



Ciencia para
Las Políticas
Públicas

Riesgos y amenazas de los eventos marinos extremos

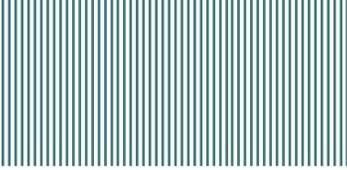
Coordinado por:

E. García-Ladona · L. García García · A. Orfila · R. Figueroa · J. Guillen · E. Berdalet



CSIC
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

SCIENCE  POLICY



Ciencia para Las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



SCIENCE  POLICY

Este es un libro de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional [CC BY 4.0].
Más información sobre esta licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> [correo: editorialcsic@csic.es]



MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES



**Departamento
de Comunicación**

Gabinete de Presidencia
CSIC, Calle Serrano 117
28006 Madrid
Email: comunicacion@csic.es

NIPO: 155-24-213-X

e-NIPO: 155-24-214-5

Depósito legal: M-23747-2024

Edición no venal

Coordinado por:

E. García-Ladona
L. García García
A. Orfila
R. Figueroa
J. Guillen
E. Berdalet

**Coordinadores de la colección
Ciencia para las Políticas
Públicas:**

Jorge Hernández-Moreno
Cindy Matos Ramos

Edición: Marta García

Fotógrafos:

J. Guillén
E. Berdalet
R. Duro
Yolanda Pazos
S. González-Gil
Jaume Piera,
Xavi Salvador Costa
Manuel Mesa
Berta Companys Oliva

Ilustraciones:

Freepress Coop

Diseño y maquetación:

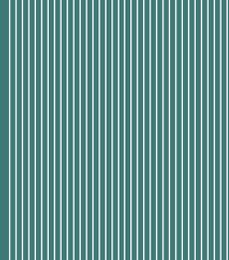
David Pamplona Roche

Impreso en España. *Printed in Spain*

En esta edición se ha utilizado papel ecológico sometido a un proceso de blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible.



Esta obra está bajo una Licencia Creative
Commons Atribución 4.0 Internacional.



EL CSIC tiene entre sus funciones la de informar, asistir y asesorar en materia de ciencia y tecnología a entidades públicas y privadas, según recoge el artículo 5 de su estatuto. Enmarcado en esta función, el informe *Riesgos y amenazas de los eventos marinos extremos*, de la colección Ciencia para Políticas Públicas, se presenta como un documento dirigido a Administraciones y a la sociedad en general. En él se explica el concepto y caracterización de los eventos marinos extremos como fluctuaciones excepcionales de fenómenos naturales del sistema climático. La combinación de factores antropogénicos y las proyecciones del cambio climático auguran un aumento alarmante del impacto que estos eventos pueden tener en el futuro en los ecosistemas marinos y las zonas litorales. Se revisan tres tipos de eventos marinos en los que el CSIC investiga de forma muy activa, en colaboración con otras entidades nacionales e internacionales: las olas de calor marinas, los fenómenos litorales y las proliferaciones de algas nocivas. En todos estos casos, las líneas de investigación que se desarrollan tienen como objetivo fundamental entender los mecanismos de generación de los eventos marinos extremos y establecer sistemas de alerta temprana y modelos predictivos para asesorar a las administraciones en la gestión de sus riesgos en el medio marino.

ÍNDICE

uno

|||||

Introducción: algunas definiciones y conceptos clave

- 1.1. Eventos extremos
- 1.2. Eventos extremos marinos
- 1.3. Olas de calor marinas
- 1.4. Fenómenos costeros
- 1.5. Proliferaciones de algas nocivas

dos

|||||

La contribución del CSIC a la comprensión y predicción de los eventos marinos extremos

- 2.1. Sistemas de observación y principales resultados
- 2.2. Olas de calor marinas
- 2.3. Fenómenos costeros
- 2.4. Proliferaciones de algas nocivas

tres

|||||

Conclusiones y recomendaciones

cuatro

|||||

Listado de centros

cinco

|||||

Para saber más

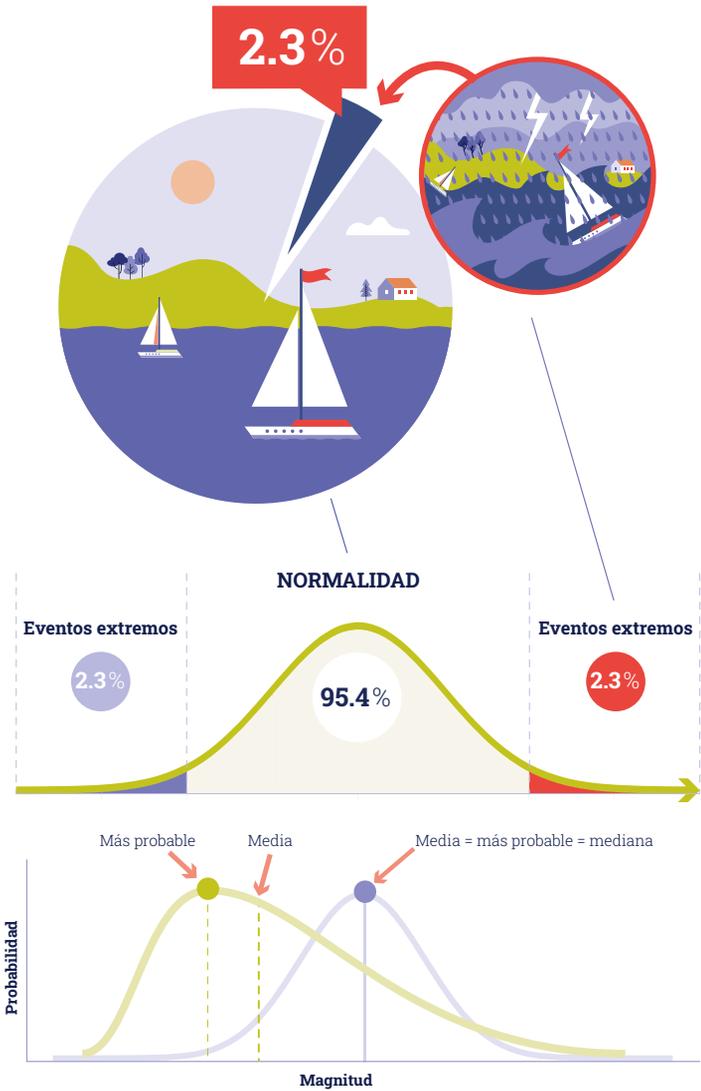


uno



Introducción: algunas definiciones y conceptos clave

Gráfico 1



Arriba: definición del estado normal, de los eventos extremos y de sus probabilidades de ocurrencia según la función de distribución de probabilidad de los datos. Abajo: los parámetros (media, mediana...) en función del tipo de distribución de probabilidad que caracteriza los procesos dinámicos subyacentes.

