del carbono y del sedimento, con implicaciones para su productividad, epifitismo y reproducción. Ambos procesos generan efectos en cascada sobre redes tróficas, biodiversidad y servicios ecosistémicos (Wong *et al.*, 2014; Cooley *et al.*, 2022).

A estos impactos crónicos se suman los **impactos agudos o episódicos**, asociados a la intensificación de eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento. Estos episodios generan elevaciones

⁴ Descenso vertical de la superficie del suelo como resultado de la compactación de materiales del subsuelo, que puede estar inducida por causas naturales o por actividades humanas.



transitorias del nivel del mar en costa (resultado de la interacción entre marea astronómica, marea meteorológica, oleaje y viento intenso) que pueden superar las defensas existentes y provocar inundaciones, daños estructurales, colapsos funcionales en infraestructuras críticas, pérdida de ecosistemas y afectaciones directas a la población (Collins *et al.*, 2019). Los puertos y las obras de protección costera pueden sufrir impactos sustanciales como pérdida de calado por sedimentación, pérdida de operatividad por rebase, agitación o viento intenso, inundación y daños estructurales por oleajes superiores a los previstos en el diseño. Estas disrupciones afectan no sólo a las operaciones portuarias (Izaguirre *et al.*, 2021), sino también a las cadenas logísticas e intersectoriales vinculadas (Becker *et al.*, 2018). A diferencia de los impactos crónicos, que son acumulativos y progresivos en el tiempo, los impactos agudos se manifiestan de forma puntual, pero pueden desencadenar consecuencias severas o incluso irreversibles cuando ocurren con mayor frecuencia y el tiempo de recuperación entre eventos se reduce. Estos impactos varían geográficamente y a lo largo del tiempo en función de las trayectorias socioeconómicas compartidas⁵, la ocupación del territorio, el nivel de implementación de las medidas de adaptación y la gobernanza del riesgo a escala local, regional y nacional (O'Neill *et al.*, 2022).

⁵ Las SSP (del inglés, *Shared Socioeconomic Pathways*) son un conjunto de cinco escenarios narrativos y cuantitativos desarrollados por la comunidad científica internacional para explorar las interacciones entre desarrollo socioeconómico y cambio climático. Cada uno representa un futuro alternativo coherente y plausible del mundo durante el siglo XXI, sin intervenciones climáticas explícitas (mitigación o adaptación). Se utilizan como base para combinarlas con distintas políticas climáticas y generar escenarios conjuntos (SSP-RCP o SSP-GHG). Esto permite proyectar trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero futuras bajo diferentes contextos socioeconómicos.



A continuación, la **Tabla 1** describe las diferencias entre los impactos crónicos o acumulativos y agudos o episódicos y proporciona algunos ejemplos del sector Costas y Medio Marino.

Tabla 1. Tipos de impacto, características y ejemplos del sector Costas y Medio Marino.

Tipo de impacto	Definición	Características principales	Ejemplos en Costas y Medio Marino
Crónicos o acumulativos	Son aquellos que se desarrollan de forma gradual y sostenida en el tiempo, debido a la exposición prolongada a presiones, cuyo efecto se acumula progresivamente.	<ul style="list-style-type: none">• Evolución lenta y continua.• Dificiles de detectar en etapas tempranas.• Efectos acumulativos y muchas veces irreversibles.• Requieren monitorización a largo plazo.	<ul style="list-style-type: none">• Aumento del nivel medio del mar relativo.• Erosión costera de largo plazo.• Acidificación del océano.• Pérdida de biodiversidad marina.
Agudos o episódicos	Son aquellos que se manifiestan de forma repentina y con alta intensidad durante un evento concreto, generando daños inmediatos y visibles.	<ul style="list-style-type: none">• Ocurren en el corto plazo.• Alta intensidad y visibilidad.• Asociados a eventos extremos meteorológicos.• Requieren respuestas rápidas e implementación de medidas de emergencia.	<ul style="list-style-type: none">• Inundación costera por eventos extremos de oleaje y nivel del mar.• Daños en infraestructuras por eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento.• Mortalidad masiva de especies por olas de calor marinas.

La **exposición** en el sector hace referencia al conjunto de elementos, tanto humanos como naturales, que se encuentran situados en zonas susceptibles de experimentar impactos derivados de peligros como el aumento del nivel medio del mar relativo, la intensificación y mayor frecuencia de eventos extremos o el calentamiento y la acidificación del océano (IPCC, 2022). Desde una perspectiva socioeconómica, uno de los principales elementos expuestos es la población, especialmente en áreas de baja elevación, alta densidad urbana o carente de infraestructuras de protección. Junto a ella, el capital construido (p. ej., viviendas, instalaciones industriales, infraestructuras urbanas o turísticas) presenta una alta vulnerabilidad cuando está ubicado en primera línea de costa (Vousdoukas *et al.*,



2018). Asimismo, la actividad económica costera, que en España representa un porcentaje significativo del PIB regional en muchas comunidades autónomas, se ve comprometida en sectores clave como la industria portuaria y logística, el turismo litoral, la pesca y la acuicultura, y la agricultura de regadío en zonas deltaicas o llanuras aluviales (Suárez de Vivero & Rodríguez-Mateos, 2005; de Andrés *et al.*, 2017). Por ejemplo, en 2023, la pesca marítima en aguas nacionales españolas generó un Valor Añadido Bruto de aproximadamente 953 millones de euros y un Valor Añadido Neto de unos 850 millones de euros, lo que pone de manifiesto su peso económico dentro del modelo productivo costero español (MAPA y MITECO, 2023). Las infraestructuras críticas como redes de transporte, energía, saneamiento o abastecimiento también se sitúan frecuentemente en áreas costeras por razones funcionales y pueden sufrir interrupciones relevantes ante eventos extremos (Barrios-Crespo *et al.*, 2023; Nirandjan *et al.*, 2024). Otros componentes particularmente sensibles al aumento del nivel del mar relativo y a los eventos extremos asociados son: los acuíferos costeros (fundamentales para el abastecimiento urbano o agrícola, por la intrusión salina y la elevación del nivel freático); los servicios ecosistémicos que proveen protección natural frente a los impactos de erosión e inundación (Gracia *et al.*, 2018; Toimil *et al.*, 2023a); y las infraestructuras portuarias (Hanson *et al.*, 2011; Izaguirre *et al.*, 2021), incluidas terminales, equipamiento y operaciones logísticas y de transporte, cuya localización estratégica las hace especialmente expuestas a la agitación, el rebase, la inundación y la pérdida de calado. En este conjunto de elementos expuestos también se incluyen bienes e inversiones públicas y privadas de gran valor, como desarrollos inmobiliarios, industrias costeras o equipamientos estratégicos, que, ante el aumento del riesgo, requerirán movilizar recursos significativos para su protección, traslado o adaptación.

En lo relativo a los elementos naturales, la exposición se concentra en los hábitats y especies marinas y costeras, cuya distribución espacial y supervivencia dependen críticamente de factores físico-químicos como la temperatura, la salinidad, el pH, el oxígeno disuelto y la dinámica sedimentaria (Rocha *et al.*, 2015). Ecosistemas como las praderas de fanerógamas marinas (como las de la especie *Posidonia oceanica*, marismas, estuarios, humedales, fondos coralígenos o bosques de macroalgas albergan una elevada biodiversidad y desempeñan funciones esenciales en la provisión de servicios ecosistémicos (Barbier *et al.*, 2011; Liqueste *et al.*, 2013). Su localización en zonas de interacción tierra-mar los convierte en receptores directos de múltiples presiones derivadas del cambio climático, como la intrusión salina, la pérdida de superficie costera emergida o la degradación por eventos extremos (Hodapp *et al.*, 2023). En conjunto, la configuración territorial del litoral, la concentración de usos económicos y la singularidad ecológica de los ecosistemas costeros explican por qué estos son, simultáneamente, de los espacios más productivos y también más expuestos al riesgo climático (Pörtner *et al.*, 2022).

La **vulnerabilidad** en el contexto del riesgo de Costas y Medio Marino se refiere al grado en que los sistemas expuestos (que pueden ser naturales o antrópicos) pueden verse afectados negativamente por peligros climáticos, y se configura a partir de múltiples factores interrelacionados



(IPCC, 2022). Desde una perspectiva física, la vulnerabilidad viene determinada por características intrínsecas del medio costero, como la capacidad de respuesta ante la tasa de aumento del nivel medio del mar relativo. Si bien este aumento es parte de la peligrosidad, su velocidad condiciona directamente la vulnerabilidad, ya que limita el tiempo de adaptación de los sistemas físicos, ecológicos y sociales, y puede superar los umbrales naturales de resiliencia de playas, marismas o sistemas urbanos bajos, incrementando así su susceptibilidad al daño. Este ascenso relativo resulta de la combinación del aumento eustático del nivel del mar⁶ y procesos locales como la subsidencia o hundimiento del terreno, un fenómeno significativo en áreas como el delta del Ebro, la Albufera de Valencia o la costa gaditana (Alvarado-Aguilar *et al.*, 2012; Bergillos *et al.*, 2016). También influyen el tipo de costa, la pendiente del frente costero, que condiciona la penetración del agua, y la resiliencia geomorfológica, es decir, la capacidad de autorrecuperación de sistemas como dunas o playas ante la erosión (Toimil *et al.*, 2017a).

Desde una perspectiva ecológica o ambiental, la vulnerabilidad está ligada a los umbrales de supervivencia de ecosistemas marinos —como las praderas de *Posidonia oceanica* en Baleares (Marbà & Duarte, 2010), de *Cymodocea nodosa* en el Mar Menor (Ramos *et al.*, 2012) o los hábitats de algas rojas en Galicia (Piñeiro-Corbeira *et al.*, 2016)— y de ecosistemas costeros —como las marismas del Cantábrico (García-Artola *et al.*, 2016), el sistema dunar de Maspalomas (García-Romero *et al.*, 2019) o la Albufera de Valencia (Martín *et al.*, 2020)—. La superación de estos umbrales por estrés térmico, acidificación o eventos extremos puede comprometer procesos y funciones ecológicas (estructura, productividad, reproducción y reclutamiento), lo que reduce la protección de la costa y el sostenimiento de recursos pesqueros, con impactos subsecuentes sobre servicios ecosistémicos esenciales (Scholes *et al.*, 2016).

La vulnerabilidad socioeconómica incluye factores como la carga estructural o en superficie del terreno y el nivel de extracción de recursos subterráneos, que pueden amplificar la subsidencia. También son críticos los umbrales de afección a la población (p. ej., inundaciones de más de 10 cm pueden afectar movilidad y servicios), los umbrales de operatividad portuaria (afectados por oleaje y viento en puertos como los de Gijón, Algeciras o Palma), la calidad del capital construido (materiales, diseño, edad) y las tipologías de terminales y equipamiento, que condicionan la magnitud del daño (Martínez-Gomariz *et al.*, 2019).

Finalmente, la capacidad adaptativa está vinculada a la capacidad institucional y técnica de implementar medidas de adaptación, que varía entre comunidades autónomas (Losada *et al.*, 2019).

⁶ El ascenso eustático del nivel del mar hace referencia al aumento global del nivel del mar debido principalmente al calentamiento de los océanos (expansión térmica) y al deshielo de glaciares y capas de hielo, en contraste con los procesos locales como la subsidencia o elevación tectónica del terreno.



Los planes autonómicos de adaptación del Dominio Público Marítimo-Terrestre (DPMT) en Cataluña, el Principado de Asturias, las Islas Baleares o Murcia ya identifican puntos críticos en sus infraestructuras y hábitats costeros.

Los **factores de riesgo subyacentes** son condiciones estructurales, socioeconómicas o de gobernanza que, aunque no constituyen peligros climáticos por sí mismos, modulan la exposición y la vulnerabilidad y, por tanto, agravan el riesgo en los sistemas costeros frente al cambio climático (IPCC, 2022). Entre ellos destaca el crecimiento demográfico en zonas litorales, que incrementa la densidad de población expuesta a peligros como la inundación o la erosión costera. Este proceso suele ir acompañado de un aumento del capital construido (residencial, turístico o industrial) y una expansión urbana sobre áreas naturales o de alto valor ecosistémico, intensificando la presión sobre sistemas frágiles como marismas, dunas o deltas, cuya capacidad de recuperación se ve comprometida (Pörtner *et al.*, 2022). Asimismo, el aumento de la actividad económica en sectores como el turismo, la agricultura intensiva o la logística portuaria genera una mayor dependencia de los servicios, recursos e infraestructuras costeras, elevando tanto la exposición como las potenciales pérdidas asociadas. La transformación de usos del suelo (p. ej., la urbanización de llanuras inundables) reduce la capacidad de amortiguación natural frente a eventos extremos, al tiempo que impide la migración natural de hábitats ante la subida del nivel del mar (Sanz & Galán, 2020). A escala más amplia, el crecimiento del tráfico marítimo global (Sardain *et al.*, 2019), los cambios en los patrones de comercio internacional o la interdependencia de los puertos con otras infraestructuras estratégicas (p. ej., redes energéticas, transporte, telecomunicaciones) propician la propagación de impactos en cascada (Izaguirre *et al.*, 2020). La elevada dependencia energética de infraestructuras portuarias y zonas urbanas (Mat *et al.*, 2016; Sadiq *et al.*, 2021) incrementa la sensibilidad a disrupciones provocadas por inundaciones costeras episódicas. Finalmente, la falta de mantenimiento de infraestructuras, así como la ausencia o deficiente implementación de planificación y regulación adaptativa, refuerzan la vulnerabilidad estructural.

La **Figura 1** representa de forma esquemática todas las componentes previamente descritas, los peligros climáticos, principales elementos expuestos del sector, los atributos que condicionan la vulnerabilidad de los elementos expuestos y otros factores subyacentes del riesgo. Este esquema sigue el marco establecido en la *Guía técnica para una evaluación integral de riesgos y planificación en el contexto de cambio climático*, desarrollada recientemente por la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, 2022). Este modelo conceptual facilita la visualización y priorización de las distintas componentes y sitúa en el centro del marco los riesgos relevantes que caracterizan el sector.



Costas y medio marino

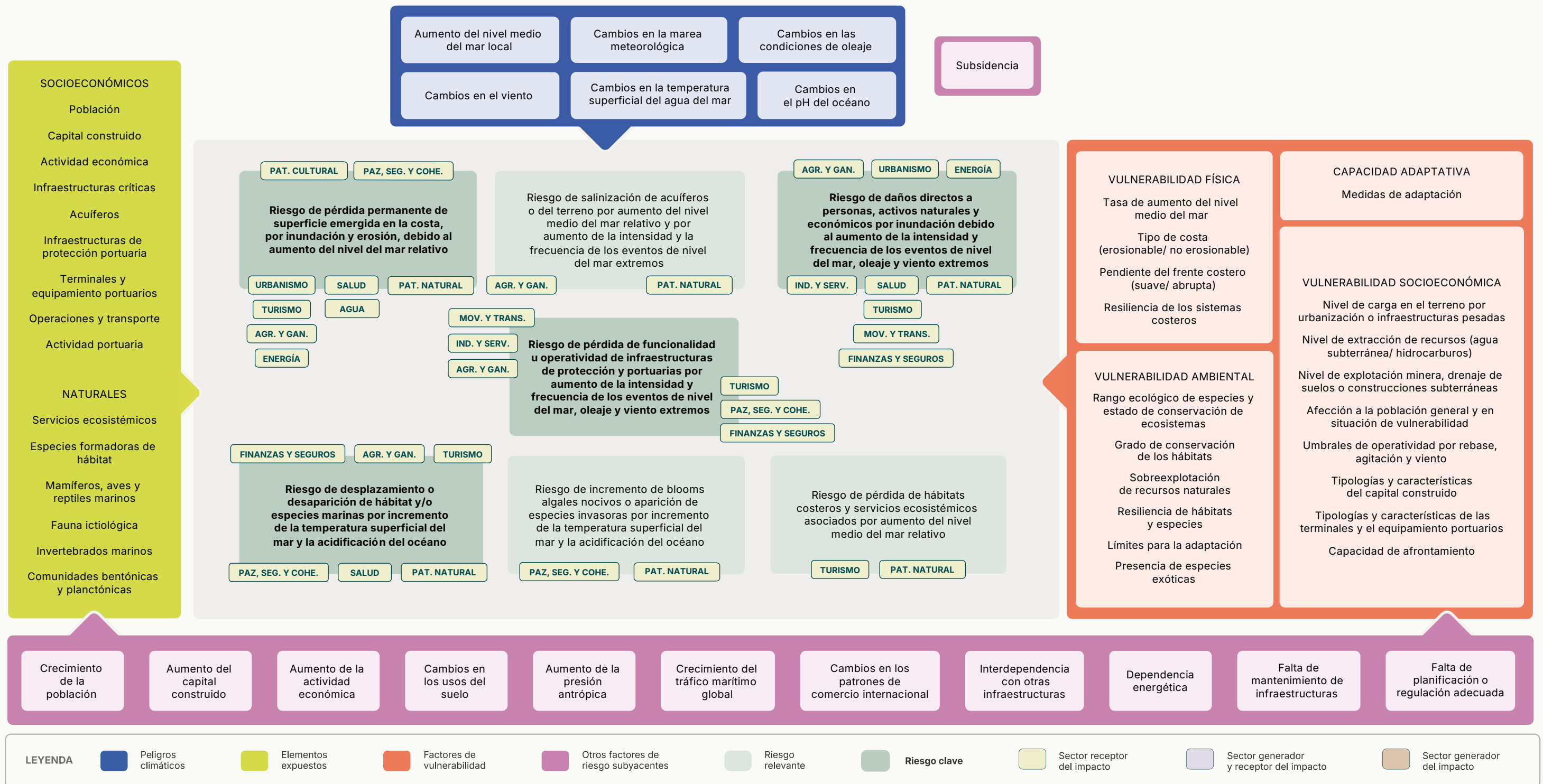


Figura 1. Riesgos relevantes para el sector Costas y Medio Marino.



Los riesgos relevantes para el sector Costas y Medio Marino se describen a continuación:

► **Riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo.**

Este riesgo se refiere a la desaparición irreversible de superficie costera que queda permanentemente sumergida o degradada por efecto combinado de la inundación persistente y la erosión progresiva asociadas al aumento del nivel medio del mar (Nicholls *et al.*, 2021). Afecta especialmente a aquellos tramos del litoral con baja cota respecto al nivel del mar, como estuarios, humedales, marismas y deltas, cuya capacidad de migración hacia el interior se ve frecuentemente limitada por la ocupación antrópica o por la existencia de infraestructuras rígidas (Losada *et al.*, 2014; Sanz & Galán, 2020). Ejemplos relevantes en España se localizan en el delta del Ebro, Doñana, la Albufera de Valencia o el delta del Llobregat. Esta pérdida permanente de superficie emergida implica una exposición total e irreversible para aquellas personas, infraestructuras y actividades económicas localizadas en zonas que quedan por debajo del nuevo nivel del mar. En ausencia de medidas de adaptación (p. ej., la elevación de edificaciones, la construcción de defensas o la modificación de usos del suelo), estos elementos expuestos no pueden continuar existiendo en su emplazamiento original y se ven forzados al desplazamiento o migración hacia el interior (Lincke & Hinkel, 2021). Esta situación implica no solo un riesgo físico directo, sino también un profundo impacto social y económico asociado a la relocalización de comunidades, la pérdida de capital construido y la disrupción de las actividades productivas, especialmente en sectores como el turismo, la actividad portuaria, la agricultura litoral o la pesca. Este riesgo puede cuantificarse mediante modelado de inundación estático (p. ej., empleando el método de la bañera) o dinámico (modelado de procesos), donde se combina información topográfica y escenarios de aumento del nivel medio del mar relativo. En España, se pueden emplear los mapas de inundación desarrollados en los proyectos del programa PIMA Adapta-Costas (MITECO, 2020) o los generados en el marco de la Directiva de Inundaciones de la UE. La superficie afectada depende del escenario de emisiones considerado, del horizonte temporal y de procesos locales como la subsidencia o los cambios en la línea de costa derivados de la dinámica sedimentaria.

► **Riesgo de salinización de acuíferos o del terreno por aumento del nivel medio del mar relativo y por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar y oleaje extremos.**

La intrusión salina constituye un peligro para la calidad de los recursos hídricos subterráneos y la fertilidad del suelo, provocada por la penetración del agua marina en acuíferos costeros o por



la acumulación de sal en terrenos bajos tras eventos de sobre inundación (Ketabchi *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2023). Se manifiesta con especial intensidad en aquellas zonas donde los acuíferos costeros son explotados para el suministro de agua destinada a actividades agrícolas, urbanas o industriales. La intrusión salina deteriora la calidad de los recursos hídricos subterráneos y reduce su disponibilidad (Baena-Ruiz *et al.*, 2017; Almazan-Benitéz *et al.*, 2024). Este fenómeno puede resultar particularmente problemático en áreas con agricultura intensiva o dependientes de acuíferos para abastecimiento, como el Mar Menor o la huerta valenciana y las islas Baleares y Canarias. Los efectos de la salinización incluyen la pérdida de suelos productivos, la degradación de ecosistemas dependientes del agua subterránea y la disminución de la disponibilidad de agua dulce tanto para consumo humano como para riego (Vineis *et al.*, 2011; Shukla *et al.*, 2019). Además, la salinización de suelos y aguas subterráneas reduce los rendimientos agrícolas (MAPA, 2023), obliga al cambio de cultivos y encarece la producción de alimentos, generando impactos económicos significativos (Porter *et al.*, 2022). Asimismo, la intrusión salina afecta gravemente a humedales costeros, reduciendo servicios ecosistémicos clave como la protección frente a inundación, la biodiversidad y la provisión de hábitats (Pörtner *et al.*, 2022). La evaluación puede llevarse a cabo mediante el análisis de gradientes piezométricos, modelado hidrogeológico o monitoreo de conductividad en pozos, en combinación con escenarios de aumento del nivel del mar y eventos extremos (Werner *et al.*, 2013; Jiménez-Martínez *et al.*, 2020). En España, los Planes Hidrológicos de Cuenca del ciclo de planificación 2021–2027 (MITECO-DGA, 2023) permiten identificar masas de agua subterránea costeras que presentan mal estado químico debido a procesos de intrusión salina. Según los datos de la Dirección General del Agua, la tendencia en la mayoría de estas masas es desfavorable, con incrementos sostenidos de la conductividad y del contenido en cloruros en más del 60 % de los puntos de control, especialmente en acuíferos litorales de la Comunidad Valenciana, Murcia y Canarias. Sólo una minoría (<15 %) muestra signos de estabilización o mejora.

► **Riesgos de inundación o daños directos a personas, activos naturales y económicos por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.**

La inundación costera episódica se produce cuando eventos meteorológicos extremos generan una elevación transitoria del nivel del mar, causada por la combinación de marea astronómica, marea meteorológica, oleaje intenso y viento fuerte (IPCC, 2019). Estas condiciones pueden superar los umbrales de protección existentes y provocar la inundación temporal de áreas costeras, afectando directamente a personas, infraestructuras, actividades económicas y ecosistemas (Ritchie *et al.*, 2021). Este tipo de riesgo se intensifica en áreas densamente urbanizadas, con escasa elevación y sin defensas eficaces (Losada *et al.*, 2019). Ejemplos recientes incluyen los temporales atlánticos de 2013–2014 en el norte de España (Garrote *et al.*, 2018) y la tormenta Gloria (enero



de 2020) en el litoral mediterráneo (Amores *et al.*, 2020), que causó daños severos en playas, paseos marítimos, sistemas dunares y zonas urbanas, especialmente en Cataluña, la Comunidad Valenciana y las Islas Baleares. Para evaluar este tipo de riesgo es necesario un enfoque que combine proyecciones de inundación costera para diferentes escenarios con el análisis geoespacial de la exposición (población, activos económicos, ecosistemas y redes de servicios) y funciones de vulnerabilidad específicas por tipo de elemento expuesto (Toimil *et al.*, 2017b). Las funciones de vulnerabilidad cuantifican los efectos esperados en función de variables como la resistencia estructural, la movilidad de la población, el valor de las actividades afectadas y la sensibilidad ecológica (Adger, 2006). Así, zonas turísticas, industriales o con ecosistemas degradados pueden sufrir impactos más severos. En España, herramientas como los mapas de riesgo elaborados en el marco del programa PIMA Adapta-Costas (MITECO, 2020b) o los desarrollados para la aplicación de la Directiva de Inundaciones de la UE ofrecen una base sólida para estos análisis. La superficie inundada depende del escenario de emisiones, el horizonte temporal y del periodo de retorno del evento considerado, así como de procesos locales como la subsidencia o los cambios en la línea de costa derivados de la dinámica sedimentaria.

► **Riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.**

Este riesgo hace referencia a la disminución o interrupción de la capacidad operativa de diques, escolleras, muelles, terminales y otros elementos portuarios y se manifiesta cuando las condiciones meteorológicas superan los umbrales de diseño o seguridad estructural, provocando fenómenos como el rebase del oleaje, la agitación excesiva en las dársenas, la pérdida de calado por sedimentación, o la pérdida de estabilidad estructural (Verschuur *et al.*, 2020). Estos procesos afectan a la maniobrabilidad de las embarcaciones, a las operaciones de carga y descarga, y pueden provocar daños físicos sobre terminales, grúas, sistemas eléctricos o estructuras de abrigo, lo que repercute en la actividad logística, comercial e industrial de los puertos (Izaguirre *et al.*, 2020, 2021). Es especialmente relevante en zonas portuarias situadas en tramos expuestos de costa o con bajos estándares de protección, ya sea por envejecimiento de las infraestructuras, diseño obsoleto o falta de mantenimiento. En España, este tipo de riesgo afecta potencialmente a todas las comunidades autónomas con litoral y, en particular, a aquellas donde se ubican puertos en áreas con elevada exposición a temporales, como el País Vasco, Galicia, el Principado de Asturias o las Islas Baleares, donde el rebase de los diques o la sedimentación de los canales de acceso ya han generado episodios de disfuncionalidad (Lara *et al.*, 2019; Lucio *et al.*, 2024). Un ejemplo destacable es el episodio del invierno de 2014 en el Cantábrico, donde varios puertos sufrieron interrupciones temporales por rebase y daños en infraestructuras (Puertos del Estado, 2015). La



evaluación de este riesgo requiere combinar información sobre el clima marítimo futuro con datos sobre la cota, geometría y condiciones estructurales de las infraestructuras portuarias, así como sobre los umbrales de operatividad de cada terminal (altura de rebase, agitación permitida, velocidad del viento, etc.). Esta información ha sido parcialmente integrada en los planes autonómicos de adaptación de los terrenos de DPMT adscritos a las comunidades autónomas (MITECO, 2021a). En ellos se recogen estimaciones del número de puertos o infraestructuras que pueden quedar en situación de riesgo alto o muy alto, en función del escenario de emisiones, el horizonte temporal y el periodo de retorno del oleaje considerado, así como de la cota de inundación, el viento esperado y la vulnerabilidad estructural de las instalaciones.

► **Riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitats y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial y la acidificación del mar.**

El calentamiento del océano debido al cambio climático está provocando alteraciones sustanciales en la distribución, abundancia y composición de especies y hábitats en el litoral español. Este riesgo se materializa en forma de desplazamiento hacia latitudes o profundidades mayores de especies sensibles a la temperatura, pérdida de condiciones adecuadas para la reproducción o supervivencia de especies autóctonas, y degradación de hábitats marinos clave, con consecuencias sobre la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Hernández *et al.*, 2023). Aunque afecta a toda la costa española, su intensidad y manifestaciones varían entre regiones. En la fachada atlántica, destacan los impactos sobre rías, marismas y bosques de algas pardas, como fucales y laminariales (Casado-Amezúa *et al.*, 2019), así como sobre comunidades bentónicas dominadas por *Gelidium corneum*, un alga roja de alto valor ecológico y económico que sostiene redes tróficas de moluscos, crustáceos y peces demersales (Ramos *et al.*, 2016). En el Mediterráneo, la regresión de praderas de *Posidonia oceanica* (Telesca *et al.*, 2015) y la degradación de lagunas litorales comprometen funciones esenciales como la reproducción de especies comerciales (p. ej., meros, doradas y nacras). Además, estos ecosistemas desempeñan un papel clave como sumideros de carbono, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático. En Canarias, los hábitats volcánicos y oceánicos profundos, que albergan cetáceos, tiburones, tortugas marinas y especies endémicas como el pez tamboril canario, son vulnerables al aumento térmico, a la acidificación y a la desoxigenación (de Sales, 2022). Los impactos ya son observables en forma de desplazamientos de especies, pérdida de biodiversidad, alteración de comunidades bentónicas y regresión de hábitats estructurantes como *Gelidium corneum* y *Posidonia oceanica*. Estas transformaciones afectan a la pesca, la acuicultura y el turismo costero, especialmente en regiones mediterráneas, Baleares y Canarias, donde estos sectores tienen gran peso económico. Estos procesos están alterando la estructura y funcionamiento de las comunidades marinas, modificando las relaciones tróficas y favoreciendo la expansión de especies exóticas en detrimento



de especies nativas. En menos de una década podrían alcanzarse puntos de no retorno en algunos ecosistemas vulnerables, agravando la inseguridad económica y alimentaria de comunidades con baja capacidad de adaptación. La evaluación de este riesgo requiere la monitorización de indicadores físicos y biológicos (p. ej., temperatura superficial del agua del mar, pH del océano, cobertura de hábitats, presencia de especies sensibles o exóticas), así como el uso de modelos ecológicos que proyecten cambios en la distribución de especies y hábitats potenciales bajo diferentes escenarios climáticos (Ramos *et al.*, 2012; Mandiola *et al.*, 2025). En España, estos impactos han sido evaluados en el marco de algunos proyectos del programa PIMA Adapta-Costas (MITECO, 2020b), como el desarrollado en el Principado de Asturias, donde se evaluó el efecto del aumento de la temperatura máxima superficial del mar en la distribución de las comunidades de macroalgas y se analizó espacialmente el cambio en la probabilidad de ocurrencia del *Gelidium corneum*. Más recientemente, el proyecto LIFE INTEMARES ha incorporado herramientas de modelización predictiva que, a partir de datos oceanográficos y biológicos recientes, permiten identificar áreas del litoral español con mayor probabilidad de pérdida de hábitat y desplazamiento de especies en el horizonte 2050–2100, priorizando medidas de conservación adaptativa en espacios de la Red Natura 2000 marinos (FB y MITECO, 2023).