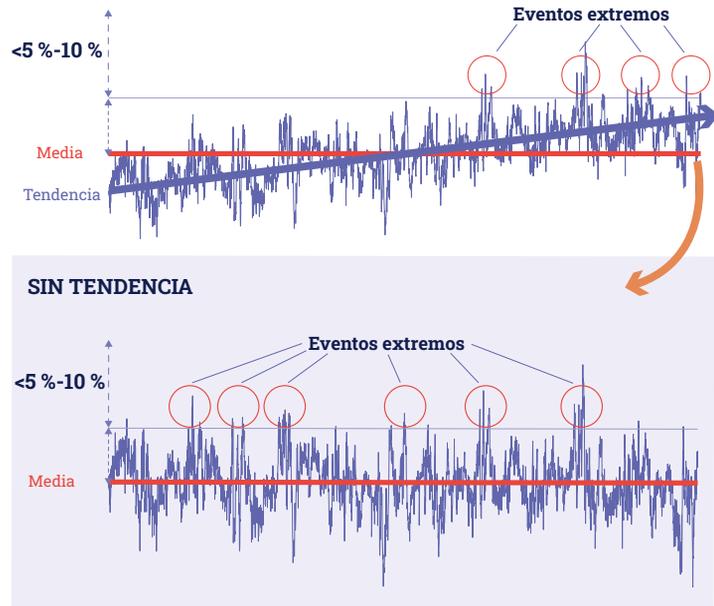
ELABORACIÓN PROPIA



Otro aspecto que conviene tener en cuenta en la aproximación estadística a los eventos extremos tiene que ver con la fuente de datos. En muchos casos, dichas fuentes no son, de manera estricta, el resultado de observaciones independientes de un proceso aleatorio, sino que es habitual que provengan de una serie de observaciones ordenadas en el tiempo que suelen estar correlacionadas temporal y espacialmente a diferentes escalas. Para entendernos, cuando lanzamos un dado varias veces consecutivas, el resultado de cada tirada no depende del orden en que ha sido realizada. Decimos entonces que los sucesos son independientes y no están correlacionados, es decir, no importa el orden en el que se producen. En general, las series temporales de observaciones de las magnitudes características de la atmósfera y del océano acostumbran a estar correlacionadas espacial y temporalmente.

Por último, es particularmente relevante la forma de caracterizar el estado *normal* a partir del cual identificar un evento como extremo, sobre todo disponiendo de una serie temporal de valores. Así, la Organización Meteorológica Mundial define el **clima** como el estado de referencia de un periodo de 30 años. Si el fenómeno que queremos estudiar oscila durante ese periodo alrededor de un valor constante (hablamos de estadísticamente estacionario). Entonces, el estado de referencia denominado *climatología* puede establecerse simplemente promediando en el tiempo. Sin embargo, si el valor de la magnitud que queremos estudiar oscila mientras crece (o decrece) monótonamente durante el periodo temporal de referencia (como el calentamiento global o el aumento del nivel del mar), el simple promedio temporal no permite caracterizar un estado de referencia unívoco. Esto puede alterar la forma en cómo detectamos y caracterizamos los eventos.

Gráfico 2



Identificación de los eventos extremos a partir de una serie temporal de datos (curva irregular). La línea gruesa en color azul es la tendencia a lo largo del tiempo y la línea en color rojo indica el valor medio sobre el periodo. La línea fina horizontal indica el nivel de variabilidad, y los eventos extremos son aquellos datos que aparecen por encima de nivel de variabilidad. La tendencia a largo plazo tiene consecuencias en la forma de detección de los eventos marinos.

ELABORACIÓN PROPIA



A modo de resumen, los eventos extremos son aquellos que estadísticamente se caracterizan por una baja o muy baja probabilidad de ocurrencia y se sitúan en las colas de las distribuciones que dependen de las propiedades dinámicas de los procesos. La baja probabilidad de estos eventos implica tiempos de recurrencia grandes. Un elemento clave para conocer las causas y consecuencias de estos eventos extremos y poder predecirlos cada vez con mayor exactitud es disponer de un sistema de información multidisciplinar que nos permita conocer con suficiente resolución espacio-temporal el estado del sistema antes, preferentemente durante y después del impacto que produce un evento de estas características. En otras palabras, se necesita de un sistema de monitorización sostenido en el tiempo que nos permita construir series históricas para poder estudiar y entender con detalle los procesos que producen estos eventos extremos, y si en realidad lo son o no en comparación con el estado de referencia, con qué frecuencia e intensidad ocurren, etc.

12.

Eventos extremos marinos

Los flujos atmosféricos y oceánicos, principales componentes del clima de la Tierra, son, junto con los movimientos de las placas continentales, los procesos cuyos eventos extremos causan mayor impacto en las sociedades humanas y los ecosistemas (el tsunami de Indonesia en 2004 produjo en un día alrededor de 225 000 muertes). Probablemente, los que nos resultan más familiares son los huracanes, las lluvias torrenciales, los volcanes, los tsunamis y, en menor medida, las tormentas marinas, que afectan gravemente las costas y comprometen la seguridad de navegación marítima.

Los eventos marinos son de naturaleza y causas variadas y pueden tener dinámicas entrelazadas, formando lo que se conoce como *eventos extremos compuestos*. Así, por ejemplo, eventos extremos relacionados con las variaciones bruscas del nivel del mar, que afectan seriamente las zonas litorales y sus infraestructuras, pueden venir inducidos a su vez por procesos dinámicos distintos, como el oleaje extremo asociado a las tormentas inusuales, o por tsunamis o meteotsunamis (olas oceánicas con características de tsunamis, de origen atmosférico en lugar de sísmico). Las olas de calor marinas son eventos extremos de la temperatura del mar que pueden provocar mortalidad severa en muchos organismos marinos, influir en sus patrones de migración y, a su vez, retroalimentar de manera potencial el desarrollo de tormentas localmente fuertes. Además, pueden favorecer determinadas proliferaciones de algas nocivas, eventos ecológicos con un gran impacto en explotaciones comerciales de acuicultura o pesquerías, que constituyen también un riesgo para la salud humana y del ecosistema.

Algunos eventos extremos pueden clasificarse como naturales, en tanto en cuanto pueden aparecer como resultado de las fluctuaciones de la dinámica propia de la naturaleza. En contraposición a estos, estarían los eventos extremos directamente inducidos por la actividad humana, como, por ejemplo, un derrame de hidrocarburos. Aquí nos centraremos en los primeros, los eventos extremos naturales, pero teniendo en cuenta que su impacto potencial está condicionado por las alteraciones climáticas, sean estas atribuibles o no a la acción humana.



Los efectos de los eventos marinos extremos pueden ser devastadores desde un punto de vista ecológico y socioeconómico. El cambio global es un factor determinante para comprender el impacto de los fenómenos extremos marinos. El aumento de la temperatura global provoca el derretimiento de los glaciares y la expansión térmica del agua, y contribuye al incremento del nivel medio del mar. Esto, a su vez, aumenta la vulnerabilidad de las zonas costeras tanto a las inundaciones como a la erosión. Ambos están ligados a variaciones en los patrones climáticos que determinan los regímenes de tormentas y el clima marítimo medio (altura de ola, período y dirección del oleaje) que afectan a las costas, así como el régimen de extremos. Según las observaciones de las que disponemos, el nivel del mar y la temperatura de la Tierra vienen aumentando muy rápidamente desde épocas preindustriales en respuesta al incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este cambio global tiene repercusiones en la dinámica de las masas de agua y, a través de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas, contribuye a fenómenos extremos en los ecosistemas marinos, como los que se exponen en este documento. Las observaciones y las proyecciones futuras realizadas hasta ahora prevén un aumento de su frecuencia e intensidad como consecuencia de este escenario climático durante las próximas décadas. De ahí que exista un creciente interés y preocupación en conocer las causas y mecanismos que los producen, para ser capaces de predecirlos y aumentar la capacidad de adaptación y resiliencia ante ellos.

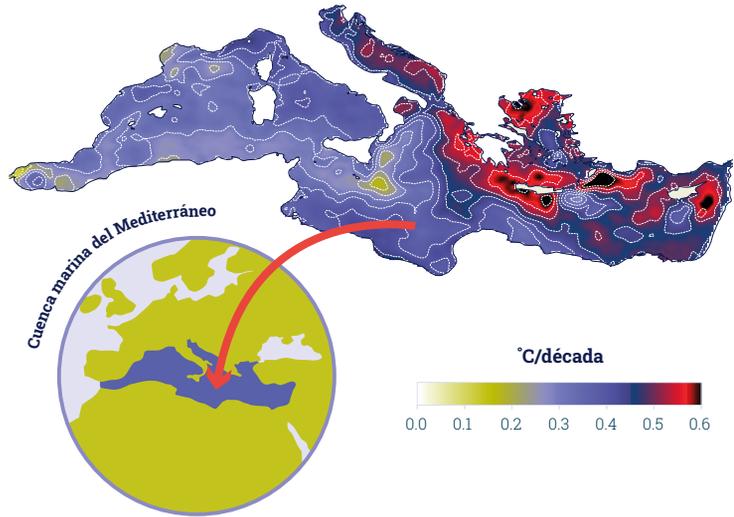
13.

Olas de calor marinas

LAS olas de calor marinas son fluctuaciones anómalas de la temperatura del mar. El término surge por analogía con las olas de calor atmosféricas y denota similares fluctuaciones de la temperatura del aire. Estos eventos no son nuevos. Los aumentos de temperatura durante el fenómeno de El Niño pueden caracterizarse como olas de calor marinas. Sin embargo, el concepto de ola de calor marina se acuñó por primera vez en 2011, en un informe del Servicio de Pesquerías del Departamento de Medioambiente y Conservación del Gobierno de Australia Occidental. En él se informaba de un evento de mortalidad severa en la gran barrera de coral de Australia en verano de 2010. Las observaciones mostraron un blanqueamiento masivo del coral asociado a una invasión inusual de agua caliente en la costa noroeste australiana. Tras este incidente se han registrado similares variaciones extremas de la temperatura del agua del mar en otros lugares del mundo, con distintas consecuencias para el ecosistema. Aunque pueden darse en lugares muy distantes de forma simultánea en ciertos años, no necesariamente están conectados desde el punto de vista causal, y diferentes mecanismos pueden intervenir en diferentes regiones.

En los últimos años, estos eventos han atraído el foco científico y han sido considerados una de las amenazas más serias para el devenir de los ecosistemas marinos, agravada, además, por el calentamiento global. Si el calentamiento sigue en los niveles actuales, las olas de calor marinas tendrían un mayor potencial de impacto, según los análisis realizados a partir de las proyecciones del último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, según sus siglas en inglés). La concurrencia de varios factores, como los procesos de intercambio de calor atmósfera-océano y las alteraciones de los patrones de corrientes como respuesta a cambios de los vientos, hacen su estudio y análisis muy complejo. Actualmente, empezamos a disponer de algunas series observacionales suficientemente largas, y capacidades computacionales suficientemente potentes, para empezar a abordar el sistema acoplado atmósfera-océano en las escalas características oceánicas necesarias para estudiar los mecanismos que intervienen en las olas de calor marinas.

Gráfico 4 Calentamiento de la superficie de la cuenca marina del Mediterráneo en grados por década a partir de datos de satélite del periodo 1982-2022



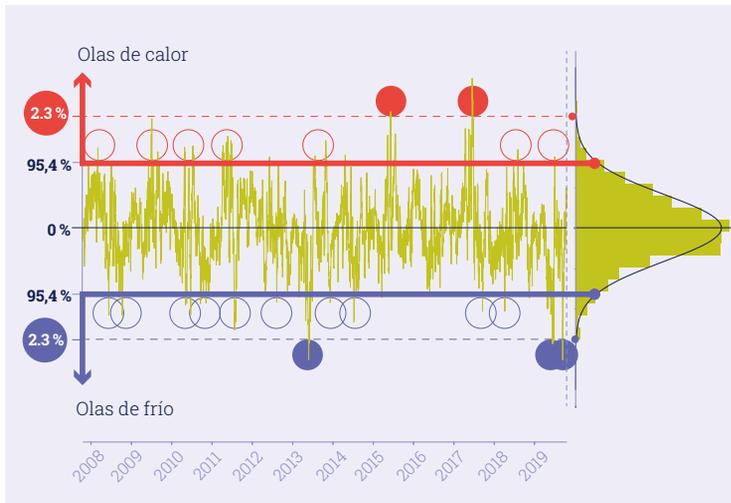
Fuente: Martínez *et al.*, 2023.

El análisis y detección de las olas de calor marinas es muy intuitivo conceptualmente, pero está lejos de ser trivial por las siguientes razones:

- **Disponibilidad de datos.** La detección y caracterización de las olas de calor marinas (frecuencia, extensión geográfica, intensidad, etc.) requiere de largas y frecuentes series temporales de datos que deben cubrir adecuadamente tanto la dimensión horizontal como la dimensión vertical. Esto es extremadamente complicado y costoso, incluso para un área relativamente reducida como la cuenca del Mediterráneo, donde rápidamente se alcanzan profundidades de centenares de metros muy cerca de la costa. El único sistema de observación que puede suministrar información detallada en tiempo y espacio actualmente son los satélites, pero solamente cubren la superficie del planeta, es decir «la piel del océano», y cerca de la costa los datos suelen ser más inciertos debido a

las interferencias con la tierra (sedimentos, materia orgánica de origen terrestre, etc.). Para determinar la extensión vertical de las olas de calor marinas se requieren también datos de la estructura de la columna de agua, que, desafortunadamente, son muy infrecuentes.

Gráfico 5 Detección de olas de calor marina en el área de las islas Columbretes, a partir de una serie temporal de temperatura de la superficie del mar [curva irregular]



A la derecha, la distribución de probabilidad. Los círculos sólidos (en rojo y azul) indican eventos marinos de calor y de frío extremo que constituyen la cola de la distribución.

ELABORACIÓN PROPIA

- **Definición matemática.** En aras de una estandarización, se han propuesto diferentes maneras de detectar y caracterizar las olas de calor marinas. La forma más común de caracterizar la fluctuación de temperatura como ola de calor es si cumple una serie de requisitos:

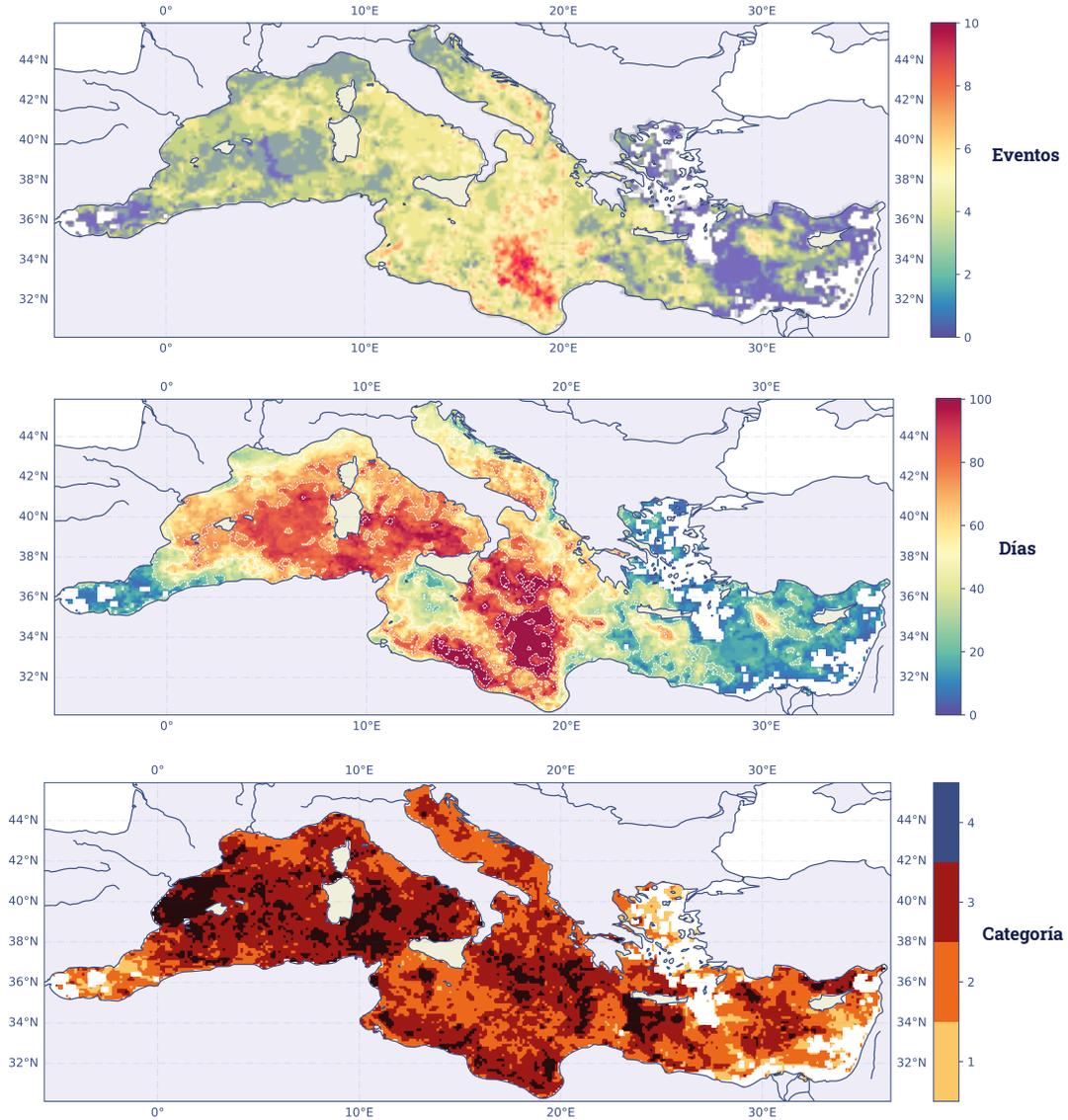


- **Persistencia:** La fluctuación ha de persistir, al menos, cinco días.
- **Intensidad:** La anomalía de temperatura respecto a los valores climatológicos en el mismo lugar y tiempo en el ciclo estacional debe ser superior al 90 %.
- **Discreta:** Se considera que una ola de calor marina está temporalmente aislada si en el mismo lugar se han registrado más de dos días con temperaturas inferiores al percentil 90 antes y después de la ola de calor. A partir de estos criterios se pueden establecer y cuantificar las propiedades de las olas de calor marinas.

En definitiva, la identificación y las características de las olas de calor marinas son una combinación de propiedades temporales y espaciales de los valores de las temperaturas observados. Para analizar su impacto, la forma más adecuada para representar sus propiedades es sobre la base de mapas geográficos de cada uno de estos aspectos.



Gráfico 6 Características de la ola de calor marina en la cuenca del Mediterráneo en el verano de 2003



Los mapas representan el total de días ocupados por eventos de olas de calor marinas (arriba), la distribución del número total de eventos (centro) y la categoría máxima alcanzada de los eventos (abajo). La ola de calor catalogada como severa provocó una gran mortalidad de especies en regiones afectadas por más de 100 días de ola de calor.

Fuente: Martínez *et al.*, 2023.

14.

Fenómenos costeros

UNA zona costera se define como la región geográfica donde se produce la transición entre la tierra y el océano, el mar o cualquier gran cuerpo de agua. Esta área abarca desde la zona emergida, eventualmente afectada por los procesos marinos, hasta la zona sumergida donde actúa el oleaje. Las zonas costeras están caracterizadas por una alta complejidad, donde las actividades humanas interactúan con variedad de ecosistemas como playas, estuarios, manglares, marismas, dunas, arrecifes de coral y praderas sumergidas. Las zonas costeras representan uno de los entornos más dinámicos y vulnerables del planeta. Albergan una biodiversidad única y son fundamentales para la economía global debido a su rol en el comercio, el turismo y la pesca. Actualmente, la mitad de la población mundial vive a menos de 100 kilómetros de la costa y gran parte de los recursos marinos son esenciales para aproximadamente el 37 % de la humanidad, lo que significa que las presiones y los impactos en las zonas costeras representan un riesgo muy elevado para la sociedad. Sin embargo, estas áreas también están altamente expuestas a fenómenos naturales extremos, como huracanes, tsunamis, inundaciones y el aumento del nivel del mar, que conllevan inundación, erosión, pérdida de funcionalidad y amenazas a los ecosistemas de gran valor que ahí se encuentran, como son las playas o las praderas de plantas sumergidas.

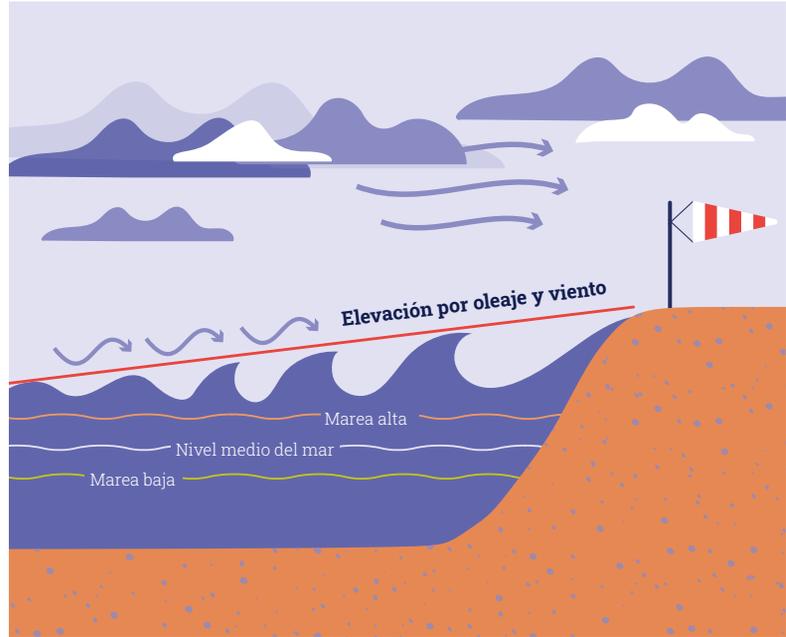
Las inundaciones costeras son un fenómeno natural que afecta a las áreas adyacentes a océanos y mares. Estas inundaciones pueden ser causadas por una variedad de factores, como tormentas, mareas altas, tsunamis y, a más largo plazo, el aumento del nivel del mar debido al cambio climático. Podemos clasificar las inundaciones como permanentes (asociadas al aumento del nivel del mar como consecuencia del cambio global) o periódicas (asociadas a eventos extremos). Hay un consenso en la comunidad científica de que las zonas y comunidades costeras se van a ver cada vez más amenazadas por los cambios del nivel del mar, especialmente en aquellas áreas caracterizadas por tener una morfología de costa emergida plana y poco elevada respecto al nivel marino, como deltas y estuarios.