► **Riesgo de incremento de blooms algales nocivos o aparición de especies invasoras por incremento de la temperatura superficial del mar.**

Este riesgo afecta a todas las comunidades autónomas costeras, con manifestaciones regionales diferenciadas según las condiciones oceanográficas, la conectividad biológica y los usos del espacio litoral. El aumento de la temperatura superficial del agua del mar favorece la proliferación de floraciones algales nocivas y facilita la colonización y expansión de especies exóticas invasoras (IPCC, 2022). Estas alteraciones suponen una amenaza directa para la biodiversidad marina, al desplazar comunidades autóctonas y degradar hábitats clave como praderas de *Posidonia oceanica*, bancos de algas pardas y fondos bentónicos como el coralinígeno y los fondos de maërl o rodolitos (Sureda *et al.*, 2017). La expansión de estas especies se ve favorecida cuando las comunidades nativas están debilitadas por el estrés térmico o la contaminación, lo que reduce la competencia biológica y la resiliencia del ecosistema. Como consecuencia, pueden generar impactos negativos sobre sectores dependientes de los ecosistemas costeros, como la pesca, la acuicultura o el turismo (Angulo *et al.*, 2021). En el litoral andaluz, se han documentado expansiones masivas de especies invasoras como *Rugulopteryx okamurae* o *Caulerpa taxifolia*, que han colonizado fondos someros, acumulándose en redes de pesca, playas y puertos. El caso de *R. okamurae* en el litoral de Cádiz y Málaga ha ocasionado pérdidas económicas directas en la pesca artesanal, estimadas en más de 1,1 millones de euros anuales en la localidad de Tarifa por disminución de capturas, costes de limpieza y daños en artes de pesca, además de gastos municipales superiores a 500 000 € anuales para la retirada de



arribazones en playas y puertos (Altamirano *et al.*, 2016; Mogollón *et al.*, 2024). En el norte peninsular, especies como la ascidia *Pyura herdmani* han alterado ecosistemas y afectado explotaciones acuícolas, como en Galicia (Rius *et al.*, 2024). Se estima que más del 70–80 % de la costa española podría verse potencialmente afectada por estos fenómenos, especialmente en zonas donde la temperatura del mar ya supera umbrales críticos para especies autóctonas. La evaluación de este riesgo puede realizarse a través del seguimiento de indicadores ecológicos (p. ej., extensión y densidad de hábitats afectados, abundancia relativa de especies invasoras), el modelado de la idoneidad ambiental futura para especies invasoras en distintos escenarios climáticos y el análisis de impactos socioeconómicos asociados. En España, existen diversos estudios que permiten caracterizar parcialmente este riesgo, incluyendo el informe de Calvo Manazza *et al.* (2022), que identifica 57 especies alóctonas con riesgo alto o muy alto de impacto ecológico en la Red Natura 2000 marina, así como zonas críticas de introducción como el litoral andaluz, las Islas Baleares y Canarias. El seguimiento realizado por el Instituto Español de Oceanografía (Png González *et al.*, 2022) indica que especies invasoras como *R. okamurae*, *Caulerpa cylindracea* y *Undaria pinnatifida* han experimentado un aumento sustancial en su distribución desde 2015, afectando a hábitats protegidos como praderas de Posidonia y arrecifes. Los informes de la UICN (2013; 2023) señalan que las especies invasoras marinas representan una de las cinco principales amenazas a la biodiversidad costera española, con pérdidas económicas asociadas en sectores como la acuicultura, el turismo y la pesca que pueden superar los 10 millones de euros anuales a escala nacional.

► **Riesgo de pérdida de hábitats costeros y servicios ecosistémicos asociados por aumento del nivel medio del mar relativo.**

El aumento del nivel medio del mar relativo representa un peligro sustancial para los hábitats costeros, como playas, dunas, estuarios, marismas, humedales y deltas, especialmente en zonas de baja cota topográfica respecto al nivel del mar (Von Holle *et al.*, 2019; Hindsley & Yoskowitz, 2020). Este fenómeno puede provocar la pérdida progresiva o degradación de estos ecosistemas debido a la inundación permanente. Cuando estas áreas están confinadas por infraestructuras o desarrollos urbanos que impiden su migración tierra adentro, el riesgo se agrava por el fenómeno de estrangulamiento costero o *coastal squeeze*, en inglés (Pontee, 2013). Estos hábitats costeros constituyen más del 40 % del litoral español (Losada *et al.*, 2014) y son esenciales tanto por su valor ecológico como por los servicios ecosistémicos que proporcionan, incluyendo protección costera, almacenamiento de carbono, zonas de cría para especies comerciales y valor recreativo (Barbier *et al.*, 2011; Mehvar *et al.*, 2018). La pérdida de estas áreas reduce la capacidad natural de protección frente a inundaciones y erosión, lo que incrementa la exposición de infraestructuras, asentamientos costeros y actividades económicas como la pesca, la agricultura y el turismo, particularmente en zonas como el delta del Ebro, las marismas del Guadalquivir o el litoral atlántico



andaluz. Su pérdida genera impactos en cascada sobre sectores como la pesca, el turismo, la acuicultura y la agricultura costera, y puede aumentar la exposición al riesgo, las desigualdades territoriales y la pérdida de resiliencia de los sistemas socioecológicos (Liquete *et al.*, 2013; Pörtner *et al.*, 2022). El delta del Ebro, las marismas del Guadalquivir y numerosas playas del Cantábrico o el Mediterráneo figuran entre las zonas más vulnerables. Por ejemplo, los estudios del programa PIMA Adapta-Costas estiman pérdidas anuales superiores a 900 millones de euros en valor recreativo de playas para 2100 bajo el escenario RCP8.5, con impactos destacados en Cantabria, Murcia y Andalucía. La evaluación de este riesgo requiere un enfoque multidimensional que combine el análisis biofísico de los impactos con la valoración económica de los servicios ecosistémicos afectados. Para estimar las pérdidas asociadas a la desaparición de hábitats costeros, se emplean técnicas de valoración de activos naturales, que permiten asignar un valor económico a bienes y servicios no comercializados directamente en los mercados. Entre los métodos más comunes se encuentran el daño evitado (Toimil *et al.*, 2023), la función de producción (Toimil *et al.*, 2018), la valoración contingente (Ariza *et al.*, 2012) y el método del coste de viaje (Loomis & Santiago, 2013). Estos análisis económicos combinan, entre otras fuentes de datos (climáticas, sociales o ambientales), cartografía de ecosistemas y estudios geoespaciales de impacto, como áreas de playa erosionadas y mapas de inundación costera, incluidos los elaborados en el marco del programa PIMA Adapta-Costas (MITECO, 2020b).



A continuación, la **Tabla 2** recoge el resumen de los riesgos relevantes en el sector Costas y Medio Marino.

Tabla 2. Listado de riesgos relevantes en el sector Costas y Medio Marino

Id.	Subsistemas	Riesgo Relevante	Riesgo Clave
RR6.1	Físico/infraestructural, económico/productivo, sistémico/ interdependencias, ambiental, social e institucional.	Riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel del mar relativo.	RC6.1
RR6.2	Físico/infraestructural, económico/productivo, sistémico/ interdependencias, ambiental, social e institucional.	Riesgo de salinización de acuíferos o del terreno por aumento del nivel medio del mar relativo y por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar y oleaje extremos.	
RR6.3	Físico/infraestructural, económico/productivo, sistémico/ interdependencias, ambiental, social e institucional.	Riesgos de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.	RC6.2
RR6.4	Físico/infraestructural, económico/productivo, sistémico/ interdependencias, social e institucional.	Riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.	RC6.3
RR6.5	Ecológico/ambiental, social, económico e institucional.	Riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano.	RC6.4
RR6.6	Ecológico/ambiental, social, económico e institucional.	Riesgo de incremento de blooms algales nocivos o aparición de especies invasoras por incremento de la temperatura superficial del mar.	
RR6.7	Ecológico/ambiental, social, económico e institucional.	Riesgo de pérdida de hábitats costeros y servicios ecosistémicos asociados por aumento del nivel medio del mar relativo.	



4. Riesgos clave

Los Riesgos Clave (RC) son aquellos riesgos potencialmente graves que pueden traducirse en impactos en la actualidad y que pueden incrementar su severidad con el tiempo debido a cambios en la naturaleza de los peligros y/o a la exposición/vulnerabilidad que presentan los elementos analizados ante dichos peligros (IPCC, 2022). Para identificar los riesgos clave del sector Costas y Medio Marino, los riesgos relevantes previamente descritos se sometieron a un proceso de priorización a través de la aplicación de un análisis multicriterio (AMC). Los criterios establecidos en el AMC tomaron como referencia los definidos por el IPCC (2022) y la escala establecida se inspiró en el marco empleado por el Reino Unido en su evaluación de riesgos (Betts and Brown, 2021) y en el estudio de los riesgos climáticos de Europa (EEA, 2024).

La aplicación de dichos criterios al sector de Costas y la puntuación obtenida para cada riesgo relevante puede consultarse en detalle en el Análisis Multicriterio. Las puntuaciones más altas se obtuvieron para los siguientes riesgos que son catalogados como “Riesgos Clave” y se analizan en profundidad en la siguiente sección:

- ▶ RR6.1 Riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo. (RC6.1).
- ▶ RR6.3 Riesgos de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos. (RC6.2).
- ▶ RR6.4 Riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos. (RC6.3).
- ▶ RR6.5 Riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano. (RC6.4).

A continuación, se describen en detalle los riesgos clave identificados.



4.1. RC6.1. Riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo.

El riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo aborda la posibilidad de que determinadas zonas costeras queden sumergidas o se degraden irreversiblemente (Nicholls *et al.*, 2021). Afecta especialmente a tramos de costa de baja cota, como deltas, estuarios, humedales o playas, cuya posibilidad de desplazarse tierra adentro se ve restringida por la existencia de infraestructuras rígidas (Losada *et al.*, 2014; Sanz & Galán, 2020). Las consecuencias asociadas a esa pérdida de terrenos por anegación permanente incluyen impactos directos sobre la población, los medios de vida, el tejido económico y los ecosistemas, así como riesgos en cascada sobre sectores como la salud, el turismo, el transporte y el patrimonio natural (Glavovic *et al.*, 2022).

En España, este riesgo afecta a la totalidad de comunidades autónomas costeras, que abarcan más del 40 % del territorio nacional (Losada *et al.*, 2014). Cerca de 8,000 km de costa podrían verse afectados de manera variable en función de la topografía y el estándar de protección existente. En muchas regiones costeras, se producirán efectos sustanciales a partir de 2040-2050 para el escenario SSP5-8.5 y de 2050-2060 para el escenario SSP2-4.5, con creciente severidad hacia 2100 (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Para el escenario SSP1-2.6, se esperan impactos localizados en zonas bajas y altamente expuestas de 2050 en adelante (Fox-Kemper *et al.*, 2021). En partes del delta del Ebro, el aumento del nivel medio del mar relativo puede superar umbrales físicos que den lugar a impactos no lineales a partir de 2040-2060, es decir, respuestas abruptas y desproporcionadas frente a incrementos graduales del nivel del mar (Glavovic *et al.*, 2022). Por ejemplo, una elevación adicional de pocos centímetros podría desencadenar la pérdida irreversible de superficie agrícola por salinización, el colapso funcional de sistemas de drenaje o la entrada permanente de agua marina en zonas actualmente protegidas, generando daños mucho mayores que los esperados en función del ritmo de ascenso. La pérdida de terrenos y superficie de playa seca por inundación es irrecuperable salvo en zonas limitadas y solamente por la acción humana como el bombeo de agua, la aportación artificial de arena o la construcción de defensas (IPCC, 2022).

La **Figura 2** representa la cadena de impacto asociada a este riesgo clave, incorporando los componentes esenciales del riesgo: peligro, exposición y vulnerabilidad. El riesgo clave se sitúa en el centro del marco, donde confluyen los impactos físicos que resultan de los peligros, los elementos expuestos y los atributos que determinan su nivel de vulnerabilidad. A partir de este nodo central se despliegan las consecuencias del riesgo en forma de impactos biofísicos y socioeconómicos directos, así como de riesgos en cascada, tanto propios del sector como derivados de su interrelación con otros sectores.

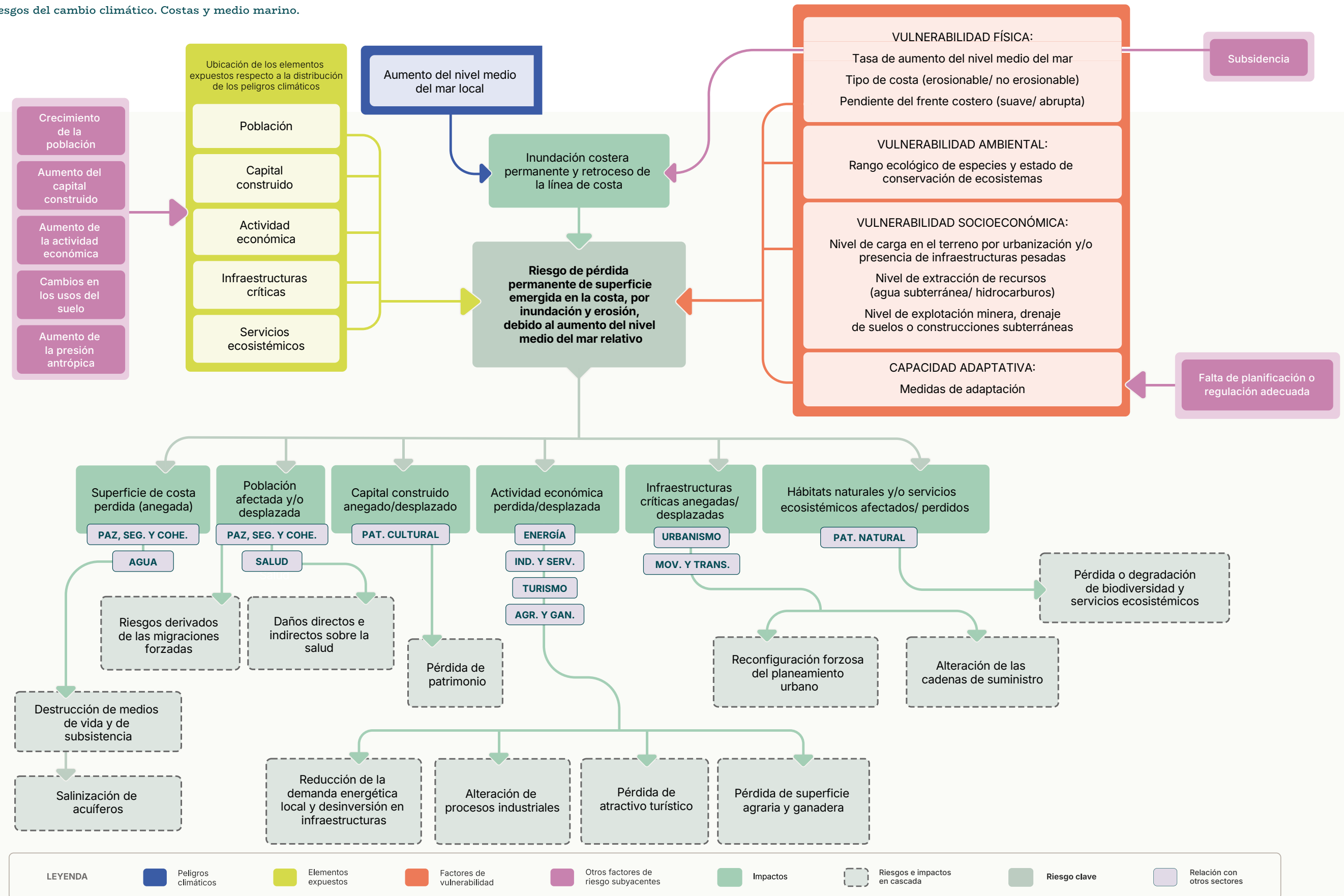


Figura 2. Cadena de impactos para el riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo.



El riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en zonas costeras por inundación y erosión está asociado fundamentalmente a dos **peligros** principales: el aumento del nivel medio del mar local y la subsidencia del terreno. La primera tiene un origen climático y está impulsada por la expansión térmica del océano (Church *et al.*, 2013; Fox-Kemper *et al.*, 2021), la fusión de glaciares de montaña (Hock *et al.*, 2019), y la pérdida de masa de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida (Meredith *et al.*, 2019), junto con alteraciones en el almacenamiento de agua terrestre, como los cambios en acuíferos, embalses y zonas húmedas, que modifican el balance global del agua y contribuyen al ascenso del nivel del mar (Douville *et al.*, 2021). La segunda, de origen no climático, responde tanto a procesos naturales, como la compactación natural de sedimentos en zonas deltaicas, como a causas antrópicas, entre las que destacan la extracción intensiva de aguas subterráneas, hidrocarburos o gas (Nicholls *et al.*, 2021). Cabe señalar que ciertos factores climáticos, como las sequías prolongadas, pueden agravar indirectamente estos procesos al intensificar el uso de acuíferos. La interacción entre estos peligros da lugar a dos impactos costeros crónicos: la inundación permanente de zonas bajas, que quedan anegadas de forma irreversible, y el retroceso progresivo de la línea de costa por erosión, especialmente en playas, marismas y deltas (Ranasinghe *et al.*, 2016; Toimil *et al.*, 2020). Estos procesos conllevan una pérdida sostenida de superficie actualmente emergida, comprometiendo la funcionalidad ecológica, la habitabilidad y los usos socioeconómicos del litoral (Glavovic *et al.*, 2022; Pörtner *et al.*, 2022).

La **exposición** en relación con el riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, como consecuencia del ascenso del nivel medio del mar relativo, está determinada esencialmente por la presencia y concentración de población, capital construido, actividad económica, infraestructuras críticas y servicios ecosistémicos en zonas litorales bajas. Estos elementos se consideran factores de exposición porque su localización en áreas susceptibles de inundación y erosión condiciona la magnitud de los impactos potenciales (IPCC, 2022). La **Figura 3** muestra un ejemplo de caracterización geoespacial de los edificios residenciales y el número de residentes en Santander (Cantabria). En comunidades autónomas como Andalucía, Cataluña y la Comunidad Valenciana, la expansión urbanística sobre llanuras litorales, marjales y deltas ha incrementado significativamente la exposición de población y activos residenciales (p. ej., ICGC, 2021). En comunidades autónomas como Baleares y Canarias, esta exposición se manifiesta en la alta densidad de instalaciones hoteleras, equipamientos recreativos y otras infraestructuras turísticas situadas directamente sobre la franja costera (SOCIB, 2021; GRAF-CAN, 2022). En la región de Murcia, la ocupación intensiva del cordón litoral de La Manga del Mar Menor representa un caso paradigmático de exposición acumulada, con edificaciones turísticas, dotaciones y redes de servicios implantadas sobre una estrecha franja costera con escasa capacidad de respuesta ante procesos crónicos de pérdida de superficie emergida (IHCantabria, 2021a). Asimismo, en regiones como Galicia, el Principado de Asturias, Cantabria



Figura 3. Ejemplo de visualización de la caracterización de la población para estudios de inundación costera. Fuente: PIMA Adapta-Cantabria (IHCantabria, 2021a).

y el País Vasco, la exposición se manifiesta en infraestructuras críticas situadas en cotas bajas, como redes de transporte, plantas energéticas o equipamientos sanitarios y educativos, que podrían verse afectadas por la alteración permanente del borde litoral (IHCantabria, 2021b, 2021b; IHOBE, 2021). Los servicios ecosistémicos costeros, como la protección natural, la estabilización sedimentaria o la provisión de hábitats, se encuentran también expuestos en todo



el litoral, especialmente allí donde la presión antrópica y la falta de espacio para la migración tierra adentro limitan su persistencia funcional. Los cambios demográficos, el aumento del capital construido, el crecimiento de la actividad económica, las transformaciones en los usos del suelo y la creciente presión sobre los ecosistemas litorales constituyen factores de riesgo subyacente, al incrementar progresivamente la exposición y reducir la resiliencia del sistema costero frente a impactos crónicos (Ranasinghe *et al.*, 2021; Glavovic *et al.*, 2022).

La **vulnerabilidad** en relación con el riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en zonas costeras está condicionada por factores físicos, socioeconómicos, ambientales y por atributos vinculados a la capacidad adaptativa de los territorios (Adger, 2006). Entre los factores de vulnerabilidad física, destacan la tasa de aumento del nivel medio del mar relativo, el tipo de costa y la pendiente del frente costero. Una mayor tasa de ascenso del nivel medio del mar reduce el margen temporal disponible para implementar medidas de adaptación y favorecer respuestas graduales del sistema costero. Esta vulnerabilidad se ve acentuada en costas de baja pendiente y con materiales fácilmente erosionables, como playas arenosas, marismas o sistemas deltaicos, donde incluso pequeñas elevaciones del nivel del mar pueden desencadenar retrocesos sustanciales de la línea de costa y la pérdida irreversible de superficie emergida. Este es el caso de deltas y llanuras litorales en Andalucía (como Doñana), Cataluña (delta del Ebro) o la Comunidad Valenciana (marjales), donde la combinación de escasa pendiente y baja cota con respecto al nivel medio del mar agrava la vulnerabilidad física (Sánchez-Arcilla *et al.*, 1998).

En cuanto a la vulnerabilidad socioeconómica, esta se ve incrementada por actividades que favorecen o aceleran la subsidencia, como una alta carga en superficie derivada de una urbanización intensa o de infraestructuras pesadas, por ejemplo, en la Región de Murcia, en zonas como La Manga del Mar Menor, así como por la extracción continuada de agua subterránea (observada en acuíferos litorales de Andalucía y Murcia) o hidrocarburos, el drenaje de suelos húmedos y la presencia de excavaciones subterráneas o túneles urbanos (Molina *et al.*, 2009; Rodríguez-Estrella, 2012). Estos procesos agravan el hundimiento del terreno y también reducen la capacidad de recuperación frente a la elevación del nivel del mar. Un caso representativo es el delta del Ebro, que experimenta tasas de subsidencia de hasta 3 mm/año, resultado de la compactación natural del terreno y de factores antrópicos como la reducción del aporte fluvial de sedimentos, la explotación de acuíferos y el drenaje de suelos húmedos (Ibáñez *et al.*, 2014).

La vulnerabilidad ambiental está determinada por los umbrales de tolerancia de los ecosistemas costeros ante el anegamiento prolongado y crónico, la salinización o la pérdida de conectividad ecológica (Pörtner *et al.*, 2022). Sistemas como los humedales de Doñana, las marismas del Odiel y del Guadalquivir, o los hábitats litorales en Baleares, presentan una elevada sensibilidad a estos cambios, pudiendo perder su funcionalidad ecológica y colapsar.



Finalmente, los atributos de vulnerabilidad relacionados con la capacidad adaptativa, como el grado de implementación y eficacia de las medidas de adaptación, condicionan de forma decisiva la respuesta ante este riesgo. Comunidades autónomas como Galicia, Cantabria o el País Vasco ya han desarrollado planes específicos de adaptación (p. ej., Estrategia KLIMA 2050), pero su aplicación es desigual y aún incipiente en muchas regiones litorales. La falta de planificación estratégica, de regulación urbanística adaptativa y de coordinación institucional representa un factor adicional que amplifica la vulnerabilidad. La dispersión competencial entre administraciones, la presión urbanística sobre el litoral y la escasa aplicación de medidas preventivas han limitado históricamente la integración efectiva de la adaptación en la gestión del riesgo costero (Losada *et al.*, 2019).

La pérdida permanente de superficie emergida en zonas costeras, resultado del ascenso del nivel medio del mar relativo y de los procesos de inundación crónica y erosión costera, genera una serie de **impactos biofísicos y socioeconómicos** de gran alcance. Entre los impactos biofísicos, destaca la pérdida directa de superficie terrestre costera por anegación, con una reducción irreversible del espacio físico disponible para usos humanos y ecológicos (Oppenheimer *et al.*, 2019). Por ejemplo, la **Figura 4** muestra el alcance de los terrenos que se inundarían de forma permanente debido al aumento del nivel medio del mar relativo para diferentes escenarios de emisiones en la playa del Matorral, en la isla de Fuerteventura (Canarias). Este proceso conlleva la degradación o desaparición de hábitats naturales, como marismas, humedales, playas y dunas, comprometiendo servicios ecosistémicos esenciales como la protección costera, la regulación hídrica o la provisión de hábitats para especies marinas clave (Barbier *et al.*, 2011; Mehvar *et al.*, 2018). En el ámbito socioeconómico, se produce la afectación o desplazamiento forzado de poblaciones costeras, con implicaciones en sus medios de vida, el acceso a servicios básicos y la cohesión social (Glavovic *et al.*, 2022). El capital construido, incluyendo edificaciones, instalaciones turísticas e industriales, puede quedar anegado o requerir relocalización, con elevados costes económicos y logísticos. La actividad económica basada en el litoral, como el turismo o la agricultura, se ve alterada o desplazada cuando desaparecen los recursos físicos que la sostienen. La pérdida o inutilización de infraestructuras críticas, como carreteras, redes ferroviarias, depuradoras o instalaciones energéticas, puede generar interrupciones prolongadas en servicios básicos y agravar el impacto global (Barrios-Crespo *et al.*, 2023; Nirandjan *et al.*, 2024).

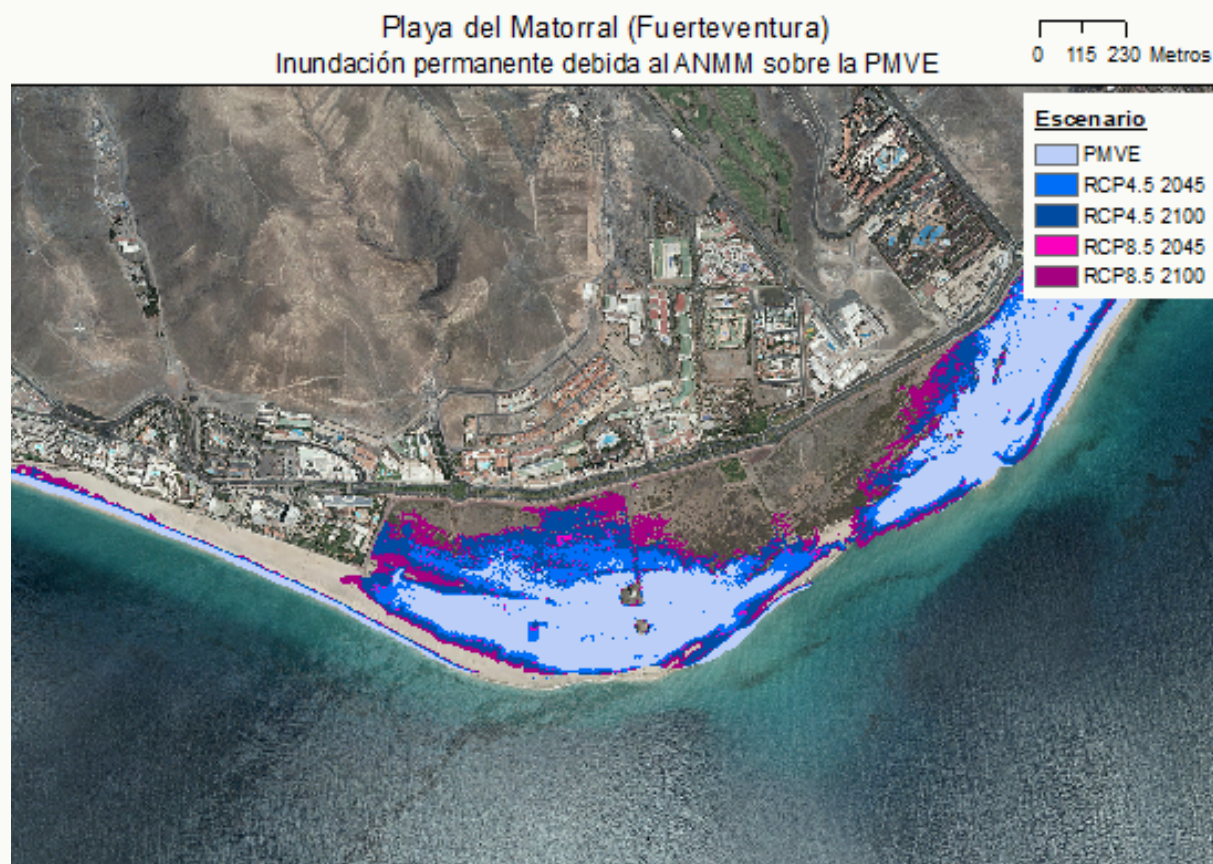


Figura 4. Ejemplo de mapas de inundación permanente en la playa del Matorral (Fuerteventura, Canarias). Cambios en la extensión de la inundación para diferentes escenarios y horizontes temporales. Fuente: PIMA Adapta-Canarias (GRAFCAN, 2022).