El cambio en la frecuencia de las tormentas, las alteraciones de los patrones de viento y de las corrientes y las diversas actividades humanas, están acelerando la pérdida de sedimentos y la degradación de las playas. Hay que destacar que, de acuerdo con los escenarios del Panel Intergubernamental del Cambio Climático, fenómenos de inundación con recurrencias de 100 años en la actualidad tenderán a ocurrir anualmente dentro de unas pocas décadas, debido al progresivo ascenso del nivel del mar. La erosión de playas en dicho contexto representa un desafío significativo para las costas de todo el planeta. La acción constante de las olas y las tormentas erosiona las playas y los acantilados, desplazando sedimentos y reduciendo la superficie terrestre disponible. La pérdida de playas afecta negativamente el turismo y la biodiversidad, con impactos que retroalimentan la erosión costera y el retroceso de las costas, junto con inundaciones, intrusión de agua salada en los acuíferos y aguas superficiales, así como una disminución de los humedales costeros.

El impacto de los eventos extremos depende de la intensidad y características del oleaje incidente, del nivel del mar durante la tormenta y de la morfología de la costa. La gestión de los sedimentos y la morfología de sistemas litorales costeros, como los deltas y las playas, son factores cruciales en la comprensión y mitigación de los impactos de las inundaciones. La relación entre estos elementos puede abordarse desde varios ángulos, como la dinámica de los sedimentos, la formación de las estructuras costeras y cómo estas influyen en la frecuencia y severidad de las inundaciones. Afrontar este problema requiere un enfoque integral que combine la construcción de defensas costeras, la restauración de ecosistemas naturales, el reabastecimiento de arena, la planificación urbana adecuada y la educación comunitaria. La gestión eficaz de los sedimentos (incluyendo la gestión de las aguas continentales, cuya utilización y retención en embalses determina la disminución de los aportes a la costa) como elementos esenciales de la gestión costera y la comprensión de la morfología de las costas son esenciales para reducir los riesgos de inundaciones. Implementar estrategias basadas en la naturaleza y en la ciencia puede ayudar a mitigar estos riesgos y promover la resiliencia costera.

Gráfico 7 Componentes que contribuyen a las variaciones del nivel del mar durante un temporal costero



Fuente: adaptado de Melet *et al.*, 2018.

Los cambios en el nivel del mar en una determinada zona costera son el resultado de la superposición de los cambios del nivel medio y los cambios del nivel local producidos por la combinación de viento, marea meteorológica, astronómica y oleaje. La cota de inundación viene determinada por la relación entre la morfología costera y la suma de diferentes contribuciones sobre el nivel del mar medio. Estas son el nivel de marea, compuesto por la marea astronómica y la marea meteorológica, y los efectos del oleaje, que se propaga hacia la costa, rompiendo finalmente y generando un ascenso de la masa de agua.



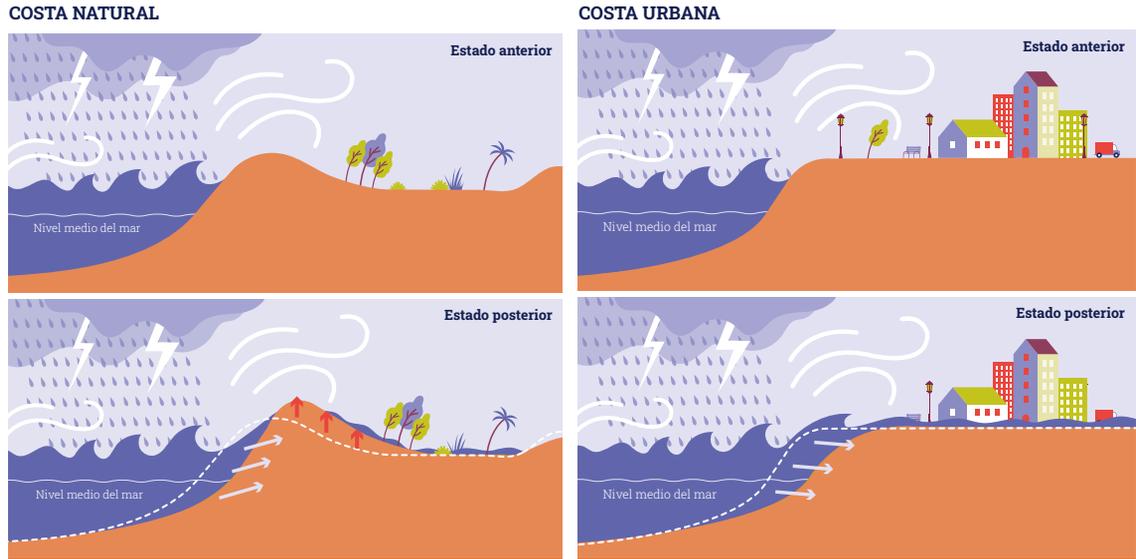
Algunos de los factores implicados en la inundación costera son variables aleatorias y, por tanto, su presentación está sujeta a una determinada probabilidad, siendo común el uso de percentiles de ocurrencia del 1% o el 2%. Obviamente, la subida del nivel del mar está exacerbando muchos de los riesgos costeros frente a inundaciones. En este sentido, la inundación permanente es el resultado de anegar todas las cotas que estén por debajo del nivel medio del mar. La variación de la subida del nivel del mar es uno de los aspectos que se analizan sistemáticamente en las proyecciones futuras del IPCC sobre la actividad humana y la emisión de los gases con efecto invernadero (RPC, Representative Concentration Pathways o, en español, Trayectorias de Concentración Representativas).

Gráfico 8 Ejemplos de los efectos de la erosión e inundación durante temporales



Izquierda: costa urbanizada. Derecha: costa natural. / J. GUILLÉN.

Gráfico 9 Impacto de temporales sobre costas naturales (izquierda) y urbanas (derecha)



Las costas naturales tienen una mayor capacidad de adaptación y resiliencia que las zonas urbanas, donde una parte de la playa ya es rígida y no tiene capacidad de adaptación.

ELABORACIÓN PROPIA

El comportamiento de la costa frente a estos eventos extremos depende de su capacidad de adaptación y resiliencia, que es muy diferente si es natural o urbana. Entre los eventos marinos extremos que potencialmente pueden afectar a las zonas costeras destacamos:

1. Los huracanes, las tormentas tropicales y las tormentas extratropicales son fenómenos meteorológicos que afectan de manera significativa a las zonas costeras y otras regiones del mundo. Cada uno de estos fenómenos tiene características específicas en cuanto a su formación, estructura y efectos. Los huracanes son sistemas de baja presión que se forman sobre aguas tropicales y subtropicales cálidas. Se considera



que se produce un huracán cuando los vientos sostenidos alcanzan o superan los 119 kilómetros por hora. La formación de huracanes requiere una temperatura del océano elevada (al menos 26,5 °C), una alta humedad en la troposfera media y vientos favorables para la organización de la tormenta. Los huracanes causan marejadas ciclónicas, es decir, un aumento del nivel del mar, lluvias torrenciales e inundaciones costeras con una combinación de vientos y oleaje asociado que puede dañar infraestructuras, erosionar playas y desplazar poblaciones enteras. Las tormentas tropicales son sistemas de baja presión atmosférica con vientos sostenidos entre 63 y 118 kilómetros por hora y se forman en condiciones similares a los huracanes. Las tormentas extratropicales se forman fuera de las regiones tropicales, típicamente en latitudes medias, y se desarrollan a lo largo de frentes, donde chocan masas de aire caliente y frío. En Europa, uno de los mayores desastres causados por tormentas en el siglo xx tuvo lugar en el mar del Norte en el invierno de 1953, cuando grandes olas acompañadas de un nivel del mar elevado inundaron amplias zonas de los Países Bajos, Bélgica y Reino Unido, y causaron más de 2500 víctimas mortales.

2. Los tsunamis, generados normalmente por terremotos submarinos, pueden inundar con rapidez las zonas costeras y destruir estructuras, llevándose vidas humanas. El carácter extremadamente destructivo de los tsunamis se produce cuando llegan a las zonas costeras sin que se hayan podido predecir con suficiente antelación. El 1 de noviembre de 1755, un devastador terremoto seguido por un tsunami azotó la ciudad de Lisboa, en Portugal, y tuvo efectos catastróficos en varias regiones del Atlántico, incluida la costa suroeste de España. Cádiz fue una de las ciudades españolas más afectadas por este evento, conocido como el *gran terremoto de Lisboa*. La primera ola del tsunami llegó a Cádiz alrededor de las 10 de la mañana y fue seguida por varias olas adicionales que superaron los diez metros de altura, inundaron gran parte de la ciudad y el puerto, destruyeron edificios y arrasaron la infraestructura costera. Se estima que cientos de personas



murieron a causa del tsunami y las inundaciones subsiguientes. Un caso particular son los meteotsunamis, también conocidos como *tsunamis meteorológicos*, que son ondas largas generadas por perturbaciones atmosféricas que se ven amplificadas en superficie por unas condiciones atmosféricas determinadas, el fenómeno llamado *resonancia de Proudman*. Las olas de los meteotsunamis pueden viajar a velocidades comparables a las de los tsunamis sísmicos, pero generalmente tienen alturas menores, no obstante, en áreas confinadas, como bahías y estuarios, las olas pueden amplificarse si la geometría del puerto es adecuada y alcanzar niveles peligrosos. Aunque pueden ocurrir en cualquier cuerpo de agua, los meteotsunamis son más comunes en mares cerrados y semicerrados, como el Mediterráneo, el Adriático y el mar Negro. Un meteotsunami en el puerto de Ciutadella, en la isla de Menorca, en el Mediterráneo occidental, provocó olas de hasta cuatro metros de altura el 15 de junio de 2006, dañando barcos e infraestructuras portuarias. El evento fue causado por una perturbación atmosférica rápida que generó ondas de presión, que se amplificaron al llegar a la bahía.



Gráfico 10 Secuencia de un meteotsunami (de A a D), denominado localmente como *rissaga*, ocurrido el 15 de junio de 2006 en el puerto de Ciutadella (Menorca)



Fuente: Montserrat *et al.* 2006.

15.

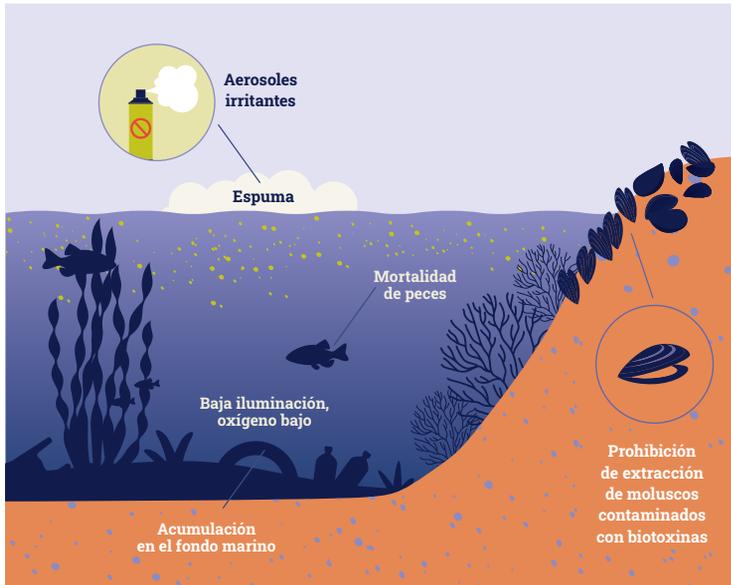
Proliferaciones de algas nocivas

LAS proliferaciones de algas nocivas se definen como aquellos eventos en los que las concentraciones de ciertos organismos fotosintéticos acuáticos (microalgas unicelulares, macroalgas, cianobacterias y ciertos ciliados) nocivos o tóxicos aumentan por encima del rango considerado normal para cada especie. Su presencia puede conllevar efectos negativos en los ecosistemas, en la salud y el bienestar humanos y en la economía de las zonas donde se producen.

De entre los varios miles de especies de microalgas descritas, unas 300 están implicadas en fenómenos de proliferaciones algales nocivas, pero solo unas 100 producen toxinas o están implicadas en diferentes eventos nocivos. Las proliferaciones de algas nocivas asociadas a especies que producen toxinas son peligrosas para la salud humana si estas superan un cierto umbral, ya que se transmiten a través de las redes tróficas y contaminan alimentos (como pescado y marisco), y pueden causar intoxicaciones alimentarias (amnésica, diarreica, paralizante o ciguatera) en caso de ingesta. Otras toxinas contaminan el agua de bebida (microcistinas), se transfieren en aerosoles (ovatoxinas y brevetoxinas) y producen irritaciones respiratorias, o afectan por contacto directo de la piel con el agua (en este caso el agente tóxico no está bien determinado). Además de afectar al ser humano, estas toxinas pueden causar la muerte de peces y otros organismos. Asimismo, algunas proliferaciones de algas no son de naturaleza tóxica, y su nocividad se debe a una importante acumulación de biomasa. A menudo, este exceso de biomasa de las algas no puede ser consumido eficientemente por los componentes de las redes tróficas (microzooplancton, larvas de peces, pequeños crustáceos, etc.) y su degradación por parte de las bacterias disminuye los niveles de oxígeno del agua (imprescindible para que los organismos marinos puedan respirar) y conlleva un deterioro de la calidad del ecosistema en general.

Las proliferaciones de algas nocivas son fenómenos naturales que también se ven facilitados por presiones antropogénicas, como la eutrofización, la modificación y destrucción del hábitat, y la introducción de organismos exógenos a un ecosistema. Estos

Gráfico 11 Esquema de los impactos de diferentes proliferaciones algales nocivas



A veces las proliferaciones de algas son nocivas debido a la alta concentración de biomasa que, al degradarse, consume el oxígeno de la columna de agua, deteriorando así el estado del ecosistema. Las microalgas productoras de toxinas pueden causar mortalidades masivas en las piscifactorías o poblaciones salvajes y pueden producir sustancias tóxicas que se vaporizan produciendo irritaciones respiratorias en los seres humanos. Las toxinas se transmiten a través de las redes tróficas hasta los humanos (detalle a la derecha).

ELABORACIÓN PROPIA

eventos se producen generalmente en verano bajo ciertas condiciones favorecidas por la combinación de una disponibilidad elevada de nutrientes —de origen natural o antropogénico— y un bajo hidrodinamismo (agua relativamente en calma o con poca renovación). Las especies que dan lugar a estas proliferaciones a menudo acumulan quistes de resistencia que constituyen un reservorio de células que potencialmente pueden germinar y proliferar en las condiciones adecuadas. En estas situaciones, unas pocas especies alcanzan concentraciones en el agua por encima de un nivel considerado normal para cada organismo concreto.

Las proliferaciones de algas pueden producir cambios en el color del agua, que toma el color del pigmento del organismo que prolifera (verde, azul, amarillo, marrón o rojo), pero esto no significa que este incremento sea necesariamente nocivo. De hecho, solo en unos pocos casos la coloración del agua implica nocividad. En aguas salobres o dulces abundan frecuentemente cianobacterias de color azul-verde. El término *mareas rojas* se ha utilizado tradicionalmente para referirse a las proliferaciones del grupo de los dinoflagelados.