Los resultados del programa PIMA Adapta-Costas evidencian la magnitud del riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en el litoral español frente al ascenso del nivel medio del mar. En el horizonte 2050, se estima que la población afectada por procesos de inundación permanente podría variar entre valores bajos en territorios insulares, como Baleares (682–739 personas) (SOCIB, 2021) y Canarias (619–788 personas) (GRAFCAN, 2022), valores medios en Cataluña (27.000–44.000 personas) (ICG, 2021) y valores altos en Andalucía (304.500–325.500 personas) (visor PIMA Adapta-Andalucía). Para 2100, estas cifras aumentan significativamente en todos los escenarios, alcanzando hasta 381.500 personas afectadas en Andalucía y más de 66.000 en Cataluña bajo condiciones de alta emisión. En cuanto a las consecuencias económicas, se prevén pérdidas sustanciales en capital físico y actividad productiva. Por ejemplo, en el Principado de Asturias, un ascenso de 1 metro del nivel del mar comprometería activos residenciales e industriales valorados en 103 millones de euros y provocaría pérdidas anuales superiores a 7 millones en valor añadido agrícola, industrial y ecosistémico. A escala nacional, bajo el escenario RCP8.5 para 2100, las pérdidas podrían superar los 4.600 millones de euros en las Islas Canarias, los 1.000 millones en Andalucía y afectar el PIB de Cataluña en más de 1.600 millones. Además, se han identificado infraestructuras críticas expuestas como redes de transporte (p. ej., en el



Principado de Asturias, Cataluña, Comunidad Valenciana, Andalucía o Baleares), centrales energéticas (p. ej., en la Comunidad Valenciana) o centros educativos (p. ej., Baleares) (IHCantabria, 2017; ICGC, 2021; visor PIMA Adapta-Valencia; visor PIMA Adapta-Andalucía; SOCIB, 2021). Estas afecciones se concentran especialmente en zonas bajas como llanuras deltaicas (por ejemplo, el del Ebro), marismas, áreas urbanas costeras o sistemas litorales particularmente sensibles, como el Mar Menor o el entorno de Doñana (IHCantabria, 2021b).

Los impactos asociados a la pérdida permanente de superficie emergida en zonas costeras no solo afectan directamente al territorio costero y sus ocupantes, sino que generan **riesgos en cascada** que repercuten en múltiples sectores y sistemas interdependientes. En el ámbito de la paz, seguridad y cohesión social, la destrucción de medios de vida tradicionales y la inhabitabilidad progresiva de determinadas áreas pueden desencadenar conflicto por el uso del suelo, tensiones sociales y movimientos migratorios forzados desde zonas costeras hacia áreas interiores, con implicaciones en la planificación territorial, la gobernanza y los derechos humanos (Adger *et al.*, 2022). En el sector salud, los daños a infraestructuras sanitarias, la pérdida de acceso a agua potable por intrusión salina y el aumento de enfermedades infecciosas asociadas a condiciones de insalubridad o proliferación de vectores en zonas anegadas pueden comprometer tanto la salud física como mental de las poblaciones afectadas (Cissé *et al.*, 2022). La pérdida de patrimonio cultural, tanto material (como yacimientos arqueológicos, edificaciones históricas o paisajes culturales costeros) como inmaterial (identidades ligadas al territorio y a las prácticas tradicionales), constituye otro efecto irreversible que afecta a la memoria colectiva y la diversidad cultural. Los efectos también alcanzan sectores clave como el energético, industrial y de servicios, donde la inundación de infraestructuras críticas, alteraciones en los ciclos de suministro o interrupciones en la producción pueden generar disrupciones económicas sustanciales (Lawrence *et al.*, 2020). El turismo, particularmente el de sol y playa, se ve afectado por la degradación o desaparición de recursos costeros como playas y humedales, reduciendo su atractivo y viabilidad económica (Toimil *et al.*, 2018; Hernández *et al.*, 2023). Asimismo, la agricultura y la ganadería enfrentan la pérdida de suelos productivos en zonas bajas por inundación, con impactos sobre cultivos estratégicos y áreas de pasto costeras. En los sectores de urbanismo y transporte, la destrucción de redes viarias, accesos y áreas urbanizadas obliga a repensar los esquemas de movilidad y el suministro de servicios básicos, y compromete la continuidad de las cadenas logísticas. Finalmente, la pérdida de superficie emergida afecta al patrimonio natural, provocando la degradación de hábitats, la disminución de biodiversidad y la pérdida de servicios ecosistémicos como la regulación climática, la protección frente a tormentas y la provisión de recursos naturales.



Ficha 1. Análisis del riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5°C)	Medio plazo 2041-2060 (2°C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4°C)
Severidad del impacto	Limitada	Sustancial	Crítica	Catastrófica
	La pérdida permanente se concentra en playas, dunas, marismas y deltas con cota baja, pero el alcance aún es localizado y no genera desplazamientos masivos. Los daños económicos agregados son reducidos (orden <0,01 % del PIB nacional), aunque existen focos sensibles (p. ej., Mar Menor, Doñana, deltas).	Con la extensión potencial afectable y la exposición creciente de infraestructuras y usos urbanos, el riesgo deja de ser estrictamente local y pasa a abarcar decenas-cientos de kilómetros de costa. Sin llegar aún a los valores de 2050, ya aparecen miles a decenas de miles de personas potencialmente afectadas en tramos de baja cota y daños económicos agregados que, al sumar varios focos regionales, son coherentes con el rango 0,01-0,1 % del PIB nacional.	Para 2050 se estiman centenares de miles de personas afectadas por inundación permanente (304-326 mil en Andalucía; 27-44 mil en Cataluña), junto con exposición de redes y servicios esenciales. Las pérdidas económicas superan el umbral del 0,1 % del PIB nacional (≥ 1.500 M€) cuando se agregan impactos regionales (p. ej., >1.600 M€ en Cataluña, >1.000 M€ en Andalucía).	Bajo escenarios de emisiones altas, se proyectan cientos de miles de personas desplazadas de forma permanente (hasta ~382 mil en Andalucía y >66 mil en Cataluña), pérdidas económicas nacionales que plausiblemente superan el 1 % del PIB (≥ 15.000 M€) al sumar varios focos regionales (p. ej., 4.600 M€ solo en Canarias, >1.600 M€ en Cataluña, >1.000 M€ en Andalucía, más otras CCAA), y cambios irreversibles en deltas y marismas. El alcance territorial abarca cientos de kilómetros de costa y decenas de miles de hectáreas.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5 °C)	Medio plazo 2041-2060 (2 °C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4 °C)
Nivel de confianza:	Alto ◆◆◆	Alto ◆◆◆	Medio ◆◆	Bajo ◆
· Calidad de las evidencias · Consenso científico	· Alta · Alto	· Alta · Alto	· Media · Alto	· Baja · Medio
	Datos observacionales directos y alta resolución espacial. Coincidencia alta entre series históricas, estudios regionales y nacionales.	Estudios nacionales (PIMA Adapta-Costas) con rangos de población y superficie detallados. Alta coherencia en tendencias de aumento del nivel medio del mar y escenarios de exposición.	Proyecciones de aumento del nivel medio del mar relativo con mayor incertidumbre. Incertidumbre también en la respuesta de los ecosistemas. Consenso científico alto sobre tendencia general.	Incertidumbre alta en el aumento del nivel medio del mar relativo debido al deshielo de Groenlandia y la Antártida, a la tasa de subsidencia y a la capacidad de migración de ecosistemas. Escenarios socioeconómicos variables. El acuerdo científico es alto respecto a la señal positiva del cambio (ascenso del nivel medio del mar), mientras que la magnitud del incremento presenta mayor incertidumbre.
Peligros		Exposición		Vulnerabilidad
Componentes del riesgo	Aumento del nivel medio del mar relativo, compuesto por el aumento del nivel medio del mar local y la subsidencia del terreno. Esto da lugar a la inundación costera permanente y al retranqueo de la línea de costa.	Población, capital construido, actividad económica, infraestructuras críticas y servicios ecosistémicos.		Tasa de aumento del nivel medio del mar local, nivel de subsidencia, nivel de implementación de medidas de adaptación, tipo de costa, pendiente del frente costero y umbral de supervivencia de ecosistemas.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Aspectos transversales	
Transfronterizos	El riesgo de pérdida de superficie emergida en España es eminentemente interno, pero puede tener implicaciones indirectas transfronterizas: presión migratoria hacia otras regiones costeras o interiores de países vecinos (p. ej., desplazamientos intraeuropeos desde zonas vulnerables del litoral español) y posibles disputas por recursos pesqueros, acceso a tierras emergidas o reasentamientos.
Territoriales	Desplazamiento de la población desde áreas costeras bajas (deltas, marismas, sistemas de dunas) hacia el interior, con efectos sobre la planificación urbanística, la distribución de infraestructuras, la necesidad de suelo y la gobernanza multinivel. Riesgos de conflictos por el uso del suelo y cambios en la cohesión territorial.
Sociales	Riesgo de pérdida de medios de vida (p. ej., agricultura, pesca, turismo), inseguridad de tenencia de la tierra y migración forzosa. Impactos sobre la paz, la seguridad y la cohesión social (conflictos locales por reasentamiento y uso de recursos). Efectos sobre salud física y mental debido a la pérdida de vivienda, infraestructuras básicas y servicios esenciales.
Maladaptación	Posibilidad de respuestas de adaptación inadecuadas que agraven la erosión (p. ej., espigones que interrumpen dinámicas sedimentarias). Rellenos o protecciones rígidas pueden trasladar el riesgo a zonas adyacentes. Medidas de protección costosa pueden reforzar desigualdades socioeconómicas si solo protegen áreas de alto valor económico.
Género	La pérdida de superficie emergida puede tener efectos diferenciados: las mujeres, en comunidades costeras con altos niveles de dependencia de recursos locales (pesca artesanal, agricultura de subsistencia), pueden enfrentar mayor vulnerabilidad por menor acceso a recursos financieros y tierra segura. Además, la migración forzada y la ruptura de redes de cuidado comunitario afectan de forma desigual a mujeres y niñas.
Otros aspectos analizados	
Umbrales críticos	El umbral viene establecido por la relación entre la cota del nivel del mar y la del terreno local o la de los sistemas de protección existentes. En playas, el umbral dependerá de la playa seca disponible, del tipo de arena y de si existe o no algún elemento rígido en el trasdós de la playa. Los umbrales incluyen el alcance irreversible de la línea de costa (anegación permanente) y pérdida de hábitats costeros clave una vez superados niveles de subida del mar o erosión sin capacidad de regeneración.
Lock-in/Bloqueo	Infraestructuras fijas (paseos marítimos, urbanizaciones costeras) que limitan la migración natural de sistemas costeros y perpetúan la exposición al riesgo.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Planes o medidas en curso de gestión del riesgo	<ul style="list-style-type: none"> Existe una Estrategia Española de Adaptación de la Costa (MITECO, 2017) y planes de adaptación para zonas geográficas específicas (p. ej., Galicia, Cantabria, País Vasco, Cataluña y Murcia) o ciudades (p. ej., planes urbanísticos en la Comunidad Valenciana). Asimismo, el Plan Estratégico Nacional para la Protección de la Costa considerando los efectos del Cambio Climático (MITECO, 2022b) y las Estrategias para la Protección de la Costa por tramos prioritarios articulan medidas específicas (p. ej., Huelva, Maresme, sur de Castellón y Valencia, Granada, Cádiz-Málaga-Almería, Islas Baleares). Además, los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI) de las demarcaciones hidrográficas constituyen el marco operativo para la gestión del riesgo de inundación. Existe un amplio margen para fortalecer la implementación de medidas de adaptación. Otras herramientas de aplicación son la regulación del DPMT; la restauración de dunas y humedales; la revisión de ordenación del territorio.
Gobernanza de gestión del riesgo	<p>La gestión del riesgo costero se desarrolla en un marco normativo complejo, con coexistencia de instrumentos de planificación hidrológica, costera y urbanística, lo que plantea desafíos de coherencia e integración. La distribución de competencias entre distintos niveles de gobierno (Estado, comunidades autónomas y ayuntamientos) requiere mecanismos de coordinación interinstitucional.</p> <p>Aunque existen espacios de colaboración, se identifican oportunidades para mejorar la implicación del sector privado y fortalecer la participación ciudadana, especialmente en medidas transformadoras como la retirada planificada.</p> <p>La disponibilidad de financiación estable y de largo plazo, así como la integración efectiva del riesgo costero en la planificación territorial, son factores clave para avanzar hacia una gestión más resiliente.</p> <p>La evaluación continua y el ajuste adaptativo de las medidas implementadas siguen siendo áreas con margen de desarrollo.</p>
Beneficios de medidas de adaptación futuras	<p>Protección costera sostenible. Mejora de infraestructuras verdes (p. ej., restauración de dunas, humedales y marismas) y soluciones basadas en la naturaleza que generen sinergias con la biodiversidad y contribuyan a la conservación de hábitats costeros valiosos (Red Natura 2000).</p> <p>Reducción de daños económicos. Minimización de pérdidas de suelo urbano, agrícola o turístico mediante planes de relocalización planificada o medidas de protección híbridas.</p> <p>Incremento de la resiliencia socioeconómica. Protección de comunidades costeras vulnerables, mantenimiento de playas y espacios de uso público, apoyo a la continuidad de actividades económicas clave (p. ej., turismo, pesca, agricultura).</p>
Afección a/de descarbonización o neutralidad climática	<p>Impacto de infraestructuras duras. Algunas medidas como diques o espigones pueden tener una huella de carbono significativa durante su construcción y mantenimiento.</p> <p>Soluciones basadas en la naturaleza. La restauración de humedales y marismas costeras contribuye a la captura de carbono azul, generando co-beneficios climáticos.</p> <p>Reubicación planificada. Esta medida puede evitar inversiones repetidas en reconstrucción y reducir emisiones asociadas a obras de emergencia tras daños por pérdida de suelo.</p> <p>Planes urbanísticos alineados. Permiten integrar la adaptación costera en la planificación territorial minimiza la urbanización de zonas de riesgo y limita emisiones indirectas.</p>

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Déficits de información	<p>Cartografía detallada. Falta de información actualizada y de alta resolución sobre la topobatimetría costera y tasas locales de subsidencia o elevación del terreno.</p> <p>Proyecciones a escala local. Necesidad de escenarios de aumento del nivel del mar regionalizados.</p> <p>Valoración de servicios ecosistémicos. Escasa cuantificación de los beneficios económicos de los hábitats costeros como protección natural y sumideros de carbono.</p> <p>Indicadores de vulnerabilidad social. Carencia de datos socioeconómicos suficientemente desagregados para evaluar la exposición y capacidad de adaptación de comunidades costeras.</p> <p>Monitoreo continuo. Insuficiencia de redes de observación para validar modelos de erosión costera y pérdida de superficie emergida en escalas temporales largas.</p>
Recomendaciones de priorización	<p>Requiere planificación y preparación de respuestas en un horizonte temporal cercano. Requiere un seguimiento periódico. Se puede abordar principalmente dentro de un único ámbito de la gestión pública.</p>



4.2. RC6.2. Riesgos de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.

El riesgo de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debida al aumento de la intensidad y frecuencia de eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos aborda la posibilidad de que episodios meteorológicos severos generen impactos negativos sustanciales en zonas costeras (Collins *et al.*, 2019). Este riesgo se manifiesta especialmente en tramos urbanizados o densamente ocupados del litoral, donde la exposición de población, de infraestructuras y de servicios es alta, y donde los sistemas de protección actuales pueden resultar insuficientes ante eventos más intensos o recurrentes (Ranasinghe *et al.*, 2021). La coincidencia de estos episodios meteorológicos extremos con niveles altos de pleamar puede amplificar significativamente la magnitud de la inundación y aumentar los daños socioeconómicos (Toimil *et al.*, 2017b). Las consecuencias incluyen daños estructurales en edificaciones e infraestructuras críticas, interrupción de servicios esenciales, afectación de ecosistemas y pérdida de actividad económica vinculada al turismo, al comercio o a la producción agrícola en zonas bajas (Rosenzweig *et al.*, 2022). Además, estos eventos pueden generar efectos en cascada sobre sectores como el patrimonio natural, el urbanismo, la energía, la industria, los servicios, la agricultura y la ganadería, entre otros (Lawrence *et al.*, 2020).

El peligro es especialmente relevante en tramos de baja cota respecto al nivel medio del mar, donde existen ecosistemas vulnerables como playas, estuarios, humedales, marismas y deltas, así como en zonas sin defensas costeras o con estructuras deterioradas o diseñadas bajo estándares que ya no se ajustan a las nuevas condiciones extremas (p. ej., Ballesteros *et al.*, 2018; Agulles *et al.*, 2021; Luque *et al.*, 2021; Sánchez-Artús *et al.*, 2023). Los eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento ya están dando lugar a inundaciones costeras más frecuentes en países situados en el suroeste de Europa (C3S, 2022), y se prevé que aquellos que históricamente ocurrían una vez por siglo lleguen a producirse al menos una vez al año en numerosas regiones en 2050, independientemente del escenario de emisiones considerado (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Estos impactos afectarán tanto a tramos urbanizados como a espacios naturales de alto valor ecológico, especialmente en aquellas regiones donde no se han actualizado las medidas de protección o donde el espacio para la adaptación física del litoral es limitado (Chust *et al.*, 2010).

La **Figura 5** representa la cadena de impactos asociada a este riesgo clave, articulada en torno al peligro, exposición y vulnerabilidad.

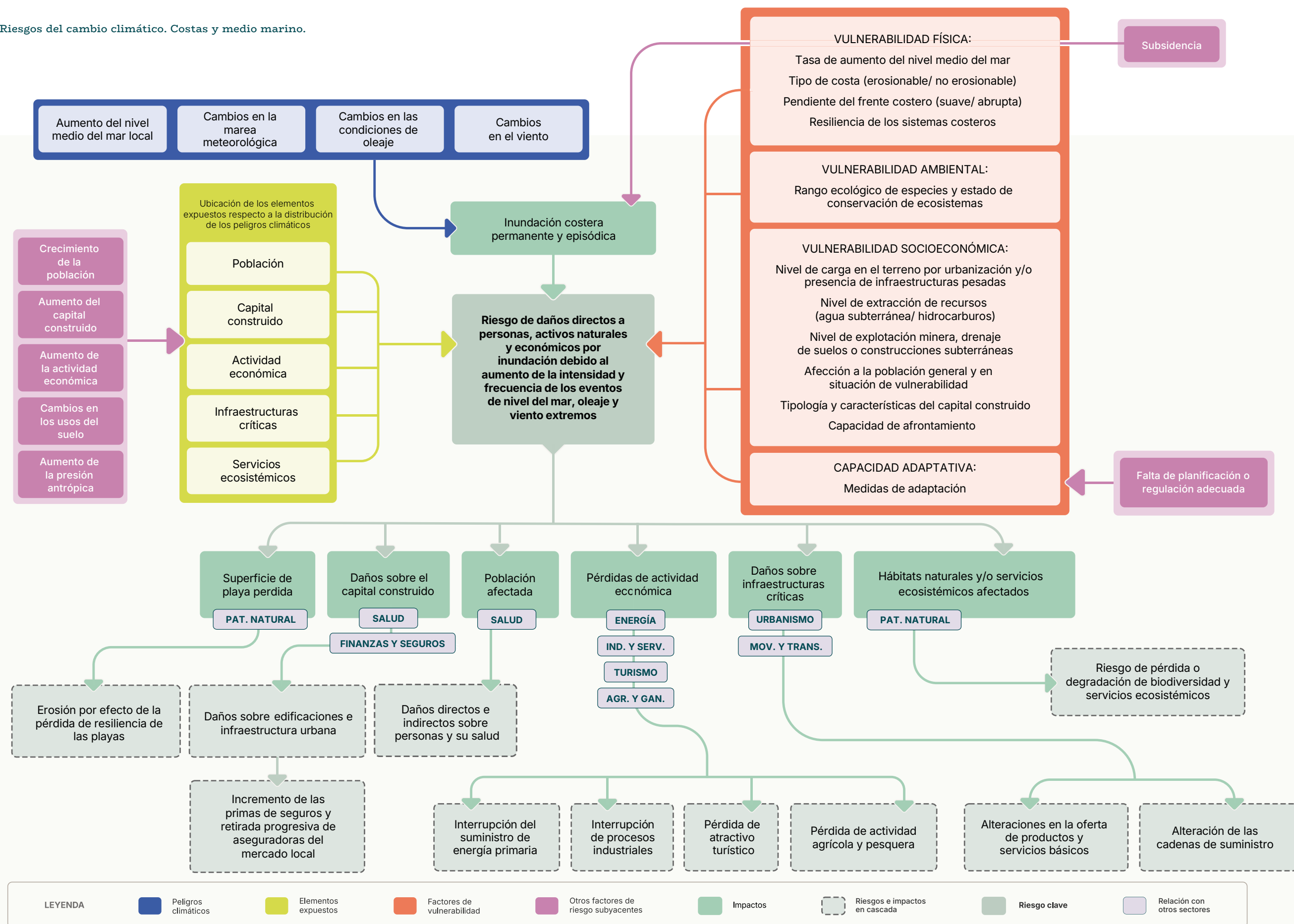


Figura 5. Cadena de impactos para el riesgo de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.



El riesgo de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido a eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos está vinculado a la combinación de múltiples **peligros**, tanto climáticas como no climáticas. Entre los peligros de origen climático se encuentra el aumento del nivel medio del mar local, impulsado por la expansión térmica del océano, la pérdida de masa de glaciares y capas de hielo, y los cambios en el almacenamiento de agua terrestre (Fox-Kemper *et al.*, 2021). A ello se suman los cambios proyectados en la marea meteorológica, asociados a patrones regionales de presión atmosférica y viento, y en el régimen de oleaje, cuya energía y dirección pueden variar según el forzamiento climático (IPCC, 2022). La marea astronómica, aunque no es un peligro en sí mismo, puede actuar como factor agravante cuando la pleamar coincide con estos eventos extremos, amplificando sustancialmente la altura del nivel del mar alcanzado en costa (Toimil *et al.*, 2017b). Por otro lado, la subsidencia, proceso no climático, contribuye a incrementar el nivel relativo del mar en zonas costeras bajas por hundimiento del terreno, ya sea por compactación natural de sedimentos o por actividades humanas como la extracción de aguas subterráneas o hidrocarburos (Nicholls *et al.*, 2021). La interacción entre estos peligros da lugar a una doble manifestación del riesgo: por un lado, la inundación costera permanente y el correspondiente retranqueo de la línea de costa media debido al aumento del nivel medio del mar, y por otro, la inundación episódica sobre ese nuevo nivel base, vinculada a eventos extremos (Ranasinghe, 2016). Esta superposición de procesos incrementa la extensión del área afectada, reduce los márgenes de protección disponibles y compromete la planificación costera, los ecosistemas y la seguridad de la población expuesta.

La **exposición** en relación con el riesgo de inundación costera asociada a eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento está condicionada por presencia y concentración de población, capital construido, actividad económica, infraestructuras críticas y servicios ecosistémicos en áreas litorales bajas susceptibles de verse afectadas durante estos episodios (Glavovic *et al.*, 2022; Rosenzweig *et al.*, 2022). A diferencia de la inundación de carácter permanente, este riesgo se manifiesta puntualmente durante eventos meteorológicos extremos que elevan transitoriamente el nivel del mar, y tras los cuales el agua del mar regresa a sus condiciones medias. Durante estos eventos, se producen daños emergentes sobre edificaciones e infraestructuras (que requieren reparación, sustitución o reconstrucción parcial), así como pérdidas de actividad económica derivadas de la interrupción de servicios o de la inoperatividad temporal de las instalaciones, lo que se traduce en una pérdida de ingresos durante el periodo de inactividad, también denominada lucro cesante (Toimil *et al.*, 2017b). Las zonas urbanas densamente ocupadas concentran elementos expuestos de gran valor económico y funcional. La población puede sufrir daños personales, evacuaciones o restricciones de acceso e incluso afrontar pérdidas de vidas humanas; el capital construido, que incluye edificios de viviendas, comercios e instalaciones industriales, está sujeto a inundaciones exteriores e interiores, colapsos estructurales o deterioro acelerado; la actividad económica, en particular el turismo, el comercio o la agricultura intensiva, se puede ver afectada



por interrupciones o pérdidas de productividad; las infraestructuras críticas, como redes viarias, sistemas de abastecimiento y saneamiento de agua, transporte público o distribución eléctrica, pueden quedar inoperativas parcial o totalmente, ocasionando impactos regionales; y los servicios ecosistémicos, como la protección costera, la calidad del agua o la biodiversidad, pueden deteriorarse por sobrecarga física, intrusión salina o contaminación difusa.

A esta situación se suma la ocupación del DPMT mediante concesiones residenciales en áreas altamente expuestas a temporales marítimos, especialmente en algunos tramos del litoral mediterráneo y atlántico andaluz. La presencia de viviendas sobre el DPMT no solo incrementa la exposición y el riesgo, sino que también dificulta la gestión adaptativa del espacio litoral. Según Ros (2025), habría 86 426 edificaciones situadas dentro del DPMT en toda España, de las cuales más de la mitad (53,4 %) serían viviendas residenciales. La superficie total ocupada ascendería a 66,94 km², destacando que Andalucía tendría unos 18,58 km² y Galicia alrededor de 15,04 km², mientras que Murcia alcanzaría 1,88 km². Por usos del suelo, alrededor del 17,45 % de las construcciones se destinarían a servicios públicos, el 12 % serviría para usos industriales y el 10 % tendría fines comerciales⁷. En Andalucía, el portal de la Junta de Andalucía (2025) permite consultar las resoluciones de concesión y contabiliza 1.025 concesiones vigentes en 2025, dato que subraya la magnitud de la ocupación en esa comunidad.

En las comunidades autónomas del norte de España (Galicia, Principado de Asturias, Cantabria, País Vasco), los temporales atlánticos de invierno, caracterizados por fuerte oleaje y viento, pueden coincidir con pleamares astronómicas, lo que intensifica el nivel del mar alcanzado por forzamientos atmosféricos (IHCantabria, 2017, 2021a; IHOBE, 2022). Esta concurrencia de factores se manifestó de forma severa durante el invierno de 2013-2014, cuando una sucesión de temporales extremos provocó inundaciones generalizadas y daños valorados en más de 70 millones de euros a lo largo de la fachada cantábrica. En el litoral mediterráneo, aunque el oleaje tiende a ser de menor magnitud que en la fachada atlántica, la escasa pendiente de la costa —con variabilidad intrarregional, desde sectores llanos y de plataforma continental amplia (p. ej., delta del Ebro y costa valenciana) hasta tramos más abruptos y de plataforma estrecha (p. ej., costa almeriense)—, la urbanización intensiva, la limitada capacidad de los sistemas de drenaje urbano y la amplia plataforma continental favorecen episodios de inundación intensa durante tormentas locales o eventos de marea meteorológica combinados con viento persistente (Ballesteros *et al.*, 2018). Este patrón quedó patente durante el temporal Gloria (enero de 2020), que batió récords de oleaje y generó inundaciones y erosión generalizadas en el arco mediterráneo, con impactos

⁷ Para elaborar estas cifras, Newtral Data descargó el conjunto de 12,46 millones de edificios del Catastro y cruzó su posición con las líneas del dominio público marítimoterrestre del MITECO (2025), considerando en riesgo toda edificación que interseca la línea o se sitúa entre ella y el mar; el País Vasco quedó excluido por no estar integrado en el catastro.



severos en la Comunidad Valenciana, Baleares y el delta del Ebro (Amores *et al.*, 2020; De Alfonso *et al.*, 2021; Cabezas-Rabadán *et al.*, 2024). Adicionalmente, factores como el crecimiento poblacional en zonas costeras, el aumento del capital construido en áreas expuestas, la expansión de actividades económicas vulnerables, los cambios en los usos del suelo (especialmente hacia urbanización) y la presión antrópica sobre espacios naturales incrementan progresivamente la exposición, reduciendo los márgenes operativos de respuesta y aumentando el coste potencial de cada evento (Rosenzweig *et al.*, 2022; IPCC, 2022).

La **vulnerabilidad** en relación con el riesgo de inundación costera inducida por eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento está determinada por la interacción de factores físicos, socioeconómicos, ambientales y de capacidad adaptativa. Desde el punto de vista físico, la tasa de aumento del nivel medio del mar local es un condicionante clave: cuanto mayor sea su tasa, menor será el tiempo disponible entre eventos extremos para que los sistemas costeros se recuperen, lo que incrementa progresivamente la exposición acumulada al impacto. Asimismo, el tipo de costa y su morfología influyen decisivamente en la intensidad de los daños. Las costas de baja pendiente y sustrato erosionable, como playas, marismas o deltas, son más susceptibles a la penetración del agua durante episodios extremos, y presentan una baja capacidad para disipar la energía del oleaje. En regiones como el delta del Ebro o el cordón litoral de La Manga del Mar Menor, la limitada capacidad de recuperación natural de los sistemas sedimentarios frente a temporales intensos agrava la pérdida de superficie y la magnitud de los impactos posteriores (Sánchez-Arcilla *et al.*, 1998).

En el plano socioeconómico, inciden los umbrales de afectación a la población (es decir, la profundidad o duración de la inundación a partir de la cual se producen impactos directos sobre las personas), así como por la presencia de colectivos especialmente sensibles, como menores, personas mayores o con movilidad reducida, cuya capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia es limitada (Rosenzweig *et al.*, 2022), así como personas recién llegadas sin conocimiento local del territorio o que no dominan el idioma, lo que puede dificultar la comprensión de las alertas y la evacuación en condiciones seguras. Asimismo, las características del capital construido, incluyendo su uso, antigüedad y el cumplimiento de normativas de edificación, influyen de forma decisiva en la magnitud del daño y en la velocidad de recuperación tras un evento meteorológico extremo (Martínez-Gomariz *et al.*, 2019). Esta vulnerabilidad se ve reforzada cuando las infraestructuras no están diseñadas para resistir condiciones climáticas futuras o cuando la actividad económica depende de instalaciones costeras críticas (Sierra *et al.*, 2016). La actividad económica también presenta variabilidad en su respuesta, dependiendo de factores como la diversificación sectorial, acceso a seguros o liquidez financiera (Filatova *et al.*, 2011). Adicionalmente, la vulnerabilidad se agrava por procesos de subsidencia, vinculados a la carga del terreno por construcciones pesadas, extracción de agua subterránea o hidrocarburos, actividad minera, drenaje de humedales o estructuras subterráneas; fenómenos que aceleran el hundimiento y elevan el nivel relativo del mar (Nicholls *et al.*, 2021).



En lo que respecta a la vulnerabilidad ambiental, los ecosistemas litorales presentan umbrales fisiológicos y funcionales que pueden ser superados durante eventos extremos. La repetición de episodios intensos, con mayores niveles del mar y menor tiempo de recuperación entre ellos, puede causar pérdida de hábitat, mortalidad de especies y degradación de funciones ecológicas clave, como la protección natural frente a inundaciones o la captura de carbono. Los hábitats de zonas intermareales, como marismas o praderas de fanerógamas marinas, son especialmente sensibles a estos desequilibrios, al verse sometidos a mayores columnas de agua, reducción de la luz disponible y estrés mecánico por el oleaje (Möller *et al.*, 2014). Estudios recientes demuestran que las praderas de fanerógamas marinas, como Posidonia o Zostera, sufren mortalidad y pérdida de cobertura tras tormentas intensas y olas elevadas, debido a la erosión y falta de suficiente luz para sostener funciones primarias (Oprandi *et al.*, 2020). Además, las marismas presentan una tasa de secuestro de carbono sensible a la erosión física y a la pérdida progresiva de elevación relativa, lo que reduce su resiliencia y potencial de mitigación climática (Schuerch *et al.*, 2018; Kroeger *et al.*, 2017).

Finalmente, la capacidad adaptativa condiciona de forma decisiva la vulnerabilidad de un territorio (Ferro-Azcona *et al.*, 2019; Whitney *et al.*, 2017). La falta de implementación efectiva de medidas de adaptación, como sistemas de drenaje sostenible, restauración de playas y dunas, barreras temporales o el diseño de infraestructuras resilientes al clima, incrementa la susceptibilidad de los sistemas costeros frente a la inundación por eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento. En gran parte de la costa española la planificación urbanística aún no incorpora adecuadamente los escenarios climáticos extremos ni regula la ocupación del DPMT conforme a los riesgos futuros, lo que puede favorecer desarrollos significativamente vulnerables y compromete la eficacia de las intervenciones de adaptación (MITECO, 2017; Losada *et al.*, 2019).

El riesgo de daños directos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento conlleva una serie de **impactos biofísicos y socioeconómicos** de carácter episódico. Entre los impactos físicos destaca la pérdida temporal de superficie de playa durante los eventos extremos, que, si bien puede recuperarse parcialmente en condiciones de calma, afecta a su funcionalidad protectora y recreativa (Toimil *et al.*, 2018; Toimil *et al.*, 2023). En cuanto a la población, los eventos extremos de inundación pueden generar la pérdida de vidas humanas, daños materiales en viviendas, aislamiento temporal, evacuaciones y interrupciones en la vida cotidiana, especialmente en zonas urbanas costeras densamente pobladas (Elmer *et al.*, 2012; Ebi *et al.*, 2021). Los daños sobre el capital construido se manifiestan en forma de desperfectos en edificios y estructuras residenciales, comerciales, industriales o relacionadas con el sector servicios que requieren reparación o sustitución, con un coste directo asociado. Al mismo tiempo, la interrupción de actividades económicas durante y después del evento conlleva afectaciones notables en sectores como el turismo, el comercio o la pesca, que dependen de la continuidad operativa (Ranasinghe *et al.*, 2021). Las infraestructuras



críticas, como redes de transporte, suministro eléctrico, centros de salud o educación, pueden sufrir daños estructurales y funcionales, lo que conlleva impactos sistémicos: por ejemplo, la interrupción del transporte puede impedir el acceso a servicios de emergencia o afectar las cadenas de suministro (Nirandjan *et al.*, 2024). Los hábitats naturales y los servicios ecosistémicos que prestan, como la disipación del oleaje, la depuración del agua o la provisión de hábitats para especies marina, pueden deteriorarse por la acción del oleaje o el incremento de la salinidad y turbidez (Cooley *et al.*, 2022). Ecosistemas intermareales como las marismas o las praderas de fanerógamas marinas son especialmente vulnerables a este tipo de impactos episódicos, cuya recurrencia puede comprometer su recuperación ecológica (Mandiola *et al.*, 2025).

Los resultados del proyecto PESETA IV y del programa PIMA Adapta-Costas (MAPAMA, 2020b) ponen de manifiesto la magnitud del riesgo de inundación costera por eventos extremos de nivel del mar y oleaje en España, tanto en términos de población afectada como de impactos económicos y funcionales. Según el proyecto PESETA IV, el número de personas expuestas anualmente a inundaciones costeras podría aumentar de 8.100 en 2015 (base) a entre 54.000 y 68.800 en 2050, y hasta 141.200 (RCP4.5) o 179.500 (RCP8.5) en 2100, en ausencia de medidas de adaptación (Feyen *et al.*, 2020). Los datos desagregados del programa PIMA Adapta-Costas reflejan una distribución territorial del riesgo: para un evento de periodo de retorno de 100 años en 2050, se estima la exposición de más de 15.000 personas en el País Vasco (IHOBE, 2022) y en las Islas Canarias (GRAFCAN, 2022), 5.800 en el Principado de Asturias (IHCantabria, 2017), y entre 1.200 y 2.700 personas en Cantabria (IHCantabria, 2021a), la Comunidad Valenciana (visor PIMA-Adapta-Valencia), las Islas Baleares (SOCIB, 2021) y la región de Murcia (IHCantabria, 2021b). Estas cifras aumentan considerablemente hacia 2100, especialmente bajo el escenario RCP8.5, con estimaciones de hasta 53.800 personas afectadas en Canarias, 40.000 en el País Vasco y más de 13.000 en Baleares.

En términos económicos, los daños anuales estimados por inundación costera en España podrían escalar de 30 millones de euros en el año base hasta 600–800 millones en 2050 y entre 5.300 y 9.900 millones de euros en 2100, dependiendo del escenario de emisiones y la implementación de medidas de adaptación (Feyen *et al.*, 2020). A escala autonómica, destacan los potenciales daños en 2050 de hasta 920 millones de euros en Canarias, más de 2.000 millones en el País Vasco, y decenas de millones en regiones como el Principado de Asturias, Murcia y Cantabria. Hacia 2100, los impactos económicos proyectados alcanzan los 5.000 millones de euros en Canarias, 1.600 millones en el País Vasco y más de 600 millones en Asturias. A ello se suman afectaciones relevantes en infraestructuras críticas, como aeropuertos (Cataluña, la Comunidad Valenciana y el País Vasco), redes de transporte (Andalucía, el Principado de Asturias, Cantabria, Cataluña, la Comunidad Valenciana, las Islas Baleares y las Islas Canarias), instalaciones energéticas, centros educativos y sanitarios. Las zonas bajas, como deltas, marismas y áreas urbanas costeras (p. ej., Valencia, Mar Menor), concentran una parte significativa del riesgo, en un contexto de degradación ecológica preocupante: más del 60 % de las zonas húmedas



originales en España han desaparecido y el 76 % de los hábitats de interés comunitario ligados a estos ecosistemas presentan un estado de conservación desfavorable (MITECO, 2023). La **Figura 6** muestra el nivel de riesgo sectorial agregado para diferentes horizontes temporales y escenarios que combinan eventos extremos futuros y el aumento del nivel medio del mar (IHCantabria, 2021b).

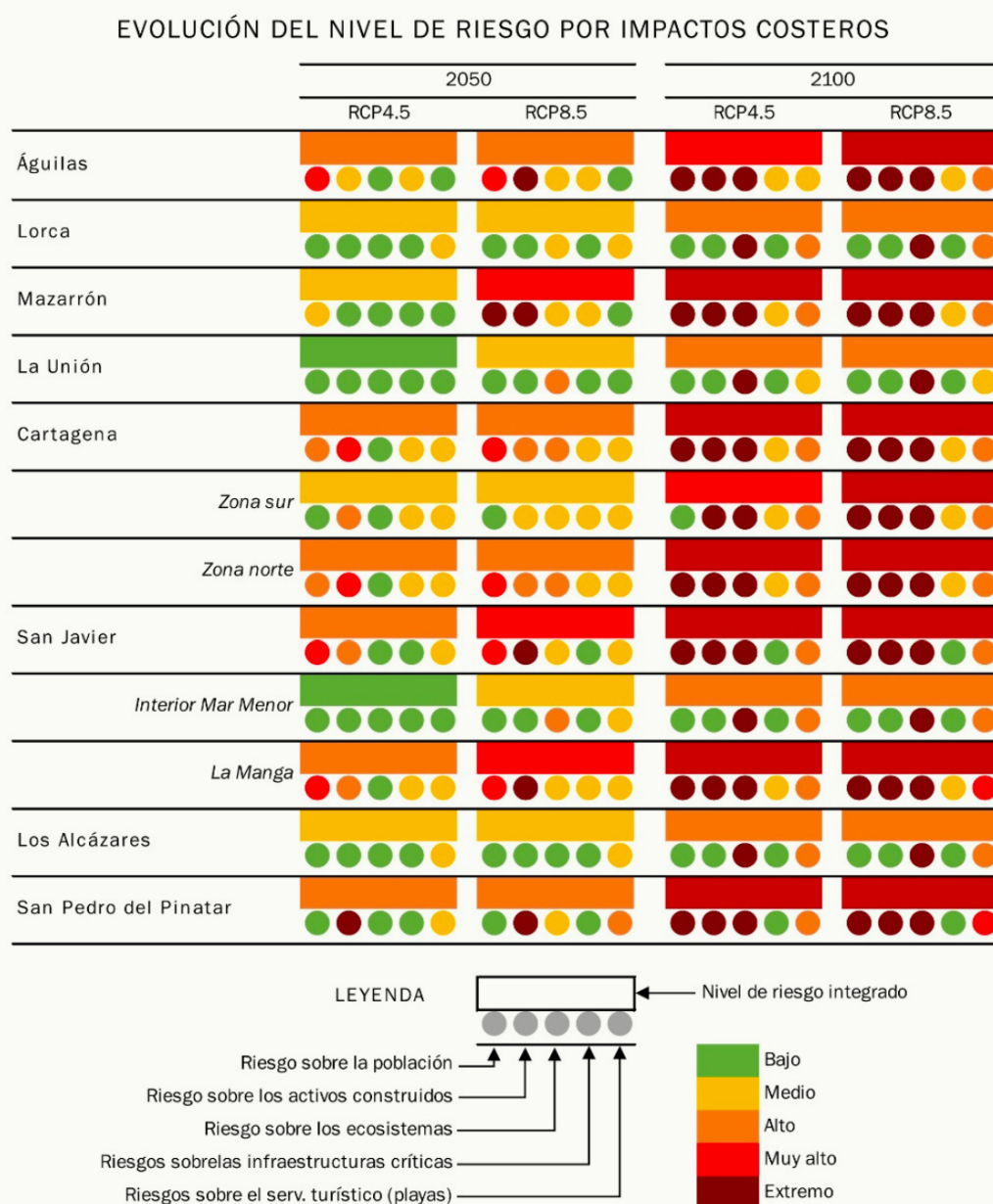


Figura 6. Ejemplo del nivel de riesgo por impactos costeros para diferentes escenarios y horizontes temporales. Combinación de aumento del nivel medio del mar y eventos extremos. Fuente: PIMA Adapta-Murcia (IHCantabria, 2021b).



El riesgo de inundación costera derivado del aumento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos produce **riesgos en cascada** que trascienden el daño inmediato. En el ámbito del patrimonio natural, la erosión acelerada debida a la pérdida de resiliencia de las playas tras episodios sucesivos es crítica; durante los temporales de febrero y marzo de 2014 en la costa cantábrica, varias playas y dunas no mostraron recuperación incluso tres años después, evidenciando el umbral irreversible superado en su capacidad de restauración (Toimil *et al.*, 2017; Garrote *et al.*, 2018). Este proceso erosivo contribuye también a la degradación de la biodiversidad y a la pérdida de servicios ecosistémicos, particularmente en marismas y praderas marinas sometidas a un entorno más salino y estrés mecánico del oleaje (Piñeiro-Corbeira *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2016). En el sector salud, este tipo de inundaciones episódicas pueden provocar brotes de enfermedades transmitidas por el agua (p. ej., leptospirosis y enfermedades gastrointestinales), agravar enfermedades crónicas por la exposición al frío o la humedad y aumentar la demanda de atención sanitaria; tras eventos extremos similares, se han documentado picos significativos en la ocupación hospitalaria y consultas por infecciones respiratorias y dermatológicas (U.S. Global Change and Health Report, 2016). En cuanto al urbanismo, las inundaciones afectan directamente a edificaciones y equipamientos urbanos, generan aislamientos temporales y obstaculizan el acceso a servicios básicos como el agua potable, electricidad o saneamiento, lo que conlleva interrupciones prolongadas en la vida cotidiana urbana (Glavovic *et al.*, 2022). Asimismo, los sectores de energía, industria y servicios, así como el turismo y las actividades primarias (agricultura y ganadería), enfrentan interrupciones temporales en procesos productivos, daños en instalaciones, pérdida de cosechas y de recursos turísticos naturales (Gopalakrishnan *et al.*, 2019). Por ejemplo, los temporales pueden anegar infraestructuras agrícolas costeras, dañando cultivos sensibles a la salinidad y alterando la oferta turística de playas y entornos protegidos (Toimil *et al.*, 2018). Finalmente, en lo que respecta al transporte, las infraestructuras lineales como carreteras, puertos y aeropuertos pueden quedar inoperativas por inundaciones o daños estructurales, lo que interrumpe las cadenas de suministro y afecta gravemente la movilidad de mercancías y personas (Ridha *et al.*, 2022).



Ficha 2. Análisis del riesgo de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debida al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5°C)	Medio plazo 2041-2060 (2°C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4°C)
Severidad del impacto	Limitada	Sustancial	Crítica	Catastrófica
	De acuerdo con PESETA IV, unas 8.100 personas/año están expuestas hoy a inundaciones costeras por eventos extremos y los daños anuales se sitúan en torno a 30 M€, por debajo del 0,01 % del PIB nacional. La afectación es localizada en tramos de baja cota y en enclaves con defensas insuficientes o degradadas.	Bajo un temporal de referencia (Tr=100) sobre una línea de costa ya algo más elevada, se generalizan las inundaciones en deltas, marismas y frentes urbanos de múltiples CCAA. Los mapas PIMA muestran miles a decenas de miles de personas afectadas en conjunto y daños agregados nacionales en el rango 0,01-0,1 % del PIB, con cierres operativos recurrentes e impactos funcionales en transporte y servicios básicos.	Bajo el mismo temporal hacia 2050, la exposición humana supera con holgura las decenas de miles: >15.000 personas en País Vasco y >15.000 en Canarias, 5.800 en Asturias y 1.200-2.700 en Cantabria, C. Valenciana, Baleares y Murcia (≥ 41.000-49.000 personas solo con estas CCAA). Los daños directos por episodio suman >3.000 M€ (>2.000 M€ País Vasco + hasta 920 M€ Canarias + decenas de millones en otras), situando el impacto nacional entre 0,1 y 1 % del PIB. La huella espacial abarca cientos de kilómetros de costa y se producen interrupciones de infraestructuras críticas.	A finales de siglo, el mismo temporal actúa sobre un nivel del mar más alto y una costa más expuesta por degradación acumulada. Las cifras mínimas alcanzan 53.800 personas afectadas en Canarias, 40.000 en País Vasco y >13.000 en Baleares. En España, la población afectada podría escalar a las centenas de miles. En daños, el subtotal con datos (~7.200 M€: 5.000 M€ Canarias + 1.600 M€ País Vasco + >600 M€ Asturias) se supera al agregar el resto de CCAA, rebasando el 1 % del PIB (≥15.000 M). Se considera catastrófico debido a toda la cadena de impactos acumulativos y sistémicos.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5 °C)	Medio plazo 2041-2060 (2 °C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4 °C)
Nivel de confianza:	Alto ◆◆◆	Alto ◆◆◆	Medio ◆◆	Medio ◆◆
· Calidad de las evidencias · Consenso científico	· Alta · Alto	· Alta · Alto	· Media · Medio	· Media · Medio
	Datos de eventos extremos recientes (PESETA IV, PIMA Adapta-Costas), buena base histórica. Alta coherencia en tendencias y magnitud de exposición actual.	Extrapolación de tendencias a muy corto plazo y proyecciones con modelos climáticos a corto plazo. Consenso científico alto en el cambio en la frecuencia/intensidad de eventos extremos.	Mayor rango de incertidumbre en los cambios en la circulación atmosférica y, por tanto, en los modelos climáticos. Dependencia de la evolución socioeconómica. Consenso científico en la tendencia, pero algunas discrepancias en la magnitud regional.	Incertidumbre significativa en las proyecciones de eventos extremos y de aumento del nivel medio del mar relativo. Gran incertidumbre en las proyecciones socioeconómicas. Consenso científico general en dirección de cambio, dispersión alta en magnitud.

	Peligros	Exposición	Vulnerabilidad
Componentes del riesgo	Aumento del nivel medio del mar relativo, compuesto por el aumento del nivel medio del mar local y la subsidencia del terreno, y eventos extremos de nivel del mar (marea meteorológica y marea astronómica), oleaje y viento. Esta combinación de factores resulta en inundación costera permanente y episódica. Es decir, se produce una sobreelevación temporal del nivel medio del mar sobre una línea de costa que ha retrocedido.	Población, capital construido, actividad económica, infraestructuras críticas y servicios ecosistémicos.	Tasa de aumento del nivel medio del mar local, nivel de subsidencia, nivel de implementación de medidas de adaptación, tipo de costa, pendiente del frente costero, resiliencia de los sistemas costeros, umbrales de supervivencia de ecosistemas, umbrales de afección a la población (y tipos de población), tipología y características del capital construido y capacidad de afrontamiento.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Aspectos transversales	
Transfronterizos	Este riesgo tiene un componente eminentemente local o regional, pero los daños repetidos pueden generar efectos indirectos transfronterizos, como presión migratoria desde zonas costeras altamente expuestas, afectación de rutas de transporte marítimo internacional, o interrupciones en cadenas de suministro globales asociadas a infraestructuras productivas situadas en áreas inundables.
Territoriales	Impactos relevantes en la planificación territorial costera. Necesidad de redefinir zonas urbanas seguras, reasignación de usos del suelo, restricciones de edificación en áreas inundables y planificación de infraestructuras críticas más resilientes. Afecta especialmente a núcleos urbanos densos y corredores logísticos próximos a la costa, con potencial de conflictividad local.
Sociales	Riesgo de aislamiento temporal de comunidades costeras, evacuaciones, pérdida de bienes materiales y medios de vida. Afectación de la seguridad alimentaria y del acceso a servicios básicos. Brotes de enfermedades transmitidas por el agua y estrés mental post-evento. Incremento de la vulnerabilidad de hogares con menor capacidad de recuperación económica.
Maladaptación	Medidas de defensa rígidas o sobredimensionadas pueden alterar dinámicas litorales, incrementar la erosión en tramos adyacentes o generar falsas percepciones de seguridad que incentivan la urbanización en zonas de alto riesgo.
Género	El impacto diferenciado puede darse por roles de cuidado y condiciones socioeconómicas: mujeres y niñas enfrentan mayores dificultades para evacuar y para acceder a servicios sanitarios y de alojamiento seguros tras un evento extremo (Thurston <i>et al.</i> , 2021). La destrucción de medios de vida y redes de apoyo comunitario agrava desigualdades preexistentes y puede aumentar la exposición a violencia de género.
Otros aspectos analizados	
Umbral crítico	El umbral viene establecido por la vulnerabilidad de la población y los elementos expuestos. Para un evento de la misma intensidad, los daños pueden ser mucho mayores donde la población tiene menor capacidad de respuesta (p. ej., población envejecida o dependiente o grupos con menor capacidad económica), el tipo de capital construido o donde ese capital construido es más frágil (p. ej., si está compuesto de materiales menos resistentes). Los umbrales incluyen la superación de capacidades de evacuación y protección costera durante eventos extremos y la sobrecarga de infraestructuras críticas.
Lock-in/Bloqueo	Urbanización en zonas inundables y barreras físicas que agravan efectos locales. Percepción de falsa seguridad por defensas rígidas.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Planes o medidas en curso de gestión del riesgo	<p>Existe una Estrategia Española de Adaptación de la Costa (MITECO, 2017) y planes de adaptación para zonas geográficas específicas o ciudades. Existen sectores específicos del ámbito del transporte, infraestructura energética, turismo u otros que han analizado medidas de adaptación específicas, tanto en el sector público como privado. Existe un amplio margen para fortalecer la implementación de medidas de adaptación. Algunos de estos elementos los cubre el Consorcio de Compensación de Seguros. Las herramientas de aplicación incluyen los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación (PGRI), que incorporan la inundación costera; planes de emergencias, sistemas de alerta temprana, mejoras en obras de protección y drenaje urbano. Asimismo, la gestión del DPMT constituye un elemento clave, ya que su ocupación por edificaciones e infraestructuras en zonas de alta peligrosidad dificulta la reducción del riesgo y la recuperación del litoral. En este sentido, resulta fundamental avanzar hacia una planificación integrada que incorpore mecanismos de desalojo planificado, reubicación y permuta de terrenos tierra adentro, en el marco de reformas legislativas y de una cooperación efectiva entre la administración estatal y los municipios costeros.</p>
Gobernanza de gestión del riesgo	<p>La actualización de los planes de emergencia a nivel municipal y autonómico permite incorporar escenarios de mayor intensidad y frecuencia. La coordinación entre niveles de gobierno es fundamental para gestionar infraestructuras críticas, servicios básicos y protección civil de forma eficaz.</p> <p>La incorporación del riesgo de inundación en los instrumentos de ordenación del territorio contribuye a reducir la exposición de los usos del suelo. El refuerzo de los sistemas de alerta temprana mejora la preparación ante eventos extremos, especialmente en comunidades locales y sectores vulnerables.</p> <p>El desarrollo de mecanismos financieros y de seguros adaptados al riesgo climático es clave para avanzar en la resiliencia costera.</p>
Beneficios de medidas de adaptación futuras	<p>Reducción de daños materiales y pérdidas humanas. Implementar infraestructuras de protección y restauración de ecosistemas que actúan como barreras naturales frente a la inundación de eventos extremos.</p> <p>Protección de infraestructuras críticas. Es necesario garantizar la protección de puertos, redes de transporte y servicios básicos con diseños resilientes.</p> <p>Aumento de la resiliencia económica. Menor interrupción de actividades clave como el turismo o la pesca.</p> <p>Cohesión social. Mayor seguridad para comunidades costeras vulnerables.</p> <p>Co-beneficios ambientales. Restaurar marismas, dunas y humedales contribuye a la biodiversidad.</p> <p>Mejora de la planificación urbana. Relocalización planificada y rediseño de zonas de expansión para evitar aumentar la exposición frente al impacto de inundación ante escenarios de cambio climático.</p>

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Afección a/de descarbonización o neutralidad climática	<ul style="list-style-type: none">• Soluciones grises frente a soluciones verdes. Las obras de defensa tradicionales (espigones, diques) pueden generar emisiones significativas, mientras que soluciones basadas en la naturaleza tienen una huella de carbono más baja y actúan como sumideros.• Transporte y logística. Rediseñar accesos puede ayudar a mantener cadenas logísticas con menor huella de carbono ante eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento.• Adaptación transformadora. Evitar la reconstrucción reiterada tras daños reduce emisiones indirectas asociadas a materiales y maquinaria.• Sinergias con mitigación. Los proyectos de restauración de ecosistemas costeros pueden captar carbono y proteger frente a inundaciones, potenciando el secuestro de carbono azul en marismas y praderas marinas.
Déficits de información	<p>Datos de exposición y vulnerabilidad. Falta de información geoespacial de activos críticos (p. ej., industria, viviendas e infraestructuras) expuestos a escenarios de cambio climático.</p> <p>Indicadores sociales. La información sobre la vulnerabilidad diferencial de la población (p. ej., edad, nivel socioeconómico, movilidad) es muy limitada.</p> <p>Valoración de daños indirectos. Escasa cuantificación de pérdidas económicas por interrupción de actividades (p. ej., turismo, industria y comercio).</p> <p>Bases de datos históricas. Registros incompletos de eventos pasados para validar los análisis de riesgo.</p>
Recomendaciones de priorización	<p>Requiere planificación y preparación de respuestas en un horizonte temporal cercano.</p> <p>Requiere un seguimiento periódico. Es necesaria una gobernanza transversal, con decisiones compartidas y planificación conjunta.</p>



4.3. RC6.3. Riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.

El riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección portuarias, como consecuencia del aumento en la intensidad y frecuencia de los eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento, se manifiesta principalmente en zonas portuarias expuestas del litoral español, especialmente en aquellas que no han sido diseñadas para soportar condiciones climáticas más severas que las consideradas en su planificación original (Losada *et al.*, 2019). Este riesgo se materializa a través de la sobreelevación de nivel del mar durante tormentas, el impacto de oleaje de mayor energía sobre diques y escolleras, y el efecto del viento, lo que conduce a la pérdida temporal de operatividad de terminales, la interrupción del transporte de mercancías y pasajeros, así como al cierre preventivo de instalaciones (Izaguirre *et al.*, 2021; Verschuur *et al.*, 2023). Estos eventos extremos pueden provocar daños estructurales en infraestructuras de protección como diques, espigones o muelles, así como en el equipamiento portuario (grúas, defensas, pasarelas), comprometiendo la seguridad y continuidad de las actividades logísticas (Portillo *et al.*, 2022; Verschuur *et al.*, 2023). La degradación progresiva de estas infraestructuras por una repetida exposición a condiciones extremas, unida a la reducción de las ventanas de operación seguras, puede derivar en una pérdida de competitividad y funcionalidad del sistema portuario, sobre todo en puertos de interés estratégico o de difícil acceso alternativo (Becker *et al.*, 2018). Este riesgo adquiere mayor relevancia en contextos de subsidencia local, como en determinados tramos de la costa mediterránea, y en instalaciones portuarias de pequeña escala sin capacidad técnica ni financiera para acometer medidas de adaptación (León-Mateos *et al.*, 2019; Sierra, 2019). Además, puede generar efectos en cascada significativos sobre sectores como el transporte, la industria y los servicios, el turismo y la paz, seguridad y cohesión social.

Se trata de un riesgo relevante para la totalidad de las comunidades autónomas españolas con litoral. Este riesgo se acentúa especialmente en aquellos tramos donde las infraestructuras presentan deficiencias de mantenimiento o estándares de diseño inferiores a las nuevas condiciones extremas proyectadas. En España existen 27 puertos de interés general gestionados por el Estado y más de 380 puertos autonómicos que, en conjunto, ocupan una fracción muy reducida del territorio nacional, pero concentran actividades económicas, logísticas y estratégicas fundamentales. A pesar de su limitada extensión física, su exposición directa a eventos extremos los convierte en elementos críticos del sistema costero. Además, los eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento ya están provocando inundaciones costeras más frecuentes en el suroeste de Europa



(C3S, 2022), y se prevé que aquellos que en el pasado se producían una vez por siglo ocurran al menos una vez al año en numerosos emplazamientos hacia mitad de siglo, independientemente del escenario de emisiones (Fox-Kemper *et al.*, 2021). Este aumento de la frecuencia de eventos extremos pone en riesgo la operatividad de los puertos y de las infraestructuras de defensa asociadas, especialmente en zonas donde no se han actualizado los umbrales de diseño frente al cambio climático (Sierra *et al.*, 2023).

La **Figura 7** muestra la cadena de impactos vinculada a este riesgo clave, estructurada en torno a peligro, la exposición y la vulnerabilidad.

El riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras portuarias y de protección costera está condicionado por un conjunto de **peligros** climáticos que, actuando conjuntamente, intensifican los impactos sobre estas instalaciones. Entre los peligros climáticos, el aumento del nivel medio del mar local (resultado de la expansión térmica del océano, la pérdida de masa de glaciares y capas de hielo, y cambios en la circulación oceánica) eleva el plano base sobre el que actúan las mareas y el oleaje (Fox-Kemper *et al.*, 2021), de modo que eventos que antes no comprometían la operatividad portuaria ahora pueden provocar rebase o inundación. Este ascenso gradual se combina con fenómenos de marea astronómica, que incrementan periódicamente el nivel del mar, y con la marea meteorológica inducida por tormentas (debida a presión atmosférica baja y viento sostenido), que pueden superponerse generando episodios de nivel del mar extremo. Además, el oleaje intenso y los vientos fuertes pueden provocar agitación interior en dársenas, dificultar maniobras de atraque y carga, o incluso impedir el uso del puerto en condiciones seguras (Becker *et al.*, 2020; Sierra *et al.*, 2023).