A nivel global, se han descrito algunos eventos extremos de proliferación de algas nocivas, generalmente como parte de eventos compuestos y asociados a condiciones medioambientales anómalas. Este es el caso de la proliferación de *Pseudo-nitzschia* con altas concentraciones de la toxina ácido domoico que se produjo a finales de la primavera de 2015 a lo largo de la costa oeste de América del Norte como consecuencia de la ola de calor marina conocida como *La Mancha* (del inglés *The Blob*). Este evento extremo causó el cierre de importantes pesquerías en la zona, con las consecuentes pérdidas económicas, además de la muerte de mamíferos y pájaros marinos.

A nivel nacional, sobre todo en Galicia, los episodios de proliferaciones de algas nocivas que causan cierres en la actividad extractiva no son infrecuentes y suelen ocurrir cada año, en su mayoría causados por especies del género *Dinophysis*. En los últimos años, se han producido eventos de proliferación de algas nocivas de excepcional intensidad causados por especies tóxicas, como es el caso de *Alexandrium minutum* en los años 2018 y 2023 en las rías de Vigo y de Pontevedra. El último evento de proliferación de algas nocivas de esta especie tóxica se había producido en el interior de la ría de Ares en 1984, pero en 2018 se extendió de su lugar de ocurrencia habitual (interior de bahías, puertos, etc.) a todas las rías de Vigo y Pontevedra. Las condiciones en las que se produjo este evento tóxico estaban caracterizadas por una alta estratificación provocada por una anomalía positiva en lluvias y descargas de ríos, altas temperaturas y alternancias de procesos de retención y dispersión causadas por la configuración de los vientos. En 2023 se volvió a registrar una reproducción masiva de esta especie bajo condiciones similares, pero esta vez en el interior de la ría de Pontevedra.



Proliferación de *Ostreopsis* cf. *ovata*, en la costa mediterránea. Esta microalga (detalle de la célula microscópica) produce aerosoles tóxicos asociados a irritaciones respiratorias leves en personas expuestas. / E. BERDALET (PAISAJE) Y R. DURO (MICROSCÓPIO), @SCIENCEINIMAGES.



Bateas de mejillón en las Rías Baixas, en Galicia y muestra de fitoplancton obtenida en la ría de Vigo. Los moluscos bioacumulan las toxinas producidas por diversas especies de fitoplancton. Aunque en muchos casos la proliferación no conlleva cambios de color en el agua, la elevada toxicidad de las células determina el cierre de la extracción del producto, impidiendo su comercialización (a veces durante largos periodos). / INTECMAR, YOLANDA PAZOS (BATEAS) Y IEO, S. GONZÁLEZ-GIL (MICROSCOPIO).



Las proliferaciones de algas nocivas tienen costes económicos, como la atención médica de las personas afectadas y la inversión en la monitorización y el control de las microalgas tóxicas y de sus toxinas para prevenir sus impactos en la salud. Algunas microalgas (*Chattonella antiqua*, *Fibrocapsa japonica*, *Chrysochromulina* spp., *Cochlodinium* spp. y *Karlodinium* spp.) matan específicamente peces en hábitats naturales o en zonas de acuicultura. En áreas de producción de marisco, la prohibición de extracción y venta del producto debido a la presencia de algas potencialmente tóxicas (por ejemplo, *Dinophysis acuta* y *acuminata*, *Alexandrium minutum* y *Gymnodinium catenatum*) comporta grandes pérdidas económicas. También se ve afectado el turismo, sobre todo debido a la descomposición de las algas muertas que disminuyen la calidad del agua de la playa y provocan problemas de salubridad. En este sentido, la acumulación masiva de la macroalga *Sargassum* en las playas del Caribe y costa oeste de África constituye, desde hace unos diez años, un caso emergente de proliferación de algas nocivas.

Las proliferaciones de algas nocivas constituyen un problema global complejo que parece estar incrementando en gravedad y frecuencia y, en el caso de ciertas especies, su rango biogeográfico está aumentando, debido en parte al cambio climático global. Por ello, esta problemática ha ganado protagonismo en los últimos cuarenta años en todo el mundo. La presión antrópica en las costas y los océanos (destrucción de hábitats y pérdida de biodiversidad, eutrofización y urbanización), y el calentamiento global estarían favoreciendo un aumento de las proliferaciones de algas nocivas en ciertas zonas. La protección y utilización sostenible del medioambiente es fundamental para reducir esta tendencia y garantizar un océano saludable y resiliente.

dos



**La contribución del
CSIC a la comprensión
y predicción de los
eventos marinos
extremos**

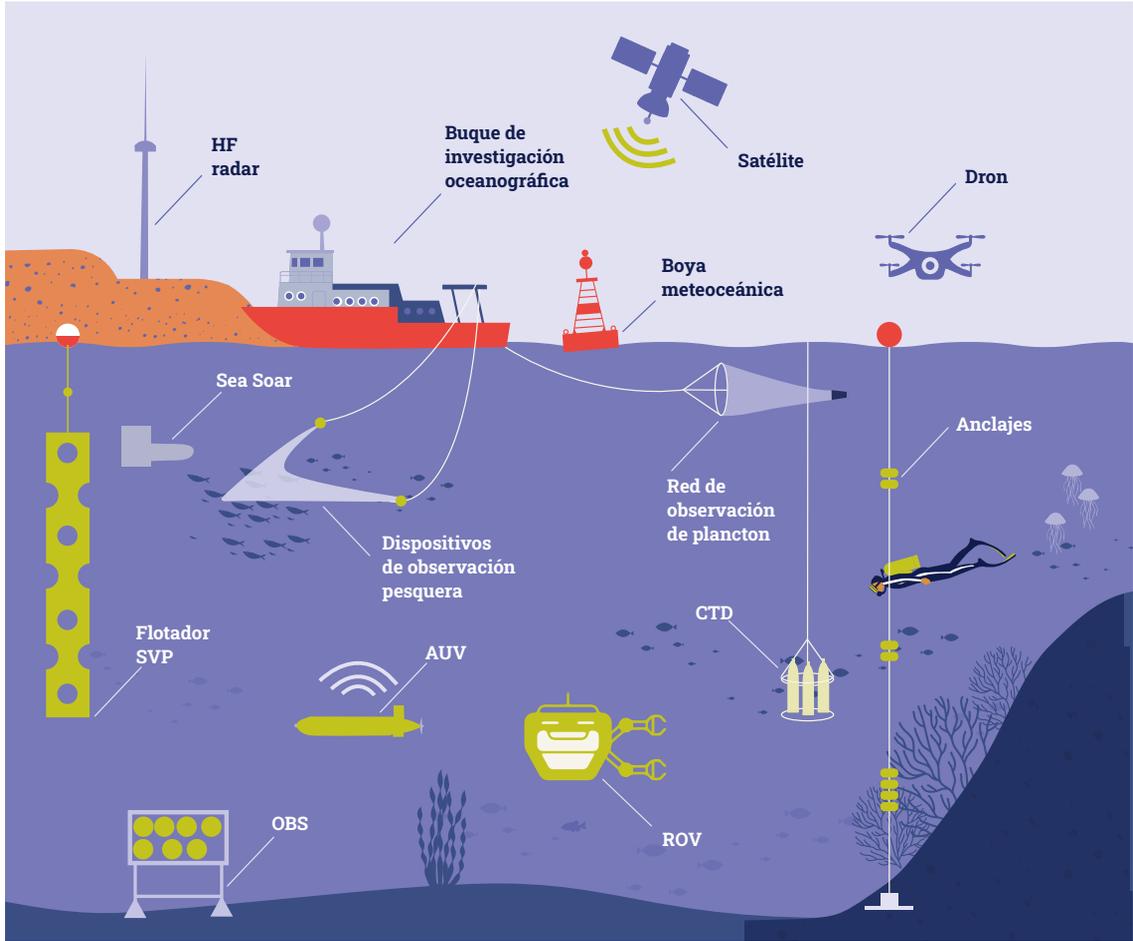


decir, que recoja información de las distintas variables esenciales de forma que se pueda integrar para llevar a cabo una predicción efectiva de los impactos. Por ejemplo, para estudiar las consecuencias de las olas de calor marinas en los recursos pesqueros debemos tener información climática y meteorológica (vientos, humedad relativa, temperatura del aire, presión, etc.), oceanográfica (temperatura superficial del mar, salinidad, estratificación, nutrientes, oxígeno disuelto, clorofila, etc.), de la ecología de los recursos pesqueros (plancton, invertebrados, peces, etc.), así como de la interacción entre todos estos elementos.