A estos peligros se añaden factores subyacentes como la subsidencia del terreno, que agrava el riesgo al aumentar el nivel relativo del mar. Esta puede deberse a cargas excesivas por urbanización, extracción de aguas subterráneas o hidrocarburos o a la consolidación de suelos blandos (Nicholls *et al.*, 2021). En España, se han documentado tasas relevantes de subsidencia en zonas portuarias del Mediterráneo y en el delta del Ebro (Alvarado-Aguilar *et al.*, 2012), donde las infraestructuras están sometidas a un doble forzamiento: ascenso del mar y hundimiento del terreno. El resultado de esta combinación de peligros es un rango de impactos físicos que comprometen las instalaciones de los puertos y su actividad (Verschuur *et al.*, 2023). La sedimentación de canales de acceso, inducida por corrientes longitudinales cuando el oleaje incide oblicuamente sobre la costa, reduce el calado y limita el acceso de embarcaciones. Por otro lado, el rebase del oleaje sobre diques o muelles y la agitación interior de las dársenas en las zonas operativas pueden superar los umbrales de seguridad para la navegación o las maniobras de carga y descarga, con pérdidas económicas por interrupción del servicio (Sierra *et al.*, 2016; Becker *et al.*, 2018; Campos *et al.*, 2019). Además, la exposición repetida a condiciones de diseño superadas puede derivar en

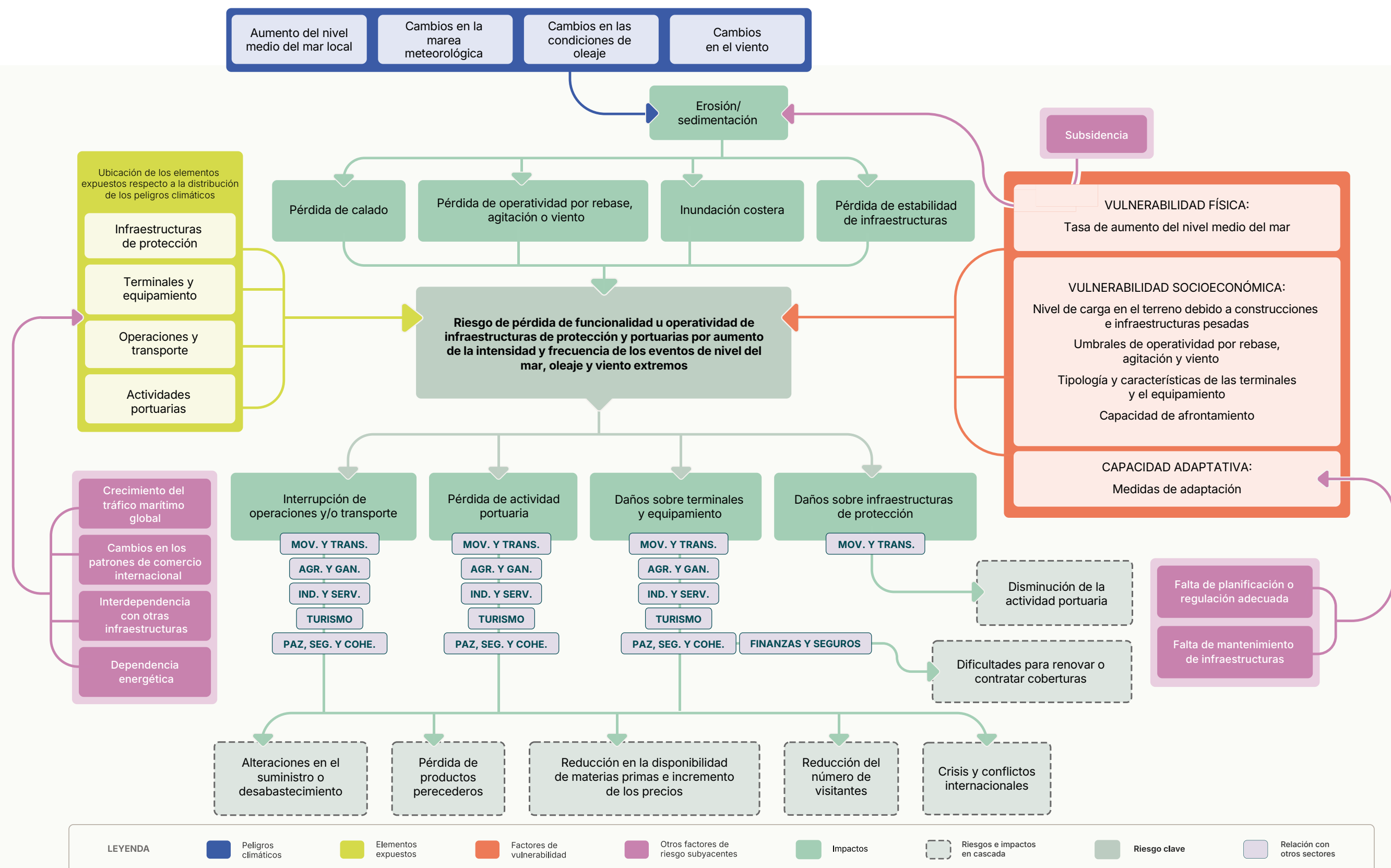


Figura 7. Cadena de impactos para el riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección y portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.



la inestabilidad estructural de obras de abrigo, acelerando su deterioro y acortando su vida útil (Lara *et al.*, 2019; Lucio *et al.*, 2024). Estos peligros no sólo incrementan la presión directa sobre las infraestructuras, sino que también modifican las condiciones hidrodinámicas y sedimentarias, pudiendo agravar problemas estructurales y funcionales ya existentes.

La **exposición** en relación con el riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección y portuarias, asociada a eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento, se concentra en varios elementos críticos. Las estructuras de protección costera (diques, escolleras, rompeolas) están diseñadas para disipar la energía del oleaje e impedir el rebase del mar hacia las áreas operativas del puerto. Al estar directamente expuestas a la acción del oleaje, cualquier incremento en la altura de ola, dirección o frecuencia de eventos extremos puede superar sus umbrales de diseño y provocar daños estructurales o pérdida de eficacia (Izaguirre *et al.*, 2021). Las terminales y el equipamiento portuario (muelles, grúas, sistemas de carga y descarga, almacenes, centros logísticos) se localizan en la interfase tierra-mar, en zonas que, si bien pueden estar ligeramente elevadas respecto al nivel medio del mar, son vulnerables frente a la agitación, el rebase o la inundación episódica, dado que el diseño funcional de estas infraestructuras requiere una accesibilidad directa desde el agua (Becker *et al.*, 2018; Campos *et al.*, 2019). La operatividad portuaria depende de condiciones de maniobrabilidad seguras para las embarcaciones, de forma que, cuando estas condiciones se ven superadas por la acción combinada de oleaje y viento, se genera un cese temporal de la actividad, lo que representa una interrupción directa en el servicio. Por último, las actividades económicas vinculadas al tráfico portuario, tanto dentro del recinto portuario como en sus áreas de influencia terrestre (conocido como *hinterland*), pueden experimentar pérdidas derivadas de la interrupción de flujos de mercancías, la afectación de equipamientos logísticos o el bloqueo de accesos (Verschuur *et al.*, 2023). Esta exposición se ve acentuada en puertos de gran capacidad como Algeciras, Valencia o Barcelona, donde se concentran cadenas logísticas de escala global que operan bajo estrictas ventanas temporales. En todos estos casos, la localización en el litoral y la dependencia de condiciones físicas estables para su operatividad hacen que el sistema portuario, aunque diseñado con robustez, esté especialmente expuesto a los efectos de eventos extremos costeros.

El crecimiento sostenido del tráfico marítimo global, impulsado por el aumento del comercio internacional y la intensificación de las cadenas logísticas, ha incrementado la inversión y densidad de activos en entornos portuarios, lo que a su vez eleva la exposición a condiciones de operación más exigentes (Izaguirre *et al.*, 2020). Asimismo, los cambios en los patrones de comercio, como el desplazamiento del eje del comercio energético o la diversificación de rutas por el Ártico o el canal de Suez, están derivando en una mayor concentración de tráfico en determinados puertos estratégicos, que operan con umbrales más ajustados de maniobrabilidad, calado o disponibilidad horaria. Esta presión funcional se ve amplificada por la interdependencia con otras infraestruc-



turas críticas, como redes ferroviarias, nodos logísticos terrestres, sistemas de almacenamiento y distribución de energía o corredores de transporte (Nirandjan *et al.*, 2024), que refuerzan la centralidad de los puertos en la economía regional y nacional. Además, en un contexto de transición energética y electrificación del transporte, muchos puertos acogen infraestructuras de almacenamiento o distribución de combustibles, generación eléctrica o suministro a buques, aumentando su exposición funcional y sistémica a alteraciones por eventos extremos (Mat *et al.*, 2016; Sadiq *et al.*, 2021). Disrupciones en la cadena portuaria pueden afectar a sectores estratégicos dependientes del suministro marítimo, como el transporte, la energía o el abastecimiento de productos fundamentales.

La vulnerabilidad de las infraestructuras portuarias y de protección en relación con este riesgo está condicionada por factores físicos, socioeconómicos y de capacidad adaptativa (Izaguirre *et al.*, 2021). Desde el punto de vista físico, la tasa de aumento del nivel medio del mar relativo es un factor determinante, ya que modifica la línea base sobre la cual actuarán las condiciones extremas, acortando los periodos de retorno de los eventos de nivel del mar y oleaje y reduciendo los márgenes de seguridad estructural (Sierra *et al.*, 2016). Una mayor tasa implica una exposición más frecuente y severa a condiciones que pueden superar los umbrales de diseño de estructuras como diques, muelles o rompeolas (Hanson *et al.*, 2011). Asimismo, el nivel de carga en la superficie del terreno, asociado a la presencia de infraestructuras pesadas como terminales o depósitos, puede contribuir a procesos de subsidencia local, lo que, en combinación con el aumento del nivel medio del mar, intensifica la vulnerabilidad relativa del entorno portuario al reducir la cota efectiva del terreno respecto al nivel del mar, como ya se ha observado en algunos entornos deltaicos, como el Delta del Ebro, donde las tasas de subsidencia estimadas oscilan en gran parte entre 1 y 3 mm/año (ICGC, 2018).

En el plano socioeconómico, los umbrales operativos de las instalaciones portuarias, como los niveles de rebase tolerables, la agitación máxima compatible con maniobras de atraque seguro o los límites de viento para operaciones de carga y descarga, determinan la frecuencia y severidad con la que las actividades portuarias deben interrumpirse ante eventos extremos (Duncan *et al.*, 2017). Cuando dichos umbrales son bajos o se ven superados con facilidad por la nueva climatología marítima, la vulnerabilidad funcional aumenta. La tipología y características de las terminales (material, grado de automatización, exigencias logísticas y tipo de carga) y el equipamiento del puerto (sistemas automatizados, grúas de alta capacidad, centros logísticos sensibles) condicionan tanto la resistencia estructural como la velocidad de recuperación tras un evento disruptivo. La capacidad de afrontamiento, incluyendo los recursos financieros, la existencia de planes de contingencia y la flexibilidad operativa, modula en gran medida el impacto de la disrupción.

Por último, la capacidad adaptativa juega un papel clave. Los puertos que han implementado medidas de adaptación como la elevación de muelles, el refuerzo de diques, la mejora de sistemas



de drenaje y la implementación de sistemas de alerta temprana, cuentan con menor vulnerabilidad operativa (Portillo *et al.*, 2022). En cambio, la ausencia de planificación adecuada, la falta de mantenimiento preventivo de infraestructuras y la escasa integración del cambio climático en los instrumentos de regulación sectorial contribuyen a aumentar la vulnerabilidad sistémica del sistema portuario, especialmente en instalaciones de tamaño medio y pequeño donde los recursos técnicos y financieros son más limitados.

Los **impactos** asociados al riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras portuarias y de protección por el aumento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento son tanto **económicos** como **físicos**. Desde el punto de vista económico, la interrupción de operaciones y/o transporte puede derivarse de condiciones de rebase, agitación o viento que superan los umbrales de seguridad portuaria, lo que impide maniobras de atraque, carga o descarga, o directamente obliga al cierre temporal del puerto. Esto puede afectar tanto al tráfico de mercancías como al transporte de pasajeros, con consecuencias inmediatas sobre la cadena logística y el abastecimiento, y puede generar pérdidas económicas significativas derivadas de la interrupción de la actividad (Verschuur *et al.*, 2023). La pérdida de actividad portuaria afecta sobre todo a los puertos de interés general, nodos estratégicos del comercio internacional, la energía o el tráfico de contenedores (como Algeciras, Valencia o Barcelona), pero también a puertos autonómicos o regionales, que cumplen funciones clave en la economía local y en sectores tales como la pesca, el turismo náutico o el transporte interinsular (p. ej., puertos en las Islas Baleares o Canarias) (Izaguirre *et al.*, 2020). Los daños sobre terminales y equipamiento incluyen averías en grúas, pasarelas, sistemas de atraque y amarre, canalizaciones, equipamiento eléctrico y electrónico, así como en sistemas de almacenamiento y distribución, lo que puede conllevar largos periodos de inactividad o reparaciones con un coste económico elevado (Becker *et al.*, 2018). Desde el punto de vista físico, los daños directos sobre infraestructuras de protección, como diques, muelles o rompeolas, se producen cuando estos elementos son sometidos a condiciones de oleaje superiores a las contempladas en su diseño original, ya sea por eventos extremos más energéticos o por la elevación del nivel medio del mar, con la consiguiente reducción del francobordo⁸ (Sierra *et al.*, 2023). Estas estructuras pueden sufrir erosión, desplazamientos, fallos en el núcleo o rotura del manto, comprometiendo su integridad y reduciendo su capacidad protectora, lo que puede agravar la exposición y vulnerabilidad del resto del sistema portuario.

Los planes autonómicos de los terrenos de DPMT adscritos a las comunidades autónomas han comenzado a identificar el grado de exposición y riesgo climático que enfrentan los puertos regionales frente al aumento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos vinculados al nivel del

⁸ Diferencia de cota entre el nivel del mar y la cresta de una defensa costera. Es un parámetro fundamental en el diseño de infraestructuras de protección contra la inundación.



mar, oleaje y viento, así como a cambios en la temperatura y la precipitación. Los impactos físicos considerados en estos análisis incluyen la pérdida de operatividad por superación de umbrales climáticos, la agitación portuaria, el rebase y pérdida de estabilidad de diques, la inundación costera y procesos de sedimentación o aterramiento de canales de acceso, lo que compromete directamente tanto la funcionalidad de las infraestructuras como las actividades económicas asociadas. La información recopilada en algunos planes autonómicos permite estimar que, en 2050, podrían encontrarse en situación de riesgo alto o muy alto hasta 35 puertos en Cataluña (CIIR, 2023), 16 en las Islas Baleares (Ports IB, 2021), 12 en el Principado de Asturias (Principado de Asturias, 2021), 3 en Cantabria (IHCantabria, 2021c) y 2 en la región de Murcia (IHCantabria 2021d), dependiendo del escenario de emisiones. Para el horizonte 2100, estas cifras se incrementan de forma notable para escenario de altas concentraciones de gases de efecto invernadero RCP8.5, alcanzando hasta 69 puertos en Cataluña, 49 en Baleares, 17 en el Principado de Asturias, 14 en la región de Murcia y 5 en Cantabria. Estos valores reflejan un peligro creciente para las infraestructuras físicas y los servicios de interés público asociados a los puertos, como el transporte, las comunicaciones o el suministro de mercancías, amplificando el carácter sistémico del riesgo. La **Figura 8** muestra el ejemplo del puerto de Luarca, donde se ha evaluado el incremento del riesgo agregado debido al cambio climático en ausencia de medidas de adaptación (Gobierno del Principado de Asturias, 2021).

	2050		2100	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Δ Daños sobre activos acumulados en el periodo [€]	12.200	25.100	78.800	51.200
Δ Pérdidas de ingresos anualizado en el periodo [€]	2.000	4.700	4.400	6.600
Δ Costes de mantenimiento anualizado en el periodo [€]	5.100	74.900	7.700	101.100
% Δ RIESGO SOBRE ACTIVOS [%]	0,06%	0,13%	0,39%	0,26%
% Δ RIESGO SOBRE INGRESOS [%]	0,02%	0,04%	0,04%	0,06%
%Δ RIESGO SOBRE COSTES DE MANTENIMIENTO [%]	1,45%	21,35%	2,23%	29,32%

Riesgo	% Δ RIESGO SOBRE COSTES DE MANTENIMIENTO O INGRESOS			
	Rango	3%	-	10%
% Δ RIESGO SOBRE ACTIVOS		≤3%	3-10	≥10%
	10%	≥10%	INCREM. ALTO	INCREM. ALTO
	-	3-10	INCREM. MEDIO	INCREM. ALTO
	3%	≤3%	INCREM. BAJO	INCREM. ALTO

	2050		2100	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Δ RIESGO	INCREM. BAJO	INCREM. ALTO	INCREM. BAJO	INCREM. ALTO

Figura 8. Ejemplo de resultados de la evaluación del incremento del riesgo debido al cambio climático en el puerto de Luarca en ausencia de adaptación. Fuente: Plan de Adaptación de los Puertos del Principado de Asturias (Gobierno del Principado de Asturias, 2021).



Los impactos físicos y económicos derivados del riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de las infraestructuras de protección y portuarias por eventos extremos de nivel del mar, oleaje y viento pueden desencadenar **riesgos en cascada** que afectan a sectores estratégicos. En el sector del transporte, la interrupción de operaciones portuarias compromete el tráfico de mercancías y pasajeros, interrumpe rutas logísticas clave y puede derivar en desabastecimiento temporal de bienes esenciales, tanto a nivel regional como nacional (Izaguirre *et al.*, 2020, 2021). Estas disrupciones, unidas a la reducción en la disponibilidad de materias primas y al incremento de los costes logísticos, pueden generar aumentos en los precios y afectar de forma significativa a las cadenas de producción y distribución (Becker *et al.*, 2018). En el ámbito de la industria y los servicios, la pérdida de funcionalidad portuaria afecta especialmente a sectores estratégicos como el automovilístico, agroalimentario o energético, altamente dependientes de la logística marítima (Verschuur *et al.*, 2023). El turismo, por su parte, puede verse perjudicado por la reducción del tráfico de cruceros y embarcaciones recreativas, así como por los daños a instalaciones portuarias vinculadas a este sector, generando una caída en el número de visitantes y pérdidas económicas relevantes, especialmente en territorios insulares como las Islas Baleares o Canarias. La perturbación prolongada de la actividad portuaria puede también repercutir en la estabilidad social y geopolítica, a través de la pérdida de medios de vida, la competencia por recursos escasos o incluso crisis y conflictos internacionales derivados de la alteración del comercio global y de la distribución de recursos estratégicos (IPCC, 2022). La creciente interdependencia entre sectores e infraestructuras acentúa el potencial sistémico de este tipo de riesgos. Una afectación localizada puede escalar rápidamente y comprometer el funcionamiento de sistemas económicos y sociales complejos, aumentando la vulnerabilidad de las regiones costeras y generando consecuencias más allá del ámbito portuario (Lawrence *et al.*, 2020).



Ficha 3. Análisis del riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructura de protección portuaria por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5°C)	Medio plazo 2041-2060 (2°C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4°C)
Severidad del impacto ⁹	Limitada	Sustancial	Crítica	Crítica
	Hoy la mayor parte de los puertos conserva márgenes de operatividad. Se registran cierres puntuales por temporales, rebase o agitación en dársena y algunos episodios de aterramiento, pero el impacto económico agregado a escala nacional se mantiene por debajo del 0,01 % del PIB y las interrupciones sistémicas son escasas.	Los planes autonómicos empiezan a señalar puertos con riesgo alto en varios litorales. Aumentan los episodios de superación de umbrales de operatividad (agitación, rebase, inundación de explanadas, dragados extraordinarios y cierres preventivos), con afectación simultánea de varios enclaves y repercusiones logísticas regionales. El impacto económico agregado nacional se sitúa previsiblemente entre el 0,01 % y el 0,1 % del PIB, con primeras disrupciones sistémicas en cadenas de suministro.	Para 2050, los inventarios autonómicos estiman 35 puertos en Cataluña, 16 en Islas Baleares, 12 en Principado de Asturias, 3 en Cantabria y 2 en Región de Murcia en situación de riesgo alto o muy alto. Con cierres recurrentes, necesidad de refuerzos estructurales, dragados adicionales y desvíos logísticos, el impacto agregado a escala nacional se eleva al rango del 0,1 % – 1 % del PIB, con problemas persistentes de operatividad y costes de mantenimiento crecientes.	Bajo escenarios de altas emisiones, los puertos en riesgo alto o muy alto aumentan de forma notable: 69 en Cataluña, 49 en Islas Baleares, 17 en Principado de Asturias, 14 en Región de Murcia y 5 en Cantabria, a los que se sumarían otros enclaves de CCAA con exposición elevada. El impacto económico agregado continúa en el rango 0.1 % – 1 % del PIB, al combinar pérdidas directas, costes de reparación y refuerzo, y pérdidas por inoperatividad.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>

⁹ Nota metodológica. Se asume que el conjunto del sistema portuario representa $\approx 1\%$ del PIB. Con un total de $\sim 250\text{--}300$ puertos, la contribución media por puerto se aproxima a $0,004\%$ del PIB. Considerando pérdidas parciales anuales, se toma como referencia $0,002\%$ del PIB por puerto. La estimación agregada se obtiene multiplicando dicho valor por el número de puertos en riesgo alto o muy alto y extrapolando de las 5 CCAA con datos disponibles al total de 10 CCAA costeras. Esta cifra debe interpretarse como aproximación preliminar sujeta a heterogeneidad sectorial y a posibles sesgos de extrapolación.



Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5 °C)	Medio plazo 2041-2060 (2 °C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4 °C)
Nivel de confianza:	Medio ♦♦	Medio ♦♦	Medio ♦♦	Bajo ♦
· Calidad de las evidencias · Consenso científico	· Media · Alto	· Media · Alto	· Media · Medio	· Baja · Medio
	La información existente es parcial. Estudios locales de agitación y rebase, pero con falta de cobertura homogénea en todos los puertos. Consenso científico en que la funcionalidad ya es sensible a eventos extremos.	Los planes autonómicos ofrecen información cuantitativa para muchos puertos, pero falta modelado detallado en algunos casos. Consenso científico alto en tendencia a mayor riesgo funcional.	Mayor rango de incertidumbre en los cambios en la circulación atmosférica y, por tanto, en los modelos climáticos. Dependencia del diseño de infraestructuras y de los escenarios de inversión. Consenso científico en la tendencia, pero algunas discrepancias en la magnitud regional. Discrepancias sobre la capacidad adaptativa.	Incertidumbre significativa en las proyecciones de eventos extremos y de aumento del nivel medio del mar relativo. Incertidumbre en los modos de fallo. Consenso científico general en dirección de cambio, dispersión alta en magnitud. Variabilidad de efectos sistémicos.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

	Peligros	Exposición	Vulnerabilidad
Componentes del riesgo	Aumento del nivel medio del mar relativo, compuesto por el aumento del nivel medio del mar local y la subsidencia del terreno, y eventos extremos de nivel del mar (marea meteorológica y marea astronómica), oleaje y viento. Esta combinación de factores resulta en pérdida de calado en los canales de acceso y las dársenas (debido a procesos de erosión y sedimentación), pérdida de operatividad por rebase, agitación y viento, inundación costera y pérdida de estabilidad de infraestructuras.	Infraestructuras de protección, terminales y equipamiento, operaciones y transporte y actividades portuarias.	Tasa de aumento del nivel medio del mar local, nivel de subsidencia, nivel de implementación de medidas de adaptación, umbrales de operatividad por rebase, agitación y viento, tipología y características de las terminales y el equipamiento y capacidad de afrontamiento.
Aspectos transversales			
Transfronterizos	El cierre o pérdida de funcionalidad de grandes puertos afecta a rutas logísticas internacionales, cadenas de suministro globales y mercados de materias primas, con posibles efectos en cascada que trascienden fronteras. Puede provocar tensiones comerciales y geopolíticas.		
Territoriales	Impactos en la conectividad territorial, especialmente en regiones insulares y áreas dependientes del transporte marítimo para abastecimiento. Riesgo de aislamiento temporal de territorios periféricos. Afecta a la planificación portuaria, el urbanismo costero y la distribución espacial de industrias dependientes.		
Sociales	Pérdida de empleos directos e indirectos en sectores ligados a la actividad portuaria (p. ej., transporte, logística, pesca y turismo). El desabastecimiento temporal de bienes esenciales puede generar tensiones sociales. Alteración de medios de vida locales y potencial aumento de la conflictividad por recursos estratégicos.		
Maladaptación	Intervenciones portuarias rígidas o sobredimensionadas pueden agravar la exposición de zonas adyacentes al modificar patrones de oleaje y sedimentación. Las obras sin planificación integrada pueden derivar en altos costes de mantenimiento y reducir la resiliencia del sistema portuario y costero.		
Género	Las interrupciones portuarias pueden afectar de forma desigual a mujeres empleadas en sectores logísticos, comercio y turismo, donde suelen ocupar puestos más precarios. El desabastecimiento de servicios básicos impacta especialmente a las mujeres, quienes suelen asumir la responsabilidad principal de cuidados y suministro familiar, incrementando su carga.		

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Umbrales críticos	El umbral a partir del cual la magnitud del impacto aumenta sustancialmente dependerá de las condiciones de diseño de las infraestructuras portuarias, en particular del nivel de seguridad para el que fueron concebidas. Una vez superado el umbral de diseño se perderá funcionalidad y operatividad con consecuencias inmediatas sobre el transporte de mercancías, el abastecimiento o el tráfico de pasajeros.
Lock-in/Bloqueo	Infraestructuras fijas y grandes inversiones dificultan reubicación o rediseño. Dependencia estructural del comercio marítimo.
Planes o medidas en curso de gestión del riesgo	Todos los puertos regionales españoles cuentan con un plan de adaptación. Existe un amplio margen para fortalecer la implementación de medidas de adaptación. El sistema estatal de puertos no cuenta todavía con planes de adaptación para sus puertos. No existen planes de adaptación específicos para obras de protección. Algunas medidas implementadas son las revisiones de los planes de explotación portuaria, las obras de refuerzo de diques y mejoras en predicción meteorológica (p. ej., sistemas de alerta temprana).
Gobernanza de gestión del riesgo	<p>La coordinación entre Autoridades Portuarias, Puertos del Estado y administraciones locales resulta clave para integrar criterios de adaptación en la gestión portuaria. La actualización de planes de contingencia permite anticipar daños estructurales y garantizar la continuidad operativa durante eventos extremos.</p> <p>La resiliencia de las infraestructuras requiere inversiones sostenidas a largo plazo, así como la incorporación de criterios climáticos en normativa técnica, concesiones y contratos. Finalmente, la alineación con la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Puertos del Estado y con los planes autonómicos favorece una gobernanza multinivel más efectiva.</p>
Beneficios de medidas de adaptación futuras	<p>Protección de la operatividad portuaria. Reducción de cierres temporales, retrasos y daños en instalaciones críticas (muelles, diques, rompeolas).</p> <p>Seguridad de personas y bienes. Minimización de riesgos para trabajadores, mercancías, barcos y usuarios.</p> <p>Competitividad económica. Evitar interrupciones en la cadena logística marítima y costes adicionales por desvíos o pérdidas de carga.</p> <p>Aprovechamiento de soluciones innovadoras. Implementación de diseños flexibles, estructuras flotantes o diques adaptativos que absorban energía de oleaje extremo.</p> <p>Fortalecimiento de la reputación internacional. Puertos resilientes pueden posicionarse mejor como nodos logísticos seguros frente a fenómenos climáticos extremos.</p>
Afección a/de descarbonización o neutralidad climática	<p>Huella de carbono de las infraestructuras. La construcción de obras de refuerzo estructural de diques y espigones implican un consumo intensivo de materiales y energía.</p> <p>Evitar reconstrucción reiterada. El diseño adaptativo y el mantenimiento preventivo reducen emisiones indirectas derivadas de reparaciones frecuentes.</p>

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Déficits de información	<p>Datos estructurales y vulnerabilidad. Información incompleta o desactualizada sobre la resistencia y vida útil de diques y elementos de protección.</p> <p>Análisis de cadenas logísticas. Poca cuantificación de impactos económicos indirectos asociados a pérdida de operatividad.</p> <p>Monitorización en tiempo real. Déficit de sistemas de observación y alerta específicos para daños estructurales durante eventos extremos.</p> <p>Indicadores de resiliencia operativa. Carencia de métricas estandarizadas para evaluar la capacidad de recuperación tras impactos.</p>
Recomendaciones de priorización	<p>Requiere planificación y preparación de respuestas en un horizonte temporal cercano. Requiere una evaluación más detallada y estudios complementarios. Se puede abordar principalmente dentro de un único ámbito de la gestión pública.</p>



4.4. RC6.4. Riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano

El aumento de la temperatura y la acidificación de los océanos como consecuencia del cambio climático provoca alteraciones en la configuración de los ecosistemas marinos, afectando a la distribución y abundancia de las especies que los integran. Estas potenciales alteraciones afectan a toda la costa española, aunque su magnitud es variable entre regiones como consecuencia de múltiples factores, algunos inherentes a la propia biología de las especies y otros como consecuencia de los patrones regionales del clima. Gran parte de estas alteraciones tendrán impactos negativos sobre los hábitats, puesto que las especies que los integran se encuentran cerca de sus límites de tolerancia ambiental al ser la Península Ibérica una zona de transición biogeográfica (Tuya *et al.*, 2012). En caso de sobrepasarse dichos límites, estas especies verán comprometidos algunos de sus procesos ecológicos esenciales, y por tanto, se verán obligadas a desplazarse hacia latitudes o profundidades mayores si poseen los mecanismos necesarios. De modo opuesto, el hecho de que la Península Ibérica sea una zona de transición, supone que otras especies vean este cambio en las condiciones ambientales como una oportunidad para ampliar su distribución y colonizar nuevas regiones. Sin embargo, el balance observado hasta el momento apunta hacia una reducción en la complejidad de los sistemas ecológicos, con consecuencias negativas en todos los niveles y que pueden llegar a afectar a otros sectores relacionados como el turismo o la pesca.

Se trata de un riesgo relevante para todas las comunidades autónomas españolas con franja costera, siendo particularmente relevante en aquellas regiones con presencia de ecosistemas, comunidades o elementos biológicos especialmente vulnerables (por su rareza, singularidad, fragilidad o importancia ecológica y/o económica), estén incluidos o no dentro de alguna figura de protección. En las costas Atlánticas, los bosques de laminarias o 'kelp' son un claro ejemplo de comunidad vulnerable, no solo por el papel esencial que juegan en múltiples procesos como la proporción de refugio o la protección costera, sino también por la singularidad de los cambios registrados en su distribución (Casado-Amezúa *et al.*, 2019). Esto ha hecho que estas comunidades se encuentren actualmente confinadas en las costas gallegas y territorios adyacentes, dónde la influencia del afloramiento mitiga el aumento de la temperatura, manteniéndose próxima, pero por debajo de los límites de tolerancia de la especie. Otros ejemplos incluyen las praderas de fanerógamas del Mediterráneo, dominadas por *Posidonia oceanica*, que han perdido una cantidad significativa del área ocupada en esta región durante las últimas décadas (Marbà *et al.*, 2014; Telesca *et al.*, 2015) como consecuencia de los efectos del cambio climático en conjunto con otros estresores; o las del Atlántico, integradas por especies del género *Zostera* y que se encuentran amenazadas



tanto por el aumento de la temperatura del agua como por la subida del nivel del mar (Valle *et al.*, 2014; Ondiviela *et al.*, 2020).

La **Figura 9** recoge la cadena de impacto desarrollada para este riesgo clave, reflejando los principales peligros climáticos, el grado de exposición y los principales factores que caracterizan la vulnerabilidad del sistema.

El riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies está condicionado por un conjunto de **peligros**, siendo el aumento de la temperatura superficial del mar el más relevante. Este aumento de la temperatura afecta directamente a las especies, puesto que puede alterar o comprometer algunos procesos fisiológicos esenciales, modificando las tasas metabólicas o afectando a la reproducción. También lo hace indirectamente influyendo en otros procesos como aquellos que controlan la concentración de oxígeno disuelto en el agua o la disponibilidad de alimento. Aunque de forma aislada el aumento de las temperaturas ya supone un peligro relevante para los hábitats y especies, en conjunto con otros fenómenos como el incremento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor, u otros de carácter antrópico (p. ej. sobreexplotación pesquera, contaminación, etc.) puede llegar a ser crítico, hasta el punto de provocar extinciones locales. La acidificación de los océanos es otro peligro que contribuye al riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitats y especies de las costas españolas, especialmente aquellos sistemas integrados por organismos que poseen estructuras calcáreas. Sin embargo, el conocimiento del que se dispone en este sentido es limitado, y los estudios realizados hasta el momento no parecen haber encontrado una relación clara entre el descenso del pH y los impactos negativos sobre estos organismos, al menos a las tasas de acidificación derivadas del cambio climático (Kersting, 2016).

En términos de **exposición**, todos los ecosistemas marinos se encuentran expuestos, en mayor o menor medida, al aumento de la temperatura del mar y la acidificación de los océanos. Algunos de los grupos de organismos más relevantes se han resaltado en la **Figura 9**, dentro del apartado de elementos expuestos, aunque la diversidad de hábitats marinos en el territorio nacional es muy amplia. Muchos de estos elementos expuestos se encuentran amparados dentro de diferentes figuras de protección, como los Parques Nacionales (i.e. PNMT del Archipiélago de Cabrera y PNMT de las Islas Atlánticas de Galicia), las Áreas Marinas Protegidas, Zonas de Especial Conservación (ZEC) y Lugares de Interés Comunitario (LIC), Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) o Reservas Marinas entre otras. Dentro de todos los hábitats marinos del territorio nacional, Kersting (2016) resalta algunos por su mayor exposición y vulnerabilidad como, por ejemplo, los arrecifes de *Cladocora caespitosa*, las comunidades de coralígeno y gorgonias mediterráneas, los arrecifes de vermétidos o los bosques de macroalgas dentro del hábitat de interés comunitario 1170 (Arrecifes), las praderas de *Posidonia oceanica* (hábitat de interés comunitario 1120) o de *Zostera*, así como los fondos de rodolitos y maerl. Algunas herramientas como el Inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (MITECO, 2021b),

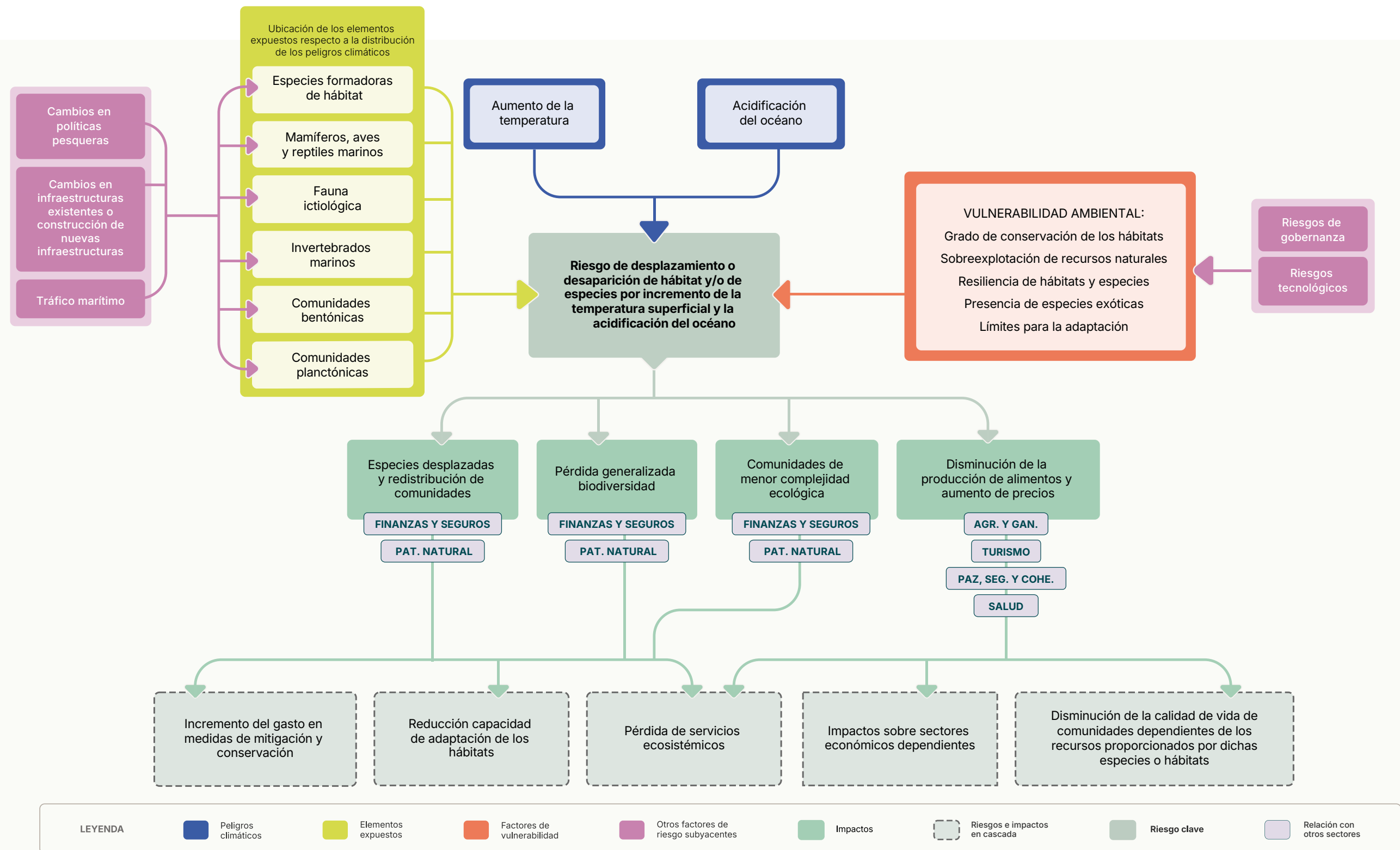


Figura 9. Cadena de impactos para el riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano



el Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial (LESRPE) o el Catálogo Español de Especies Amenazadas (CEEAA), sirven de referencia a la hora de estimar el grado de exposición de los hábitats y/o especies frente al aumento de las temperaturas y la acidificación, puesto que recogen una gran variedad de información como inventarios, catálogos, registros y listados de especies.

La **vulnerabilidad** de los hábitats mencionados anteriormente frente a los peligros derivados del cambio climático, así como, de las especies que los integran, depende de factores que pueden ser intrínsecos a las propias especies o poblaciones, como, por ejemplo, su plasticidad y capacidad adaptativa, la existencia de mecanismos específicos frente a perturbaciones o el grado de conservación; pero también extrínsecos, como factores antrópicos ligados a la explotación de recursos (p. ej. sobreexplotación pesquera) o la presencia de especies exóticas invasoras. En términos generales, una gran parte de las especies marinas, especialmente aquellas que carecen de movilidad, presentan una vulnerabilidad elevada frente al aumento de temperatura puesto que están adaptadas a condiciones específicas, sin grandes oscilaciones. De hecho, muchos de sus procesos ecológicos están fuertemente ligados a estas condiciones ambientales, así como a su estacionalidad, por lo que cambios bruscos o modificaciones en los regímenes existentes reducen su capacidad de respuesta. Las especies de crecimiento lento y bajas tasas de reclutamiento, como el coral *Cladocora caespitosa* anteriormente mencionado, son especialmente vulnerables frente a perturbaciones ambientales como el aumento rápido de las temperaturas, ya que su capacidad de recuperación es muy limitada (Kersting *et al.*, 2014). La posición de una determinada población dentro del perfil vertical también puede determinar su vulnerabilidad, como ocurre con las gorgonias mediterráneas, donde la vulnerabilidad se reduce con la profundidad (Linares *et al.*, 2013). En especies con motilidad, la fragmentación de los hábitats, ligada al grado de conservación de estos, condiciona en gran medida la vulnerabilidad. Los movimientos migratorios, los procesos de dispersión de propágulos y el reclutamiento pueden verse afectados por estos fenómenos de fragmentación, al perderse o reducirse la conectividad entre poblaciones y hábitats. Si bien es cierto que algunas especies pueden desarrollar algunos mecanismos de adaptación frente a la reducción o falta de movilidad (mediante adaptación genética o plasticidad fenotípica), los estudios recientes apuntan a que el ritmo de desarrollo de estos mecanismos probablemente ocurra a una velocidad inferior a la del cambio climático (Parmesan & Hanley, 2015).

El riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies está asociado a una serie de **impactos** que son de naturaleza principalmente ecológica, pero que pueden llegar a afectar a otros sectores ligados como el turismo, la pesca o el financiero, entre otros. El principal impacto, como el propio enunciado del riesgo indica, es el desplazamiento de las especies con el aumento de las temperaturas, una vez que se superan los umbrales de tolerancia de la especie en una determinada región. En este sentido, los rangos de distribución de muchas especies se verán desplazados hacia los polos, en búsqueda de temperaturas más frías (p. ej. Franco *et al.*, 2018; Ramos *et al.*, 2020). En España, al tratarse de una zona biogeográfica de transición, esta migración supondrá una reducción en el área



ocupada por muchas especies, quedando en algunas zonas confinadas en lo que se denominan refugios climáticos (Verdura *et al.*, 2021, Arriaga *et al.*, 2024). Este proceso estaría ligado a la entrada de nuevas especies, procedentes de hábitats más cálidos, por lo que determinadas áreas podrían registrar una redistribución de las comunidades, con efectos inciertos hasta la fecha. Así lo demuestran algunas evidencias que apuntan a que en determinadas zonas de la Península Ibérica ya se está produciendo un reemplazo de especies de macroalgas con una afinidad térmica más fría por especies de afinidad térmica cálida (de Azevedo *et al.*, 2023). Esto también se ha observado con diferentes especies de peces en el Mar Mediterráneo, dónde la alacha (*Sardinella aurita*), una especie de aguas cálidas ha empezado a reproducirse en zonas dónde en las últimas décadas no lo hacía (Sabatés *et al.*, 2006), mientras que las poblaciones de otras especies como la sardina (*Sardina pilchardus*) o la anchoa (*Engraulis encrasicolus*) se encuentran en declive (Martín *et al.*, 2012). Estos cambios a nivel de hábitat, especialmente cuando afectan a las especies estructurantes de los mismos, tienen tal relevancia que han sido incluidos en algunos estudios regionales de adaptación al cambio climático como los del programa PIMA Adapta-Costas (MITECO, 2020b). En el estudio de Cantabria, por ejemplo, se recoge una evaluación del efecto del cambio climático en las comunidades de macroalgas intermareales a partir de la clasificación en tipologías establecida en Ramos *et al.* (2015). El análisis muestra como en la comunidad, y en general, en toda la cornisa cantábrica, las tipologías existentes serán remplazadas por una nueva tipología en el escenario RCP 8.5 y horizonte temporal 2081-2100, con condiciones favorables para desarrollo de especies de macroalgas de latitudes bajas y aguas más cálidas (Figura 10).

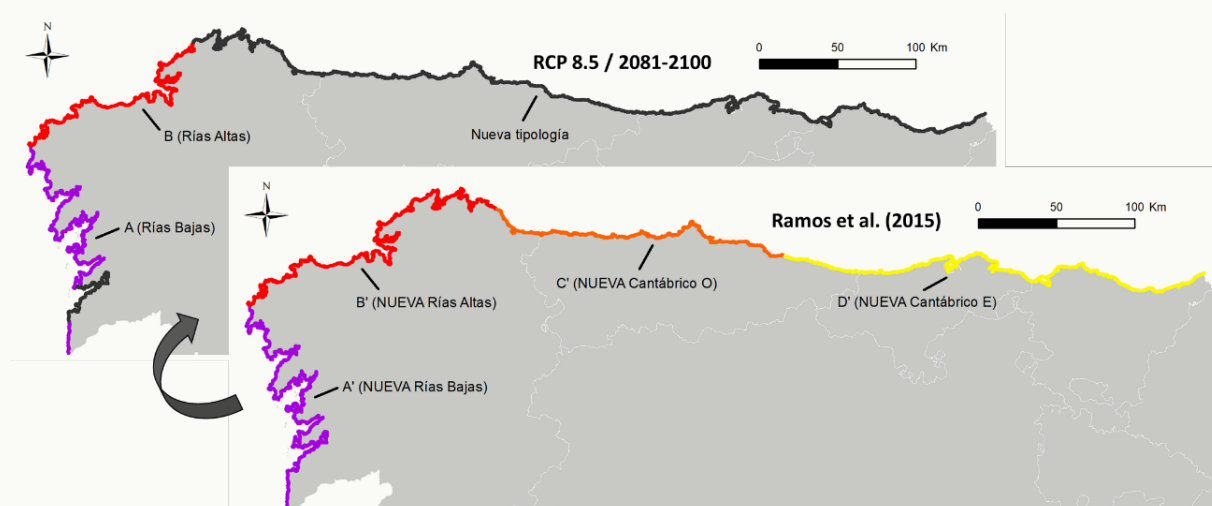


Figura 10. Ejemplo de los cambios en las tipologías ecológicas de macroalgas intermareales para el escenario RCP8.5 y periodo temporal 2081-2100 como consecuencia del aumento de las temperaturas y los cambios en el régimen de oleaje.
Fuente: PIMA Adapta-Cantabria (IHCantabria, 2021a)



Por otro lado, aunque los estudios a nivel nacional son limitados, existen algunos trabajos a nivel internacional que están reportando cómo esta redistribución está generalmente asociada a una reducción en la complejidad estructural de los sistemas, y por tanto en una pérdida generalizada de biodiversidad. Utilizando de nuevo el ejemplo de las macroalgas, se ha observado cómo ciertas regiones del planeta donde los bosques de laminariales o 'kelps', compuestos por especies estructurantes de algas pardas que albergan gran diversidad de fauna y flora, están siendo sustituidos por sistemas tipo 'turf' con una estructura tridimensional mucho menor, y, con las implicaciones que esto conlleva en términos de funcionalidad (Filbee-Dexter & Wernberg, 2018).

Esta pérdida generalizada de biodiversidad, motivada por los desplazamientos y la desaparición de ciertas especies en respuesta al aumento de las temperaturas o la acidificación de los océanos, ocurre al alterarse algunos de los procesos ecológicos esenciales de dichas especies. Son múltiples los estudios que han revisado y cuantificado los impactos sobre algunos de estos procesos, incluyéndose efectos negativos sobre la supervivencia, mecanismos reproductivos, procesos migratorios y fenología de todo tipo de organismos marinos (p. ej. Marbà *et al.*, 2015; Duarte *et al.*, 2018; Wernberg *et al.*, 2024). En términos fenológicos, uno de los principales impactos es la alteración en la estacionalidad de los ciclos de vida de algunas especies. En las costas atlánticas, se ha observado cómo los episodios primaverales de "bloom" fitoplanctónico se están adelantando y reduciendo su intensidad, mientras que los otoñales se retrasan y aumentan de intensidad como consecuencia del aumento de las temperaturas en combinación con cambios en otros factores como la radiación solar fotosintéticamente activa o los patrones de viento (González Taboada & Anadón, 2014). También ciertos procesos migratorios se están viendo alterados por el cambio climático como, por ejemplo, los del atún rojo (*Thunnus thynnus*) que llega a los caladeros del Golfo de Vizcaya con un promedio de una a dos semanas de antelación (Dufour *et al.*, 2010). En muchas situaciones es difícil atribuir los efectos negativos únicamente al aumento de las temperaturas. En el caso de *Gelidium corneum*, una especie de alto interés ecológico y comercial, los declives poblacionales observados parecen estar relacionados con una combinación de factores. Estos incluyen el aumento de las temperaturas, la disponibilidad de luz y el aumento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos de oleaje que afectan al desarrollo de los individuos adultos, pero también tienen impactos negativos sobre los mecanismos de reproducción (Quintano *et al.*, 2017; Borja *et al.*, 2018; Sainz-Villegas *et al.*, 2023).

Estos cambios en los ecosistemas marinos pueden llegar a afectar a otros sectores relevantes, siendo el pesquero uno de los principalmente afectados. Los cambios en los patrones migratorios, así como la disminución de la productividad reducen significativamente el número de capturas lo que provoca una disminución en la producción de alimentos y por tanto fluctua-



ciones en los precios de venta. Sin embargo, la pesca no es el único servicio ecosistémico de aprovisionamiento afectado negativamente por el aumento de las temperaturas. Otros ejemplos incluyen la acuicultura directa en el mar, especialmente la de bivalvos en las rías de Galicia, o la producción de agar-agar a partir del alga agarofítica *Gelidium corneum* en el Mar Cantábrico. Mas allá de los servicios de aprovisionamiento, la degradación y/o desaparición de hábitats también puede generar una pérdida importante de los servicios de protección costera brindado por estructuras naturales como arrecifes, bosques de macroalgas o praderas de fanerógamas (Ondiviela *et al.*, 2014). Esto a su vez puede desencadenar una serie de consecuencias sociales, especialmente en aquellas comunidades con un elevado grado de dependencia de estos recursos naturales, llegando a disminuir la calidad de vida de la comunidad como consecuencia de la escasez del recurso, siempre y cuando no existan alternativas de adaptación. Todos estos impactos pueden verse agravados además por otros factores de riesgo subyacente, como la necesidad de expansión o adaptación de ciertos sectores económicos o tecnológicos, o el desarrollo de nuevas políticas en materia pesquera o de gestión del gasto en conservación.



Ficha 4. Análisis del riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano.

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5°C)	Medio plazo 2041-2060 (2°C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4°C)
Severidad del impacto	Sustancial	Sustancial	Crítica	Crítica
	La degradación de los hábitats clave mencionados en el texto afecta a miles de hectáreas dentro del territorio nacional, parte dentro de espacios protegidos. Esto provoca migraciones y cambios distribucionales a diferentes escalas.	Aunque no se han identificado estudios específicos agregados a nivel nacional, los estudios centrados en procesos ecológicos esenciales apuntan a una continuación en el proceso de degradación de los hábitats. A pesar de que es difícil de cuantificar, seguirá afectando a miles de hectáreas. Mecanismos de plasticidad fenotípica, pueden proporcionar cierta resiliencia de forma temporal.	No existen estudios agregados a nivel nacional que incluyan los escenarios climáticos actualizados del AR6. La percepción del riesgo es significativa teniendo en cuenta que, en España, muchas especies clave ya se encuentran próximas a sus límites de tolerancia térmica. Un nivel de calentamiento de 2°C a Medio plazo, supondrá traspasar dichos límites, y por tanto, la alteración de decenas de miles de hectáreas de hábitats costeros.	Aumenta la incertidumbre, pero se mantienen las tendencias descritas para el Medio plazo.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Severidad y nivel de confianza				
Horizontes temporales y estimaciones de niveles de calentamiento	Actual	Corto plazo 2021-2040 (1,5 °C)	Medio plazo 2041-2060 (2 °C)	Largo plazo 2081-2100 (3-4 °C)
Nivel de confianza:	Alto ◆◆◆	Medio ◆◆	Bajo ◆	Bajo ◆
· Calidad de las evidencias · Consenso científico	· Alta · Alto	· Media · Medio	· Baja · Medio	· Baja · Medio
	Las evidencias presentadas en el texto son suficientes para considerar que existe consenso, y con un nivel de confianza alto de que el cambio climático está generando una alteración de los hábitats y una regresión en la distribución de muchas especies clave en todo el territorio nacional.	Aunque las proyecciones de los modelos climáticos son a corto plazo, generalizar a todo el territorio es complejo debido a la heterogeneidad de las características intrínsecas de las especies y poblaciones. Muchas de los estudios no están actualizados a los escenarios actuales, lo que reduce el nivel de confianza.	Muchos de los estudios existentes no están actualizados a los escenarios actuales del AR6. La incertidumbre sobre la evolución de los procesos de redistribución aumenta a Medio plazo.	Aumenta la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático, y por tanto, en los modelos de distribución. Además, muchos estudios no están actualizados a los escenarios actuales. Se mantiene el consenso científico general en la dirección de cambio, aunque aumenta la incertidumbre a largo plazo en el desarrollo del proceso de redistribución de especies.
Peligros		Exposición	Vulnerabilidad	
Componentes del riesgo	Aumento de la temperatura de la superficie del mar y descenso del pH de los océanos (acidificación).	Hábitats marinos y los organismos que los integran, tanto en el medio pelágico como bentónico, incluyendo especies formadoras de hábitat, mamíferos, reptiles, aves marinas, invertebrados y peces.	La vulnerabilidad viene determinada por factores intrínsecos de las propias especies y hábitats, como resistencia y/o resiliencia frente a perturbaciones o su capacidad de adaptación; y por factores extrínsecos, como el grado de conservación de los hábitats, la presencia de eventos (presentes o pasados) de sobreexplotación del recurso natural o la presencia de especies exóticas invasoras.	

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Aspectos transversales

Transfronterizos	La componente transfronteriza asociada a este riesgo es relevante puesto que el desplazamiento de especies es un impacto que ocurre a nivel global. Por ejemplo, las alteraciones en procesos migratorios no necesariamente ocurren como consecuencia de los cambios registrados en la región en la que se manifiestan, y, por tanto, es necesario abordar este riesgo de forma coordinada. La Unión Europea trata de promover la cooperación entre estados en materia de conservación de hábitats a través de políticas integradas como la Estrategia de la UE sobre biodiversidad para 2030 (Comisión Europea, 2020) o la Directiva relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (Directiva 2014/52/UE Del Parlamento Europeo y Del Consejo, de 16 de Abril de 2014, por la que se modifica la Directiva 2011/92/UE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente., 2014).
Territoriales	Los impactos derivados de este riesgo ocurren de manera desigual en el territorio español dada la variabilidad climática de España. Se puede considerar que las regiones del sur son potencialmente más vulnerables dado que registran las mayores temperaturas, y por tanto, están más próximas a los límites de tolerancia que definen los rangos de distribución. También es importante considerar que existen zonas que actúan a modo de refugios climáticos para determinadas especies, como, por ejemplo, las regiones de la cornisa atlántica en el norte de España gracias a la influencia del afloramiento de agua fría rica en nutrientes.
Sociales	Incremento de la vulnerabilidad de hogares con menor capacidad de recuperación económica, especialmente aquellos ligados a actividades primarias dependientes de recursos naturales o al turismo.
Maladaptación	El conocimiento existente acerca de la efectividad de medidas de recuperación o restauración de hábitats en el medio marino es limitado y a corto plazo, lo que genera incertidumbre en la viabilidad a largo plazo de dichas medidas.
Género	Los estudios disponibles en general no integran el enfoque de género con respecto a este riesgo.

Otros aspectos analizados

Umbral críticos	Establecer umbrales críticos para cada especie o hábitat en riesgo es una tarea complicada, ya que en muchos casos estos umbrales están condicionados por interacciones complejas de múltiples factores, y no solo responden al aumento de las temperaturas o la bajada del pH. Sin embargo, es posible desarrollar aproximaciones matemáticas a modo de curvas de tolerancia, que establecen mediante modelado relaciones entre los datos procedentes de observaciones o ensayos experimentales y los factores ambientales/climáticos de interés (p. ej. de la hoz <i>et al.</i> , 2019). En estas aproximaciones es importante tener en cuenta que la flexibilidad en las respuestas puede variar entre poblaciones de una misma especie, apareciendo adaptaciones locales a las condiciones del entorno.
-----------------	---

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Lock-in/Bloqueo	Existen factores socioculturales y de gobernanza dentro del sector pesquero, que pueden llevar a decisiones que impliquen una continuación de la pesca de determinadas especies y la pesca en determinados caladeros específicos a pesar de que se estén registrando impactos negativos sobre los mismos. El desplazamiento de especies genera, como hemos mencionado, una redistribución de la biodiversidad y afecta directamente a las figuras de protección establecidas hasta la fecha. La falta de flexibilidad a la hora de modificar los límites y objetivos de dichas figuras de protección en respuesta a las dinámicas climáticas puede suponer otro factor de bloqueo. En zonas costeras, la presencia de infraestructuras o la existencia de concesiones para diferentes actividades puede limitar la capacidad de adaptación de los hábitats.
Planes o medidas en curso de gestión del riesgo	Se han desarrollado diferentes estrategias y planes a nivel comunitario (UE) que abordan en cierta medida algunos de los impactos mencionado como la Estrategia de Biodiversidad de la UE para 2030 (2020), la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático (2021) o el Pacto Verde Europeo (2019). A nivel nacional, aunque de forma genérica, también existen ejemplos de normativa relacionada con el desarrollo de medidas para hacer frente al impacto del cambio climático sobre los hábitats marinos. Estos incluyen el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC, 2020), la Estrategia de Infraestructura Verde y de la Conectividad y Restauración Ecológicas (2021) y, por último, la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (2021). A nivel costero, existe la Estrategia para la Adaptación de la Costa al Cambio Climático (2017), aunque está centrada principalmente en medidas de protección frente a la subida del nivel del mar y la erosión costera.
Gobernanza de gestión del riesgo	La gobernanza de gestión para este riesgo está dividida en tres niveles administrativos: nacional, autonómico y local. A nivel nacional, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), a través de la Dirección General de la Costa y el Mar (DGCm), sería la responsable del desarrollo de políticas de conservación de la biodiversidad en el medio marino. A nivel autonómico, las comunidades, aunque limitadas, también tienen competencias en la costa, principalmente en materia de ordenación territorial que indirectamente puede tener efectos a la hora de gestionar el riesgo sobre hábitat costeros. Por último, a nivel local los ayuntamientos responsables de la gestión de playas y otros enclaves, con implicaciones en el desarrollo e implementación de medidas.
Beneficios de medidas de adaptación futuras	La creación de figuras de protección que consideren los impactos del cambio climático en el desarrollo de sus objetivos, y garanticen una cierta flexibilidad frente a los mismos, contribuye a reducir presiones externas sobre los sistemas naturales, mejorando su conservación y garantizando la conectividad entre hábitats. En este sentido es importante identificar y proteger los refugios climáticos. Por otro lado, las medidas de restauración activa de hábitats permiten recuperar determinadas zonas perturbadas por factores ajenos al cambio climático, mejorando la conectividad, y aumentando así la resistencia y resiliencia de los hábitats frente a los impactos promovidos por el clima. Del mismo modo, la restauración de determinados hábitats contribuye a mejorar diferentes servicios ecosistémicos como la protección costera. La diversificación de la pesca es otra posible medida de adaptación que contribuye a reducir las presiones adicionales sobre aquellas poblaciones en declive como consecuencia del aumento de las temperaturas, así como a aumentar la resiliencia económica de la actividad.

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

Otros aspectos analizados	
Afección a/de descarbonización o neutralidad climática	<p>El impacto del riesgo en la descarbonización es negativo puesto que el desplazamiento de especies o la desaparición de determinados hábitats, especialmente aquellos relevantes desde el punto de vista del ciclo del carbono (p. ej. praderas marinas), reduce el potencial natural de secuestro de carbono. Por el contrario, la descarbonización tiene un impacto positivo en el riesgo al reducirse la presión sobre los sistemas marinos, aumentando los márgenes de adaptación.</p>
Déficits de información	<p>No se dispone de información actualizada, homogénea y detallada de la distribución de muchos organismos marinos, por lo que cuantificar los impactos del aumento de las temperaturas o de la acidificación en términos de desplazamientos de una forma generalizada puede ser complejo.</p> <p>Falta información acerca de los umbrales de tolerancia de muchas especies, así como del alcance de los mecanismos de adaptación y plasticidad fenotípica.</p> <p>La información sobre la capacidad de recuperación de ciertas especies y/o hábitats frente a las perturbaciones climáticas es escasa.</p> <p>La complejidad de las interacciones entre peligros climáticos y otros factores externos, como los antrópicos, dificulta el análisis debido en muchos casos a la falta de datos.</p>
Recomendaciones de priorización	<p>Requiere planificación y preparación de respuestas en un horizonte temporal cercano. Requiere una evaluación más detallada y estudios complementarios. Se puede abordar principalmente dentro de un único ámbito de la gestión pública.</p>



5. Análisis de riesgos complejos

Los riesgos climáticos no operan de forma aislada, sino que están profundamente interconectados. Una aproximación exclusivamente sectorial de los riesgos limita la comprensión de estas interacciones y dificulta la identificación de efectos en cascada que trascienden los límites de cada sector. Con este objetivo, se ha desarrollado un análisis específico de **riesgos complejos** (véase capítulo Riesgos Complejos), orientado a identificar conexiones críticas entre sectores, dependencias cruzadas y posibles efectos en cascada, contribuyendo así a una planificación de la adaptación más robusta y coherente. Para abordar esta complejidad se ha desarrollado un modelo basado en teoría de grafos. Esta herramienta matemática permite representar sistemas compuestos por elementos relacionados entre sí. Cada nodo del grafo representa un riesgo clave identificado, y las conexiones (aristas dirigidas) indican cómo unos riesgos influyen en otros. Este enfoque permite visualizar la estructura del sistema, identificar nodos (riesgos) principales y calcular métricas que ayudan a entender el papel de cada riesgo. Así, el grado de salida señala los riesgos con mayor capacidad de generar impactos; el grado de entrada identifica aquellos más vulnerables a influencias externas; la denominada “centralidad de cercanía” muestra la rapidez con la que un riesgo puede verse afectado por el resto del sistema; y, finalmente, la “centralidad de intermediación” revela los riesgos que actúan como puentes en la propagación de efectos.

En el grafo de interdependencias (**Figura 11**), el **RC6.2 Riesgo de inundación o daños directos a personas, activos naturales y económicos por el aumento de la intensidad y frecuencia de eventos extremos de nivel del mar, viento y oleaje** aparece como nodo central (en negro) con grado de salida 13 y grado de entrada 2. Es decir, aunque depende de dos riesgos previos, actúa principalmente como amplificador sistémico que propaga sus efectos al resto del entramado de riesgos. Las flechas azules que irradian desde el nodo central ilustran esa capacidad de contagio hacia múltiples ámbitos; la red de conexiones grises refleja, además, las interacciones secundarias entre los riesgos afectados. La figura pone de manifiesto, en suma, que la peligrosidad costera asociada a temporales marinos no se agota en el dominio físico, sino que desencadena consecuencias encadenadas en otros sectores.

Dentro del sector de Costas y Medio Marino, el RC6.2 intensifica la pérdida permanente de superficie emergida por inundación y erosión ligada al aumento del nivel medio del mar (RC6.1) y condiciona la funcionalidad y operatividad de las infraestructuras de protección y portuarias (RC6.3),



con relaciones de realimentación que refuerzan el problema cuando se degradan defensas o se alteran los balances sedimentarios. Sus impactos se proyectan también sobre otros sectores. En Patrimonio Natural, contribuye a la pérdida de biodiversidad por acumulación de impactos climáticos (RC3.1) y a la degradación de servicios ecosistémicos por alteraciones funcionales (RC3.4). En el ámbito de la Ciudad, aumenta el daño a personas, edificaciones e infraestructuras urbanas (p. ej., saneamiento, drenaje, energía y transporte) (RC7.1) y favorece interrupciones o desabastecimientos de servicios básicos durante episodios extremos (RC7.2). En Transporte, reduce la operatividad portuaria y eleva el riesgo de daños (RC10.1). En Industria y Servicios, incrementa la exposición y el daño en instalaciones críticas (RC11.1). En Turismo, acelera la pérdida o degradación de recursos naturales que sostienen la actividad (RC12.3). En el sistema financiero, puede motivar correcciones de precios de activos (RC13.1), contracción de la actividad financiera en territorios altamente perturbados (RC13.2) y mayores compensaciones por pérdidas aseguradas, incluido el ramo agrario, ante inundaciones y otros extremos (RC13.4). Finalmente, en Paz, Seguridad y Cohesión Social, contribuye a la degradación de medios de vida y subsistencia cuando los impactos se acumulan (RC14.1). Esta lectura integrada subraya la centralidad del RC6.2 como vector de riesgo intersectorial: un nodo con dependencia moderada de factores previos, pero con gran capacidad de propagación hacia riesgos ambientales, urbanos, económicos y sociales.

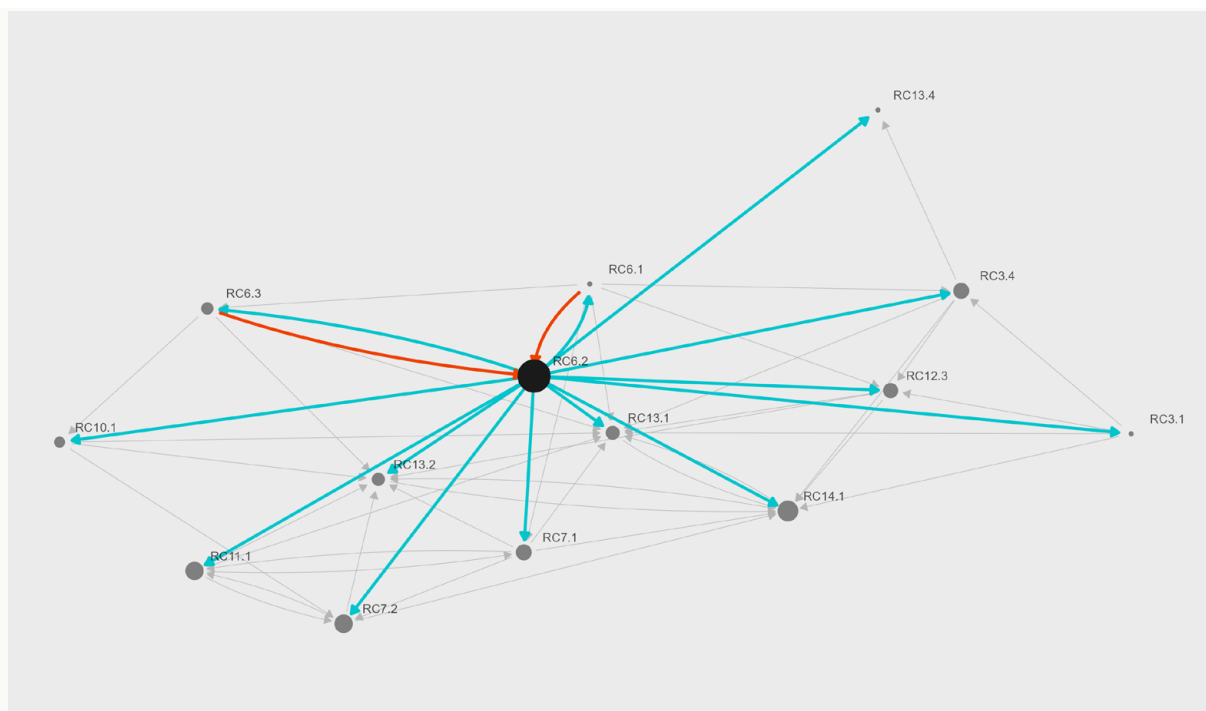


Figura 11. Grafo del RC6.2 Riesgo de inundación o daños directos a personas, activos naturales y económicos por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, viento y oleaje extremos. Fuente: Capítulo de Riesgos complejos (ver nota al pie 10).



Tabla 3 Clasificación de métrica según el análisis de riesgos complejos en el sector Costas y Medio Marino

Riesgo Clave	Grado de entrada	Grado de salida	Intermediación	Cercanía
<i>RC6.1 Riesgo de pérdida permanente de superficie emergida en la costa, por inundación y erosión, debido al aumento del nivel medio del mar relativo</i>	Bajo ▼	Bajo ▼	Alto ▲	Media ▬
<i>RC6.2 Riesgos de inundación o daños directos a personas, activos naturales y económicos por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, viento y oleaje extremos¹⁰</i>	Bajo ▼	Alto ▲	Bajo ▼	Alto ▲
<i>RC6.3 Riesgo de pérdida de funcionalidad u operatividad de infraestructuras de protección y portuarias por aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos</i>	Bajo ▼	Baja ▼	Baja ▼	Media ▬
<i>RC6.4 Riesgo de desplazamiento o desaparición de hábitat y/o de especies marinas por incremento de la temperatura superficial del mar y la acidificación del océano</i>	Bajo ▼	Baja ▼	Baja ▼	Media ▬

¹⁰ La denominación de este riesgo ha variado desde que se llevó a cabo el análisis de los riesgos complejos, correspondiéndose en este caso con el RC6.2 Riesgos de daños directos a personas, activos naturales y económicos por inundación debido al aumento de la intensidad y frecuencia de los eventos de nivel del mar, oleaje y viento extremos.



6. Caso de estudio

El caso de estudio Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en la Costa (PIMA Adapta-Costas) ha sido seleccionado con un propósito ilustrativo, aportando un ejemplo concreto de evaluación de riesgos climáticos dentro del ámbito de Costas y Medio Marino. Los casos de estudio sectoriales, en su mayoría facilitados por comunidades autónomas, permiten mostrar enfoques aplicados, avances metodológicos y herramientas de diagnóstico desarrolladas en distintos sectores y contextos locales, y reflejan la diversidad territorial y temática del país. Lejos de constituir una recopilación exhaustiva, su inclusión busca enriquecer el análisis nacional mediante la exposición de buenas prácticas y aprendizajes relevantes, favoreciendo así la transferencia de conocimiento y la identificación de experiencias innovadoras en la gestión y evaluación de riesgos climáticos.

Plan de impulso al medio ambiente para la adaptación al cambio climático en la costa (PIMA ADAPTA-COSTAS)

Objeto

- El Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en la Costa (PIMA Adapta-Costas) tiene como objeto principal impulsar la adaptación de los sistemas costeros españoles al cambio climático, dotando a las comunidades autónomas litorales de los recursos necesarios para evaluar riesgos climáticos de carácter socioeconómico y ambiental. Su finalidad es sentar una base técnica y metodológica común para analizar la vulnerabilidad del litoral español ante la subida del nivel del mar y eventos extremos de erosión e inundación costera más frecuentes, contribuyendo a la planificación de medidas de adaptación eficaces en el marco de la Estrategia de Adaptación de la Costa Española al Cambio Climático.

Descripción:

- A través del PIMA Adapta Costas, se transfirieron recursos económicos a las comunidades autónomas costeras, con una dotación global de aproximadamente 4 millones de euros, para financiar



Ámbito Territorial:

- Todas las comunidades autónomas costeras del territorio nacional.

Sector(es)/subsector:

- Costas y Medio Marino.

Entidad(es) del proyecto:

- Oficina Española de Cambio Climático (gestión de fondos y supervisión), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (coordinación y recopilación de bases de datos), gobiernos regionales (receptores de fondos) y centros de investigación o tecnológicos y empresas consultoras (ejecutores de los proyectos).

SIGUE EN LA PRÓXIMA PÁGINA >>



<< VIENE DE LA PÁGINA ANTERIOR

la elaboración de estudios regionales de evaluación de riesgos climáticos y desarrollar visores cartográficos que integrasen la información generada. Cada comunidad autónoma debía presentar sus informes finales y visores antes de finalizar 2018, de acuerdo con los compromisos asumidos en la Conferencia Sectorial. Los trabajos técnicos incluyeron la caracterización del riesgo climático sobre los sistemas socioeconómicos y naturales, considerando tanto la inundación permanente asociada al ascenso del nivel del mar como la inundación por eventos extremos. Asimismo, se analizaron los procesos de erosión de playas y los impactos sobre ecosistemas costeros y marinos. Entre los productos generados se incluyen mapas de riesgo, identificación de tramos costeros críticos y recomendaciones para la planificación territorial y la adaptación. El estudio piloto desarrollado en el Principado de Asturias estableció las bases metodológicas para garantizar la comparabilidad de los resultados entre comunidades autónomas y facilitar su integración en futuras estrategias nacionales de adaptación.

Aspectos destacables

- Entre los aspectos más relevantes del PIMA Adapta-Costas destaca su carácter pionero como programa que ha permitido disponer, por primera vez, de análisis del riesgo del cambio climático en la costa de alta resolución para prácticamente todo el litoral español. Esta capacidad de generar conocimiento técnico específico por tramos de costa ha fomentado la mejora de la planificación y gestión del riesgo en el ámbito regional. Además, el programa impulsó la colaboración entre administraciones autonómicas y el Estado, sirviendo de base para que cada comunidad autónoma adaptara la metodología a su propia realidad territorial. No obstante, la diversidad de enfoques, variables climáticas, sectores y subsectores considerados y formatos de los visores resultantes pone de manifiesto la necesidad de reforzar la armonización y la interoperabilidad de los estudios, con el fin de disponer de una visión integral y coherente del riesgo costero a escala nacional.

Escala:

- Regional.

Riesgo(s):

- El programa PIMA Adapta-Costas adoptó un enfoque multisectorial, considerando riesgos de inundación y erosión por el aumento del nivel medio del mar y eventos extremos sobre sectores socioeconómicos como la vivienda, la industria, la agricultura o el turismo, así como la pérdida de hábitats y especies naturales debido a la inundación, la subida de la temperatura superficial y la acidificación del mar.

Enlaces a los visores disponibles:

- <http://portalrediam.cica.es/mapea/PIMA/riesgos/> (Andalucía).
- <http://mapas.cantabria.es/> (Cantabria).
- <http://visors.icgc.cat/PIMA-AdaptaCostas> (Cataluña).
- <http://geoadaptacostes.gva.es/> (Comunidad Valenciana).
- <http://experience.arcgis.com/experience/2d36958630024f2bb1f1611d0864b8b4> (Galicia).
- http://ideib.caib.es/impactes_costa_canvi_climatic/es/ (Islas Baleares).
- <http://grafcan1.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=a1bc45dd09994ac1979479fcff4db989> (Islas Canarias).
- <http://gis.ihobe.eus/kostaegoki/> (País Vasco).
- <http://c3e-asturias.ihcantabria.com> (Principado de Asturias).
- <http://pimamurcia.ihcantabria.es/visor/> (Región de Murcia).



7. Limitaciones y particularidades metodológicas del sector

El objetivo del Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático en la Costa, conocido como PIMA Adapta-Costas, fue dotar a las comunidades autónomas costeras de los recursos necesarios para desarrollar estudios sobre la evaluación de riesgos climáticos socioeconómicos y naturales en su litoral, como parte de la Estrategia de Adaptación de la Costa Española al Cambio Climático. Para ello, se transfirieron créditos con cargo al programa PIMA Adapta-Costas, bajo la premisa de trabajar con una base común de información climática, pero permitiendo incorporar datos locales de alta resolución y metodologías adaptadas a cada territorio.

El estudio piloto se desarrolló en el Principado de Asturias, a través del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, y sirvió de referencia metodológica para el resto de las comunidades autónomas costeras. A partir de este marco común, cada región elaboró sus informes y visores cartográficos, aplicando metodologías propias adaptadas a su contexto territorial. El análisis comparado de los trabajos revela diferencias sustanciales en los enfoques utilizados, el grado de integración entre inundación y erosión, el tratamiento de la vulnerabilidad socioeconómica y ecológica, y la profundidad del análisis sectorial. También varía la calidad cartográfica y la accesibilidad de los visores generados.

En cuanto al tratamiento de la peligrosidad física, algunas comunidades (País Vasco, Baleares) se centraron únicamente en la subida del nivel medio del mar, mientras que otras (Canarias, Cantabria, Murcia) incorporaron un conjunto más amplio de variables climáticas, como oleaje, temperatura superficial del mar o caudales fluviales. Los enfoques utilizados para el modelado de la inundación costera también varían sustancialmente: desde métodos simples tipo *bathtub* (Baleares, Cataluña) hasta modelos de procesos basados en ecuaciones hidráulicas y proyecciones climáticas (Canarias, Cantabria, Comunidad Valenciana y Murcia). Por ejemplo, Cantabria integró el efecto combinado de inundación y erosión costera, tal y como se muestra en el ejemplo de la **Figura 12**, así como un índice de peligrosidad dunar, mientras que Galicia aplicó métodos clásicos de análisis de playas sin considerar la vulnerabilidad ni el riesgo de forma explícita.



Figura 12. Inundación costera producida durante el temporal del 3 de marzo de 2014 considerando la playa de Somo en situación de máxima erosión. Fuente: PIMA Adapta-Cantabria (IHCantabria, 2021a).

La evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo muestra igualmente enfoques dispares. En regiones como Cataluña o Galicia, estos aspectos no fueron tratados de forma explícita, mientras que, en otras, como Canarias, Cantabria y Murcia, se desarrollaron índices integrados avanzados, diferenciados por sectores. En este sentido, Canarias destacó por la alta resolución del modelado, el cálculo de riesgo con ponderación sectorial y la identificación de *hotspots*, siguiendo la metodología del piloto en Asturias. Por el contrario, en Andalucía el análisis se centró en el sistema natural, con buena representación cartográfica, pero una caracterización socioeconómica limitada, y Baleares no incluyó una evaluación del sistema natural. La Comunidad Valenciana aplicó un modelo detallado para L'Albufera, aunque sin curvas de daño. Finalmente, la mayor parte de los visores cartográficos difieren notablemente en formato, resolución y funcionalidad, lo que limita su interoperabilidad y dificulta la visualización integrada de riesgos a escala nacional.

Si bien el programa PIMA Adapta-Costas ha representado un avance sin precedentes en el diagnóstico del riesgo climático costero a escala autonómica y nacional, el análisis comparado de los



trabajos revela una importante heterogeneidad en los enfoques metodológicos, el tratamiento de los sectores y sistemas evaluados, y la calidad y accesibilidad de los visores generados. Esta variabilidad limita la comparabilidad directa entre regiones y reduce el potencial de integración en una estrategia estatal coherente. Entre las principales lecciones extraídas de esta experiencia destaca la necesidad de establecer criterios mínimos comunes para futuros ejercicios, que incluyan metodologías armonizadas, escenarios climáticos homogéneos, estructuras de datos interoperables y mecanismos que favorezcan la actualización dinámica de la información, con el fin de facilitar análisis comparativos y apoyar de forma más efectiva la planificación y gestión de la adaptación al cambio climático en la costa.



8. Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global environmental change*, 16(3), 268-281.
- Adger, W. N., Safra de Campos, R., Siddiqui, T., Franco Gavonel, M., Szaboova, L., Rocky, M. H., Alam Bhuiyam, M. R. and Billah, T. (2021). Human security of urban migrant populations affected by length of residence and environmental hazards, *Journal of Peace Research*, 58(1), 50–66.
- Agulles, M., Jordà, G., & Lionello, P. (2021). Flooding of sandy beaches in a changing climate. The case of the Balearic Islands (NW Mediterranean). *Frontiers in Marine Science*, 8, 760725.
- Almazan-Benítez, B. D. R., Esteller-Alberich, M. V., Renau-Pruñonosa, A., & Expósito-Castillo, J. L. (2024). Simulation of Seawater Intrusion and Upconing Processes in Mediterranean Aquifer in Response to Climate Change (Plana de Castellón, Spain). *Hydrology*, 11(12), 205.
- Altamirano, M., De La Rosa, J., Martínez, F.J. 2016. Arribazones de la especie exótica *Rugulopteryx okamurae* (E.Y. Dawson) I.K. Hwang, W.J. Lee and H.S. Kim (Dictyotales, Orchrrophyta) en el Estrecho de Gibraltar: primera cita para el Atlántico y España. *ALGAS* 52: 20.
- Alvarado-Aguilar, D., Jiménez, J. A., & Nicholls, R. J. (2012). Flood hazard and damage assessment in the Ebro Delta (NW Mediterranean) to relative sea level rise. *Natural Hazards*, 62, 1301-1321.
- Amores, A., Marcos, M., Carrió, D. S., & Gómez-Pujol, L. (2020). Coastal impacts of Storm Gloria (January 2020) over the north-western Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(7), 1955-1968.
- Angulo, E., Ballesteros-Mejía, L., Novoa, A., Duboscq-Carra, V. G., Diagne, C., & Courchamp, F. (2021). Economic costs of invasive alien species in Spain. *NeoBiota*, 67, 267-297.
- Arabadzhyan, A., Figini, P., García, C., González, M. M., Lam-González, Y. E., & León, C. J. (2021). Climate change, coastal tourism, and impact chains—a literature review. *Current Issues in Tourism*, 24(16), 2233-2268.
- Ariza, E., Ballester, R., Rigall-I-Torrent, R., Saló, A., Roca, E., Villares, M., ... & Sardá, R. (2012). On the relationship between quality, users' perception and economic valuation in NW Mediterranean beaches. *Ocean & Coastal Management*, 63, 55-66.
- Arriaga, O., Wawrzynkowski, P., Muguerza, N., Díez, I., González, J., Gorostiaga, J. M., Quintano, E., & Becerro, M. A. (2024). Thermal refugia reinforce macroalgal resilience against climate change in the southeastern Bay of Biscay. *Global Change Biology*, 30(8), e17481.
- Baena Ruiz, L., Pulido-Velazquez, D., Renau-Pruñonosa, A., Morell, I., Llopis-Albert, C., Collados-Lara, A. J., & Senent-Aparicio, J. (2017). An Index-Based Method to Assess Impacts of Global Change on Seawater Intrusion Problems. *Environmental Earth Sciences*. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-69355-2. ISSN: 2199-9155.
- Ballesteros, C., Jiménez, J. A., & Viavattene, C. (2018). A multi-component flood risk assessment in the Maresme coast (NW Mediterranean). *Natural Hazards*, 90, 265-292.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81(2), 169-193.



- Barrios-Crespo, E., Torres-Ortega, S., & Díaz-Simal, P. (2023). Are We Underestimating the Risk of Coastal Flooding in Europe? The Relevance of Critical Infrastructure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2146.
- Becker, A., Ng, A. K., McEvoy, D., & Mullett, J. (2018). Implications of climate change for shipping: Ports and supply chains. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 9(2), e508.
- Bergillos, R. J., López-Ruiz, A., Ortega-Sánchez, M., Masselink, G., & Losada, M. A. (2016). Implications of delta retreat on wave propagation and longshore sediment transport-Guadalejo case study (southern Spain). *Marine Geology*, 382, 1-16.
- Betts, R.A., Brown, K., 2021. The Third UK Climate Change Risk Assessment Technical Report.
- Bonachea, J., Remondo, J., & Rivas, V. (2024). Estuaries in Northern Spain: An Analysis of Their Sedimentation Rates. *Sustainability*, 16(16), 6856.
- Borja, A., Chust, G., Fontán, A., Garmendia, J. M., & Uyarra, M. C. (2018). Long-term decline of the canopy-forming algae *Gelidium corneum*, associated to extreme wave events and reduced sunlight hours, in the southeastern Bay of Biscay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 205, 152-160.
- C3S (2022). European State of the Climate 2021. Copernicus Climate Change Service.
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., Roch-Talens, A., & Guillén, J. (2024). Satellite observations of storm erosion and recovery of the Ebro Delta coastline, NE Spain. *Coastal Engineering*, 188, 104451.
- CalvoManazza, M., ComasGonzález, R., FollanaBerná, G., PngGonzález, L., & Carbonell Quetglas, A. (2022). Informe: Evaluación de riesgos de especies alóctonas e invasoras en la Red Natura 2000 marina (Informe del proyecto LIFE IP INTEMARES, LIFE15 IPE/ES/000012). Instituto Español de Oceanografía (IEOCSIC)–Centro Oceanográfico de Baleares. Fundación Biodiversidad, MITECO.
- Campos, Á., García-Valdecasas, J. M., Molina, R., Castillo, C., Álvarez-Fanjul, E., & Staneva, J. (2019). Addressing long-term operational risk management in port docks under climate change scenarios—A Spanish case study. *Water*, 11(10), 2153.
- Casado-Amezúa, P., Araújo, R. M., Bárbara, I., Bermejo, R., Borja, A., Díez, I., Fernández, C., Gorostiaga, J. M., Guinda, X., Hernández, I., Juanes, J. A., Peña, V., Peteiro, C., Puente, A., Quintana, I., Tuya, F., Viejo, R. M., Altamirano, M., Gallardo, T., & Martínez, B. (2019). Distributional shifts of canopy-forming seaweeds from the Atlantic coast of Southern Europe. *Biodiversity and Conservation*, 28(5), 1151-1172.
- Cazenave, A., & Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15-34.
- CIIR (2023). Pla d'adaptació al canvi climàtic dels ports de Catalunya. Centre Internacional d'Investigació dels Recursos Costaners.
- Cissé, G., R. McLeman, H. Adams, P. Aldunce, K. Bowen, D. Campbell-Lendrum, S. Clayton, K.L. Ebi, J. Hess, C. Huang, Q. Liu, G. McGregor, J. Semenza, and M.C. Tirado, 2022: Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1041-1170.



- Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., ... & Unnikrishnan, A. S. (2013). Sea level change. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press.
- Chust, G., Caballero, A., Marcos, M., Liria, P., Hernández, C., & Borja, Á. (2010). Regional scenarios of sea level rise and impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87(1), 113-124.
- Collins, M. et al. (2019) Extremes, abrupt changes and managing risk. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)* (eds. Pörtner, H.-O. et al.) 68 pp. (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019).
- Cooley, S., D. Schoeman, L. Bopp, P. Boyd, S. Donner, D.Y. Ghebrehewet, S.-I. Ito, W. Kiessling, P. Martinetto, E. Ojea, M.-F. Racault, B. Rost, and M. Skern-Mauritzen, 2022: Oceans and Coastal Ecosystems and Their Services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 379–550, doi:10.1017/9781009325844.005.
- Costa, Y., Martins, I., de Carvalho, G. C., & Barros, F. (2023). Trends of sea-level rise effects on estuaries and estimates of future saline intrusion. *Ocean & Coastal Management*, 236, 106490.
- Couto, I., Picado, A., Des, M., López-Ruiz, A., Díez-Minguito, M., Díaz-Delgado, R., ... & Dias, J. M. (2024). Climate Change and Tidal Hydrodynamics of Guadalquivir Estuary and Doñana Marshes: A Comprehensive Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), 1443.
- CruzPérez, N., Santamarta, J. C., GamalloPaz, I., RodríguezMartín, J., & GarcíaGil, A. (2022). A comparison between carbon footprint of water production facilities in the Canary Islands: groundwater resources vs. seawater desalination. *Sustainable Water Resources Management*, 8, 121.
- De Alfonso, M., Lin-Ye, J., García-Valdecasas, J. M., Pérez-Rubio, S., Luna, M. Y., Santos-Muñoz, D., ... & Álvarez-Fanjul, E. (2021). Storm Gloria: sea state evolution based on in situ measurements and modeled data and its impact on extreme values. *Frontiers in Marine Science*, 8, 646873.
- de Andrés, M., Barragán, J. M., & Sanabria, J. G. (2017). Relationships between coastal urbanization and ecosystems in Spain. *Cities*, 68, 8-17.
- de Azevedo, J., Franco, J. N., Vale, C. G., Lemos, M. F. L., & Arenas, F. (2023). Rapid tropicalization evidence of subtidal seaweed assemblages along a coastal transitional zone. *Scientific Reports*, 13(1), 11720.
- de la Hoz, C. F., Ramos, E., Puente, A., & Juanes, J. A. (2019). Climate change induced range shifts in seaweeds distributions in Europe. *Marine Environmental Research*, 148, 1–11.
- de Sales Ribeiro, M. C. (2022). A pathological study of the potential threats to fish health in the Canary Islands (Doctoral dissertation).
- Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina, 2021: Water Cycle Changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210.



- Duarte, B., Martins, I., Rosa, R., Matos, A. R., Roleda, M. Y., Reusch, T. B. H., Engelen, A. H., Serrão, E. A., Pearson, G. A., Marques, J. C., Caçador, I., Duarte, C. M., & Jueterbock, A. (2018). Climate Change Impacts on Seagrass Meadows and Macroalgal Forests: An Integrative Perspective on Acclimation and Adaptation Potential. *Frontiers in Marine Science*, 5.
- Dufour, F., Arrizabalaga, H., Irigoien, X., & Santiago, J. (2010). Climate impacts on albacore and bluefin tunas migrations phenology and spatial distribution. *Progress in Oceanography*, 86(1), 283–290.
- Duncan McIntosh, R., & Becker, A. (2017). Seaport climate vulnerability assessment at the multi-port Scale: A review of approaches. *Resilience and risk: Methods and application in environment, cyber and social domains*, 205-224.
- Ebi, K. L., Vanos, J., Baldwin, J. W., Bell, J. E., Hondula, D. M., Errett, N. A., ... & Berry, P. (2021). Extreme weather and climate change: population health and health system implications. *Annual review of public health*, 42(1), 293-315.
- EEA European Environmental Agency (2024). European Climate Risk Assessment (Publication No. 01/2024). Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Elmer, F., Hoymann, J., DÜthmann, D., Vorogushyn, S., & Kreibich, H. (2012). Drivers of flood risk change in residential areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), 1641-1657.risk
- EscuderoGómez, L. A., GonzálezPérez, J. M., & LoisGonzález, R. C. (2022). Spatial and climate governance and policy to tackle the challenges of the Anthropocene: A critical analysis based on the paradigmatic tourism destination of Mallorca (Spain). *Climate*, 10(11), 175.
- FB Y MITECO. (2023). Resultados del proyecto LIFE INTEMARES: gestión de la Red Natura 2000 marina en España. Madrid: Fundación Biodiversidad, MITECO.
- Ferro-Azcona, H., Espinoza-Tenorio, A., Calderón-Contreras, R., Ramenzoni, V. C., País, M. D. L. M. G., & Mesa-Jurado, M. A. (2019). Adaptive capacity and social-ecological resilience of coastal areas: A systematic review. *Ocean & Coastal Management*, 173, 36-51.
- Filatova, T., Mulder, J. P. M., & Van der Veen, A. (2011). Coastal risk management: How to motivate individual economic decisions to lower flood risk. *Ocean & Coastal Management*, 54(2), 164–172.
- Filbee-Dexter, K., & Wernberg, T. (2018). Rise of Turfs: A New Battlefront for Globally Declining Kelp Forests. *BioScience*, 68(2), 64–76.
- Fox-Kemper, B. et al. Ocean, cryosphere and sea level change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Inter- governmental Panel on Climate Change* (eds. Masson-Delmotte, V. et al.) 1211–1362 (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021).
- Franco, J. N., Tuya, F., Bertocci, I., Rodríguez, L., Martínez, B., Sousa-Pinto, I., & Arenas, F. (2018). The 'golden kelp' *Laminaria ochroleuca* under global change: Integrating multiple eco-physiological responses with species distribution models. *Journal of Ecology*, 106(1), 47–58.
- García-Artola, A., Cearreta, A., Irabien, M. J., Leorri, E., Sanchez-Cabeza, J. A., & Corbett, D. R. (2016). Agricultural fingerprints in salt-marsh sediments and adaptation to sea-level rise in the eastern Cantabrian coast (N. Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 171, 66-76.
- García-Romero, L., Delgado-Fernández, I., Hesp, P. A., Hernández-Calvento, L., Hernández-Cordero, A. I., & Viera-Pérez, M. (2019). Biogeomorphological processes in an arid transgressive dunefield as indicators of human impact by urbanization. *Science of the Total Environment*, 650, 73-86.



- Garrote, J., Díaz-Álvarez, A., Nganhane, H. V., & Garzón Heydt, G. (2018). The severe 2013–14 winter storms in the historical evolution of Cantabrian (Northern Spain) beach-dune systems. *Geosciences*, 8(12), 459.
- Glavovic, B.C., R. Dawson, W. Chow, M. Garschagen, M. Haasnoot, C. Singh, and A. Thomas, 2022: Cross-Chapter Paper 2: Cities and Settlements by the Sea. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C.Roberts, M.Tignor, E.S.Poloczanska, K.Mintenbeck, A.Alegría, M.Craig, S.Langsdorf, S.Löschke, V.Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2163–2194, doi:10.1017/9781009325844.019.
- González Taboada, F., & Anadón, R. (2014). Seasonality of North Atlantic phytoplankton from space: impact of environmental forcing on a changing phenology (1998–2012). *Global Change Biology*, 20(3), 698–712.
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J. A., & Williams, A. T. (2018). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & coastal management*, 156, 277–289.
- GRAFCAN (2022). Análisis de riesgos costeros ante el cambio climático en las Islas Canarias. PIMA Adapta-Canarias.
- Gobierno del Principado de Asturias (2021). Plan de adaptación al cambio climático de los puertos autonómicos del Principado de Asturias.
- Gopalakrishnan, T., Hasan, M. K., Haque, A. S., Jayasinghe, S. L., & Kumar, L. (2019). Sustainability of coastal agriculture under climate change. *Sustainability*, 11(24), 7200.
- Haines, A., Kovats, R. S., Campbell-Lendrum, D., & Corvalán, C. (2006). Climate change and human health: impacts, vulnerability and public health. *Public health*, 120(7), 585–596.
- Hanson, S., Nicholls, R., Ranger, N., Hallegatte, S., Corfee-Morlot, J., Herweijer, C., & Chateau, J. (2011). A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. *Climatic change*, 104, 89–111.
- Hernández, M. M. G., Leon, C. J., García, C., & Lam-González, Y. E. (2023). Assessing the climate-related risk of marine biodiversity degradation for coastal and marine tourism. *Ocean & Coastal Management*, 232, 106436.
- Hindsley, P., & Yoskowitz, D. (2020). Global change—Local values: Assessing tradeoffs for coastal ecosystem services in the face of sea level rise. *Global Environmental Change*, 61, 102039.
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., ... & Zhang, Y. (2019). High Mountain Areas. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Hodapp, D., Roca, I. T., Fiorentino, D., Garilao, C., Kaschner, K., Kesner-Reyes, K., ... & Froese, R. (2023). Climate change disrupts core habitats of marine species. *Global Change Biology*, 29(12), 3304–3317.
- Ibáñez, C., Day, J. W., & Reyes, E. (2014). The response of deltas to sea-level rise: natural mechanisms and management options to adapt to high-end scenarios. *Ecological Engineering*, 65, 122–130.
- ICGC (2018). LIFE EBRO-ADMICLIM: Adaptación y mitigación del cambio climático en el delta del Ebro. 2014–2018. ICGC/IRTA.
- ICGC (2021). Informe de riscos a la costa catalana enfront del canvi climàtic (projecte PIMA Adapta Costas). PIMA Adapta-Cataluña.



- IHCantabria (2017). Asistencia Técnica a la elaboración de un estudio sobre la adaptación al cambio climático de la costa del Principado de Asturias. PIMA Adapta-Asturias (piloto).
- IHCantabria (2021a). Análisis de los riesgos del cambio climático en la costa de Cantabria. PIMA Adapta-Cantabria.
- IHCantabria (2021b). Informe de riesgos de la costa frente al cambio climático, para evaluar la vulnerabilidad y exposición de activos naturales y socioeconómicos en la Región de Murcia. PIMA Adapta-Murcia.
- IHCantabria (2021c). Plan de adaptación de los puertos autonómicos de Cantabria.
- IHCantabria (2021d). Plan autonómico de adaptación de los terrenos de dominio público marítimo-terrestre adscritos a la comunidad autónoma de Murcia.
- IHOBE (2022). KOSTAEGOKI. Vulnerabilidad, riesgo y adaptación de la costa del País Vasco frente al cambio climático. I. Análisis de vulnerabilidad y riesgo. SOCIB (2021). Análisis de los riesgos en la costa ante el cambio climático en las Illes Balears. PIMA Adapta-País Vasco.
- INE (2023). *Cuenta Satélite del Turismo en España. Serie 2019-2022*. Instituto Nacional de Estadística.
- IPCC (2019) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.
- Izaguirre, C., Losada, I. J., Camus, P., Gonzalez-Lamuno, P., & Stenek, V. (2020). Seaport climate change impact assessment using a multi-level methodology. *Maritime Policy & Management*, 47(4), 544-557.
- Izaguirre, C., Losada, I. J., Camus, P., Vigh, J. L., & Stenek, V. (2021). Climate change risk to global port operations. *Nature Climate Change*, 11(1), 14-20.
- Jimenez-Martinez, J., Garcia-Arostegui, J. L., Hunink, J. E., Contreras, S., Baudron, P., & Candela, L. (2016). The role of groundwater in highly human-modified hydrosystems: a review of impacts and mitigation options in the Campo de Cartagena-Mar Menor coastal plain (SE Spain). *Environmental Reviews*, 24(4), 377-392.
- Junta de Andalucía. (2025). Relación de concesiones en el dominio público marítimoterrestre (PubliWeb). Recuperado el 10 de agosto de 2025 de <https://portalrediam.cica.es/mapea/PIMA/riesgos/>
- Kersting, D. K., Teixidó, N., & Linares, C. (2014). Recruitment and mortality of the temperate coral *Cladocora caespitosa*: implications for the recovery of endangered populations. *Coral Reefs*, 33(2), 403-407.
- Kersting, D. K. (2016). Cambio climático en el medio marino español: impactos, vulnerabilidad y adaptación. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 166 Pág.
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B., & Simmons, C. T. (2016). Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *Journal of Hydrology*, 535, 235-255.



- Kroeger, K. D., Crooks, S., Moseman-Valtierra, S., & Tang, J. (2017). Restoring tides to reduce methane emissions in impounded wetlands: A new and potent Blue Carbon climate change intervention. *Scientific reports*, 7(1), 11914.
- Lara, J. L., Lucio, D., Tomas, A., Di Paolo, B., & Losada, I. J. (2019). High-resolution time-dependent probabilistic assessment of the hydraulic performance for historic coastal structures: application to Luarda Breakwater. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2155), 20190016.
- Lawrence, J., Blackett, P., & Cradock-Henry, N. A. (2020). Cascading climate change impacts and implications. *Climate Risk Management*, 29, 100234.
- León-Mateos, F., Sartal, A., López-Manuel, L., & Quintás, M. A. (2021). Adapting our sea ports to the challenges of climate change: Development and validation of a Port Resilience Index. *Marine Policy*, 130, 104573.
- Linares, C., Cebrian, E., Kipson, S., & Garrabou, J. (2013). Does thermal history influence the tolerance of temperate gorgonians to future warming? *Marine Environmental Research*, 89, 45–52.
- Lincke, D., & Hinkel, J. (2021). Coastal migration due to 21st century sea-level rise. *Earth's Future*, 9(5), e2020EF001965.
- Liqueste, C., Piroddi, C., Drakou, E. G., Gurney, L., Katsanevakis, S., Charef, A., & Egoh, B. (2013). Current status and future prospects for the assessment of marine and coastal ecosystem services: a systematic review. *PloS one*, 8(7), e67737.
- Losada, I., Izaguirre, C. & Diaz, P. (2014). Cambio climático en la costa española. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, 133 pp.
- Losada, I. J., Toimil, A., Munoz, A., Garcia-Fletcher, A. P., & Diaz-Simal, P. (2019). A planning strategy for the adaptation of coastal areas to climate change: The Spanish case. *Ocean & Coastal Management*, 182, 104983.
- Loomis, J., & Santiago, L. (2013). Economic valuation of beach quality improvements: Comparing incremental attribute values estimated from two stated preference valuation methods. *Coastal Management*, 41, 75–86.
- Lucio, D., Lara, J. L., Tomás, A., & Losada, I. J. (2024). Projecting compound wave and sea-level events at a coastal structure site under climate change. *Coastal Engineering*, 189, 104490.
- Luque, P., Gómez-Pujol, L., Marcos, M., & Orfila, A. (2021). Coastal flooding in the Balearic Islands during the twenty-first century caused by sea-level rise and extreme events. *Frontiers in Marine Science*, 8, 676452.
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding-a global assessment. *PloS one*, 10(3), e0118571.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *science*, 328(5985), 1517-1520.
- Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meyssignac, B., ... & Fang, J. (2021). A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, 11(4), 338-342.
- Nirandjan, S., Koks, E. E., Ye, M., Pant, R., Van Ginkel, K. C., Aerts, J. C., & Ward, P. J. (2024). Physical vulnerability database for critical infrastructure hazard risk assessments—a systematic review and data collection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(12), 4341-4368.



- Mandiola, G., Galparsoro, I., Valle, M., Garmendia, J. M., Garnier, R., Franco, J., ... & Fernandes-Salvador, J. A. (2025). Projections of intertidal estuarine seagrass distribution under climate change scenarios using a Bayesian network approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 313, 109093.
- MAPA (2020). Demografía de la población costera en España 2020 (Análisis y Prospectiva – Serie Pesca nº 5). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España.
- MAPA (2023). *Informe sobre regadíos en España*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MAPA y MITECO. (2023). Encuesta Económica de Pesca Marítima (tabla de macro magnitudes: Valor Añadido Bruto y Neto por zonas pesqueras).
- Marbà, N., & Duarte, C. M. (2010). Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. *Global change biology*, 16(8), 2366-2375.
- Marbà, N., Díaz-Almela, E., & Duarte, C. M. (2014). Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*) loss between 1842 and 2009. *Biological Conservation*, 176, 183-190.
- Marbà, N., Jorda, G., Agusti, S., Girard, C., & Duarte, C. M. (2015). Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Frontiers in Marine Science*, 2.
- Martín, M., Hernández-Crespo, C., Andrés-Doménech, I., & Benedito-Durá, V. (2020). Fifty years of eutrophication in the Albufera lake (Valencia, Spain): Causes, evolution and remediation strategies. *Ecological Engineering*, 155, 105932.
- Martín, P., Sabatés, A., Lloret, J., & Martin-Vide, J. (2012). Climate modulation of fish populations: the role of the Western Mediterranean Oscillation (WeMO) in sardine (*Sardina pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) production in the north-western Mediterranean. *Climatic Change*, 110(3), 925-939.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Sánchez, P., & Montes, J. A. (2019). Methodology for the damage assessment of vehicles exposed to flooding in urban areas. *Journal of Flood Risk Management*, 12(3), e12475.
- Mat, N., Cerceau, J., Shi, L., Park, H. S., Junqua, G., & Lopez-Ferber, M. (2016). Socio-ecological transitions toward low-carbon port cities: Trends, changes and adaptation processes in Asia and Europe. *Journal of Cleaner Production*, 114, 362-375.
- Mehvar, S., Filatova, T., Dastgheib, A., De Ruyter van Steveninck, E., & Ranasinghe, R. (2018). Quantifying economic value of coastal ecosystem services: a review. *Journal of marine science and engineering*, 6(1), 5.
- Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., ... & Muelbert, M. M. C. (2019). Polar Regions. In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- MITECO (2017). Estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar.
- MITECO (2020a). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030. Gobierno de España.
- MITECO (2020b). PIMA Adapta Costas [Proyecto dentro del Plan de Impulso al Medio Ambiente para la Adaptación al Cambio Climático]. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Oficina Española de Cambio Climático.
- MITECO (2021a). Planes autonómicos de adaptación de los terrenos de dominio público marítimo-terrestre adscritos a las comunidades autónomas españolas. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Oficina Española de Cambio Climático.



- MITECO. (2021b). Inventario Español de Patrimonio Natural y Biodiversidad. Gobierno de España.
- MITECO (2022a). Plan Nacional de Salud y Medio Ambiente (PNSMA). Gobierno de España.
- MITECO (2022b). Plan Estratégico Nacional para la Protección de la Costa Española considerando los Efectos del Cambio Climático. Memoria del Plan. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Gobierno de España.
- MITECO (2023). Plan Estratégico de Hmedales a 2030. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.
- MITECO – DGA (2023). Planes hidrológicos de cuenca 2021–2027: tercer ciclo de planificación hidrológica (Directiva Marco del Agua). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Dirección General del Agua.
- MITECO. (2025). Registro de usos en dominio público maritimoterrestre. <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/procedimientos-gestion-dominio-publico-maritimo-terrestre/registro-usos-dpmt.html>
- Molina, J. L., García Aróstegui, J. L., Benavente, J., Varela, C., de la Hera, A., & López Geta, J. A. (2009). Aquifers overexploitation in SE Spain: a proposal for the integrated analysis of water management. *Water Resources Management*, 23, 2737–2760.
- Möller, I., Kudella, M., Rupprecht, F., Spencer, T., Paul, M., Van Wesenbeeck, B. K., ... & Schimmels, S. (2014). Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geoscience*, 7(10), 727–731.
- Mogollón, S. L., Zilio, M. I., Buitrago, E. M., Caraballo, M. Á., & Yñiguez, R. (2024). Economic impact of *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) along the Andalusian coastline: the case of Tarifa, Spain. *Wetlands Ecology and Management*, 32(1), 19–32.
- Observatorio de la Sostenibilidad (2023). <https://www.observatoriosostenibilidad.org/>
- Oelsmann, J., Marcos, M., Passaro, M., Sanchez, L., Dettmering, D., Dangendorf, S., & Seitz, F. (2024). Regional variations in relative sea-level changes influenced by nonlinear vertical land motion. *Nature Geoscience*, 17(2), 137–144.
- Ondiviela, B., Losada, I. J., Lara, J. L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T. J., & van Belzen, J. (2014). The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 158–168.
- Ondiviela, B., Galván, C., Recio, M., Jiménez, M., Juanes, J. A., Puente, A., & Losada, I. J. (2020). Vulnerability of *Zostera noltei* to Sea Level Rise: the Use of Clustering Techniques in Climate Change Studies. *Estuaries and Coasts*, 43(8).
- O'Neill, B., M. van Aalst, Z. Zaiton Ibrahim, L. Berrang Ford, S. Bhadwal, H. Buhaug, D. Diaz, K. Frieler, M. Garschagen, A. Magnan, G. Midgley, A. Mirzabaev, A. Thomas, and R. Warren, 2022: Key Risks Across Sectors and Regions. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2411–2538, doi:10.1017/9781009325844.025.
- Oppenheimer, M. et al. Sea-level rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)* (eds. Pörtner, H.- O.) 126 pp. (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019).



- Oprandi, A., Mucerino, L., De Leo, F., Bianchi, C. N., Morri, C., Azzola, A., ... & Montefalcone, M. (2020). Effects of a severe storm on seagrass meadows. *Science of the Total Environment*, 748, 141373.
- Parmesan, C., & Hanley, M. E. (2015). Plants and climate change: complexities and surprises. *Annals of Botany*, 116(6), 849–864.
- Portillo Juan, N., Negro Valdecantos, V., & del Campo, J. M. (2022). Review of the impacts of climate change on ports and harbours and their adaptation in Spain. *Sustainability*, 14(12), 7507.
- Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, et al. (2022) Technical Summary. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37–118.
- Piñeiro-Corbeira, C., Barreiro, R., & Cremades, J. (2016). Decadal changes in the distribution of common intertidal seaweeds in Galicia (NW Iberia). *Marine Environmental Research*, 113, 106–115.
- Png-Gonzalez, L., Comas-González, R., Calvo-Manazza, M., Follana-Berná, G., Ballesteros, E., Díaz-Tapia, P., ... & Carbonell, A. (2023). Updating the national baseline of non-indigenous species in Spanish marine waters. *Diversity*, 15(5), 630.
- Pontee, N. (2013). Defining coastal squeeze: A discussion. *Ocean & coastal management*, 84, 204–207.
- Ports IB (2021). Plan de adaptación al cambio climático de los puertos de las Illes Balears.
- Puertos del Estado (2015). Informe anual 2014 del Sistema Portuario de Titularidad Estatal. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- Puertos del Estado (2023). Informe anual 2022 del Sistema Portuario de Titularidad Estatal. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- Ramos, E., Juanes, J. A., Galván, C., Neto, J. M., Melo, R., Pedersen, A., ... & González, B. (2012). Coastal waters classification based on physical attributes along the NE Atlantic region. An approach for rocky macroalgae potential distribution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 112, 105–114.
- Ramos, E., Puente, A. & Juanes, J.A. (2015). An ecological classification of rocky shores at a regional scale: a predictive tool for management of conservation values. *Marine Ecology*, 37, 311–328.
- Ramos, E., de Terán, J. R. D., Puente, A., & Juanes, J. A. (2016). The role of geomorphology in the distribution of intertidal rocky macroalgae in the NE Atlantic region. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 179, 90–98.
- Ramos, E., Guinda, X., Puente, A., de la Hoz, C. F., & Juanes, J. A. (2020). Changes in the distribution of intertidal macroalgae along a longitudinal gradient in the northern coast of Spain. *Marine Environmental Research*, 157, 104930.
- Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. *Earth-science reviews*, 160, 320–332.



- Ranasinghe, R., A.C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F.A. Cruz, S. Dessai, A.S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M.B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, and R. Zaaboul, 2021: Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1767–1926
- Reimann, L., Merkens, J. L., & Vafeidis, A. T. (2018). Regionalized Shared Socioeconomic Pathways: narratives and spatial population projections for the Mediterranean coastal zone. *Regional Environmental Change*, 18, 235-245.
- Ridha, T., Ross, A. D., & Mostafavi, A. (2022). Climate change impacts on infrastructure: Flood risk perceptions and evaluations of water systems in coastal urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102883.
- Ritchie, P. D., Clarke, J. J., Cox, P. M., & Huntingford, C. (2021). Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. *Nature*, 592(7855), 517-523.
- Rius, M., Turon, X., Morán, P., Pérez, J., Almón, B., Pahad, G., ... & Vázquez, E. (2024). A morphogenetic characterisation of a potentially dominant African marine species in Europe. *Biological Invasions*, 26(9), 2811-2818.
- Rocha, J. C., Yletyinen, J., Biggs, R., Blenckner, T., & Peterson, G. D. (2015). Marine regime shifts: Drivers and impacts on ecosystems services. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1659), 20130273.
- Rodríguez-Estrella, T. (2012). The problems of overexploitation of aquifers in semi-arid areas: The Murcia Region and the Segura Basin (South-east Spain) case. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(5), 5729-5756.
- Ros, M. (2025, 26 de julio). DATOS | Más de la mitad de los edificios en riesgo por la ley de costas son residenciales. Newtral Data. <https://www.newtral.es/edificios-ley-costas/20250726/>
- Rosenzweig, C., D. Peters, W.D. Solecki, R. Blake, K. Jacob, and B. Holland, 2022: Sustained urban climate assessment. In Climate Change and U.S. Cities: Urban Systems, Sectors, and Prospects for Action. W.D. Solecki and C. Rosenzweig, Eds., Island Press, pp. 261-304.
- Roy, P., Pal, S. C., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Saha, A., & Shit, M. (2023). Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. *Journal of Environmental Management*, 330, 117187.
- Sabatés, A., Martín, P., Lloret, J., & Raya, V. (2006). Sea warming and fish distribution: the case of the small pelagic fish, *Sardinella aurita*, in the western Mediterranean. *Global Change Biology*, 12(11), 2209–2219.
- Sadiq, M., Ali, S. W., Terriche, Y., Mutarraf, M. U., Hassan, M. A., Hamid, K., ... & Guerrero, J. M. (2021). Future greener seaports: A review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures. *Ieee Access*, 9, 75568-75587.
- Sainz-Villegas, S., Sánchez-Astráin, B., Puente, A., & Juanes, J. A. (2023). Characterization of *Gelidium corneum*'s (Florideophyceae, Rhodophyta) vegetative propagation process under increasing levels of temperature and irradiance. *Marine Environmental Research*, 187, 105966.



- Sanchez-Arcilla, A., Jimenez, J. A., & Valdemoro, H. I. (1998). The Ebro Delta: morphodynamics and vulnerability. *Journal of Coastal Research*, 755-772.
- Sánchez-Arcilla, A., Jiménez, J. A., Valdemoro, H. I., & Gracia, V. (2008). Implications of climatic change on Spanish Mediterranean low-lying coasts: The Ebro delta case. *Journal of Coastal Research*, 24(2), 306-316.
- Sánchez-Artús, X., Gracia, V., Espino, M., Sierra, J. P., Pinyol, J., & Sánchez-Arcilla, A. (2023). Present and future flooding and erosion along the NW Spanish Mediterranean Coast. *Frontiers in marine science*, 10, 1125138.
- Sanz, M.J. y Galán, E. (editoras), 2020. Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.
- Sardain, A., Sardain, E., & Leung, B. (2019). Global forecasts of shipping traffic and biological invasions to 2050. *Nature Sustainability*, 2(4), 274-282.
- Scholes, R. J. (2016). Climate change and ecosystem services. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(4), 537-550.
- Schuerch, M., Spencer, T., Temmerman, S., Kirwan, M. L., Wolff, C., Lincke, D., ... & Brown, S. (2018). Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature*, 561(7722), 231-234.
- Shukla, P.R., J. Skea, R. Slade, R. van Diemen, E. Haughey, J. Malley, M. Pathak, J. Portugal Pereira (eds.) Technical Summary, 2019. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].
- Sierra, J. P., Casanovas, I., Möso, C., Mestres, M., & Sánchez-Arcilla, A. (2016). Vulnerability of Catalan (NW Mediterranean) ports to wave overtopping due to different scenarios of sea level rise. *Regional Environmental Change*, 16, 1457-1468.
- Sierra, J. P. (2019). Economic impact of overtopping and adaptation measures in Catalan ports due to sea level rise. *Water*, 11(7), 1440.
- Sierra, J. P., Sánchez-Arcilla, A., Gironella, X., Gracia, V., Altomare, C., Möso, C., ... & Barahona, C. (2023). Impact of climate change on berthing areas in ports of the Balearic Islands: adaptation measures. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1124763.
- SOCIB (2021). Análisis de los riesgos en la costa ante el cambio climático en las Illes Balears. PIMA Adapta-Baleares.
- Suárez de Vivero, J. L., & Rodríguez Mateos, J. C. (2005). Coastal crisis: the failure of coastal management in the Spanish Mediterranean region. *Coastal Management*, 33(2), 197-214.
- Telesca, L., Belluscio, A., Criscoli, A., Ardizzone, G., Apostolaki, E. T., Frascchetti, S., ... & Salomidi, M. (2015). Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific reports*, 5(1), 12505.
- Thurston, A. M., Stöckl, H., & Ranganathan, M. (2021). Natural hazards, disasters and violence against women and girls: a global mixed-methods systematic review. *BMJ global health*, 6(4).



- Toimil, A., Losada, I. J., Camus, P., & Díaz-Simal, P. (2017a). Managing coastal erosion under climate change at the regional scale. *Coastal Engineering*, 128, 106-122.
- Toimil, A., Losada, I. J., Díaz-Simal, P., Izaguirre, C., & Camus, P. (2017B). Multi-sectoral, high-resolution assessment of climate change consequences of coastal flooding. *Climatic Change*, 145, 431-444.
- Toimil, A., Díaz-Simal, P., Losada, I. J., & Camus, P. (2018). Estimating the risk of loss of beach recreation value under climate change. *Tourism Management*, 68, 387-400.
- Toimil, A., Camus, P., Losada, I. J., Le Cozannet, G., Nicholls, R. J., Idier, D., & Maspataud, A. (2020). Climate change-driven coastal erosion modelling in temperate sandy beaches: Methods and uncertainty treatment. *Earth-Science Reviews*, 202, 103110.
- Toimil, A., Losada, I. J., Álvarez-Cuesta, M., & Le Cozannet, G. (2023a). Demonstrating the value of beaches for adaptation to future coastal flood risk. *Nature Communications*, 14(1), 3474.
- Tuya, F., Cacabelos, E., Duarte, P., Jacinto, D., JJ, C., Silva, T., Bertocci, I., JN, F., Arenas, F., Coca, J., & Wernberg, T. (2012). Patterns of landscape and assemblage structure along a latitudinal gradient in ocean climate. *Marine Ecology Progress Series*, 466, 9-19.
- UICN (2013) Invasive alien species in marine and coastal areas. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2013-007.pdf>
- UICN (2023). Invasive alien species: Global status and trends. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/invasive-alien-species>.
- U.S. Global Change Research Program. (2016). The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment (Scientific Assessment). Washington, DC: U.S. Global Change Research Program. <https://health2016.globalchange.gov>
- Valle, M., Chust, G., del Campo, A., Wisz, M. S., Olsen, S. M., Garmendia, J. M., & Borja, A. (2014). Projecting future distribution of the seagrass *Zostera noltii* under global warming and sea level rise. *Biological Conservation*, 170, 74-85.
- Verdura, J., Santamaría, J., Ballesteros, E., Smale, D. A., Cefali, M. E., Golo, R., de Caralt, S., Vergés, A., & Cebrian, E. (2021). Local-scale climatic refugia offer sanctuary for a habitat-forming species during a marine heatwave. *Journal of Ecology*, 109(4), 1758-1773.
- Verschuur, J., Koks, E. E., & Hall, J. W. (2020). Port disruptions due to natural disasters: Insights into port and logistics resilience. *Transportation research part D: transport and environment*, 85, 102393.
- Verschuur, J., Koks, E. E., Li, S., & Hall, J. W. (2023). Multi-hazard risk to global port infrastructure and resulting trade and logistics losses. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 5.
- Vineis, P., Chan, Q., & Khan, A. (2011). Climate change impacts on water salinity and health. *Journal of epidemiology and global health*, 1(1), 5-10.



■ Visores PIMA Adapta-Costas:

- <https://portalrediam.cica.es/mapea/PIMA/riesgos/> (Andalucía);
- <https://mapas.cantabria.es/> (Cantabria).
- <https://visors.icgc.cat/PIMA-AdaptaCostas> (Cataluña);
- <https://geoadaptacostes.gva.es/> (Comunidad Valenciana).
- <https://experience.arcgis.com/experience/2d36958630024f2bb1f1611d0864b8b4> (Galicia). https://ideib.caib.es/impactes_costa_canvi_climatic/es/ (Islas Baleares).
- <https://grafcan1.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=a1bc45dd09994ac1979479fcff4db989> (Islas Canarias).
- <https://gis.ihobe.eus/kostaegoki/> (País Vasco);
- <https://c3e-asturias.ihcantabria.com> (Principado de Asturias).
- <https://pimamurcia.ihcantabria.es/visor/> (Murcia).

- Von Holle, B., Irish, J. L., Spivy, A., Weishampel, J. F., Meylan, A., Godfrey, M. H., ... & Taylor, N. R. (2019). Effects of future sea level rise on coastal habitat. *The Journal of Wildlife Management*, 83(3), 694-704.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Bianchi, A., Dottori, F., & Feyen, L. (2018). Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. *Nature Climate Change*, 8(9), 776-780.
- Wernberg, T., Thomsen, M. S., Baum, J. K., Bishop, M. J., Bruno, J. F., Coleman, M. A., Filbee-Dexter, K., Gagnon, K., He, Q., Murdiyarso, D., Rogers, K., Silliman, B. R., Smale, D. A., Starko, S., & Vanderklift, M. A. (2024). Impacts of Climate Change on Marine Foundation Species. *Annual Review of Marine Science*, 16, 247-282.
- Werner, A. D., Bakker, M., Post, V. E., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., ... & Barry, D. A. (2013). Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Advances in water resources*, 51, 3-26.
- Whitney, C. K., Bennett, N. J., Ban, N. C., Allison, E. H., Armitage, D., Blythe, J. L., ... & Yumagulova, L. (2017). Adaptive capacity: from assessment to action in coastal social-ecological systems. *Ecology and Society*
- Yenew, C., Bayeh, G. M., Gebeyehu, A. A., Enawgaw, A. S., Asmare, Z. A., Ejigu, A. G., ... & Yeshiwas, A. G. (2025). Scoping review on assessing climate-sensitive health risks. *BMC public health*, 25(1), 914ty, 22(2).