Actualmente, algunos sistemas observacionales cumplen parcialmente estos requisitos, es decir, solamente proveen datos de unas pocas magnitudes y, en muchos casos, dan cuenta únicamente de una parte del sistema oceánico, como una estación puntual, una sección vertical o la superficie del mar. No obstante, para disponer de reconstrucciones completas del estado del océano se utilizan modelos de simulación que permiten interpolar y reconstruir las variables necesarias. La combinación y mejoras de los sistemas observacionales ha permitido que esta reconstrucción mediante el uso de modelos, denominada técnicamente *reanálisis*, sea cada vez más ajustada a la evolución real. A partir de aquí podemos realizar predicciones o estudiar posibles escenarios presentes o futuros, y disponer de sistemas de alerta temprana que permitan anticiparnos con cierta probabilidad a la ocurrencia de un evento extremo. Este es el paso final para poder recomendar y establecer acciones que ayuden a mitigar el impacto de los eventos extremos. **Diversos grupos del CSIC han participado y participan activamente en estas tareas desde diversos enfoques a través de programas de investigación nacionales e internacionales. Veamos resumidamente estas actividades para los eventos extremos marinos aquí presentados.**



Gráfico 12 Esquema de un sistema de observación oceanográfica multiparamétrica con los diferentes tipos de instrumentos y estrategias de muestreo



Fuente: adaptado de <https://www.soos.aq/about-us>.

2.2.

Olas de calor marinas

La cuenca mediterránea es un punto caliente de afectación (o impacto) del cambio climático en términos del calentamiento global. Es por ello que las series observacionales largas de temperatura y otros parámetros hidrológicos (salinidad, corrientes y oxígeno) ganan relevancia con el tiempo para poder caracterizar las olas de calor marinas. Actualmente, el CSIC participa en varias iniciativas de seguimiento *in situ* de la variación de la temperatura en la cuenca mediterránea, algunas enmarcadas en iniciativas internacionales y otras de carácter más local. Entre las series más largas, cabe destacar la serie de L'Estartit (Costa Brava), mantenida durante unos 45 años por Josep Pascual, un observador voluntario, con apoyo de institutos del CSIC. Esta es la serie más larga de observación oceanográfica ininterrumpida del Mediterráneo, que incluye varios niveles de profundidad (desde la superficie hasta 80 metros) y ha permitido establecer las tendencias climáticas de calentamiento de las aguas superficiales costeras.

En la misma línea, el CSIC coordina la red TMEDNET, una red observacional de sensores de temperatura del agua en las paredes costeras desde la superficie hasta los 50 metros en las áreas marinas protegidas a nivel de la cuenca del Mediterráneo. Esta red obtiene series temporales de alta resolución de la temperatura junto con muestreos de la evolución de las comunidades marinas, algunas con periodos de observación registrados desde 1997. Además, han permitido identificar la conexión entre episodios de mortalidad masiva concurrente con olas de calor marinas. Por último, el CSIC también coordina y ha contribuido con varias estaciones de la red HYDROCHANGES, cuyo objetivo son los cambios a largo plazo de la circulación del Mediterráneo y, desde 2003, mantiene un anclaje a 1890 metros para registrar cambios de la circulación profunda.

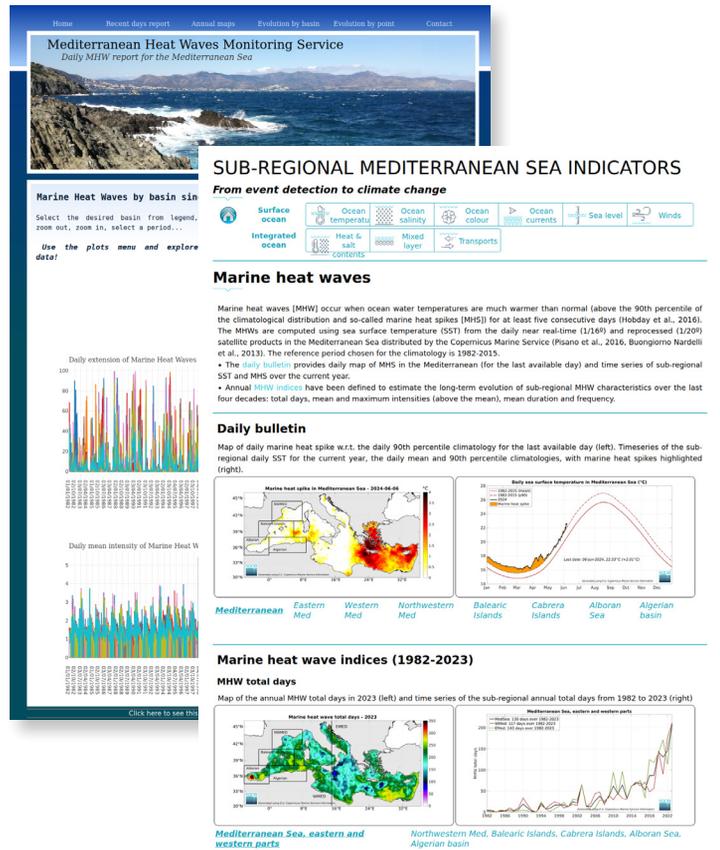
Sin duda, estos esfuerzos son relevantes para documentar eventos singulares de olas de calor extremas. No obstante, para establecer sus características se necesitan series más largas y con más resolución espaciotemporal que la gran mayoría de estas iniciativas. Incluso la serie de L'Estartit, que en términos de lon-



gevidad sería adecuada, tiene una resolución semanal que no permite resolver los detalles de la evolución de este tipo de fenómenos excepcionales. Los eventos persistentes de más de un mes son detectables, pero los sistemas no permiten resolver si se trata de un solo evento o una secuencia de eventos cortos. En este panorama, una alternativa es utilizar la información proveniente de satélites que, en lo que respecta a la observación de la temperatura, es uno de los sistemas más veteranos en términos de cobertura temporal desde el espacio. Ya disponemos de series de cuarenta años que nos permiten analizar la evolución de grandes áreas (por ejemplo, en toda la cuenca del Mediterráneo) con unas resoluciones espaciales de entre 1,5 y 2 kilómetros, y una resolución temporal diaria.

Colocación de sensores de temperatura que se fijan en el sustrato a intervalos regulares de 5 metros entre la superficie y 50 metros de profundidad, realizado en el marco de la red TMEDNET.
/ ALEXIS ROSENFELD EN LA RÉSERVE NATURELLE DE SCANDOLA (CORSICA, FRANCE)

Varias iniciativas de los grupos del CSIC están desarrollando sistemas de detección de olas de calor marinas para obtener las propiedades estadísticas basadas en observaciones satelitales. Estos sistemas ayudan a identificar la evolución de la temperatura en tiempo casi real a escala de la cuenca y de las subcuencas del Mediterráneo, y permiten hacer un seguimiento de la evolución de las anomalías de temperatura.

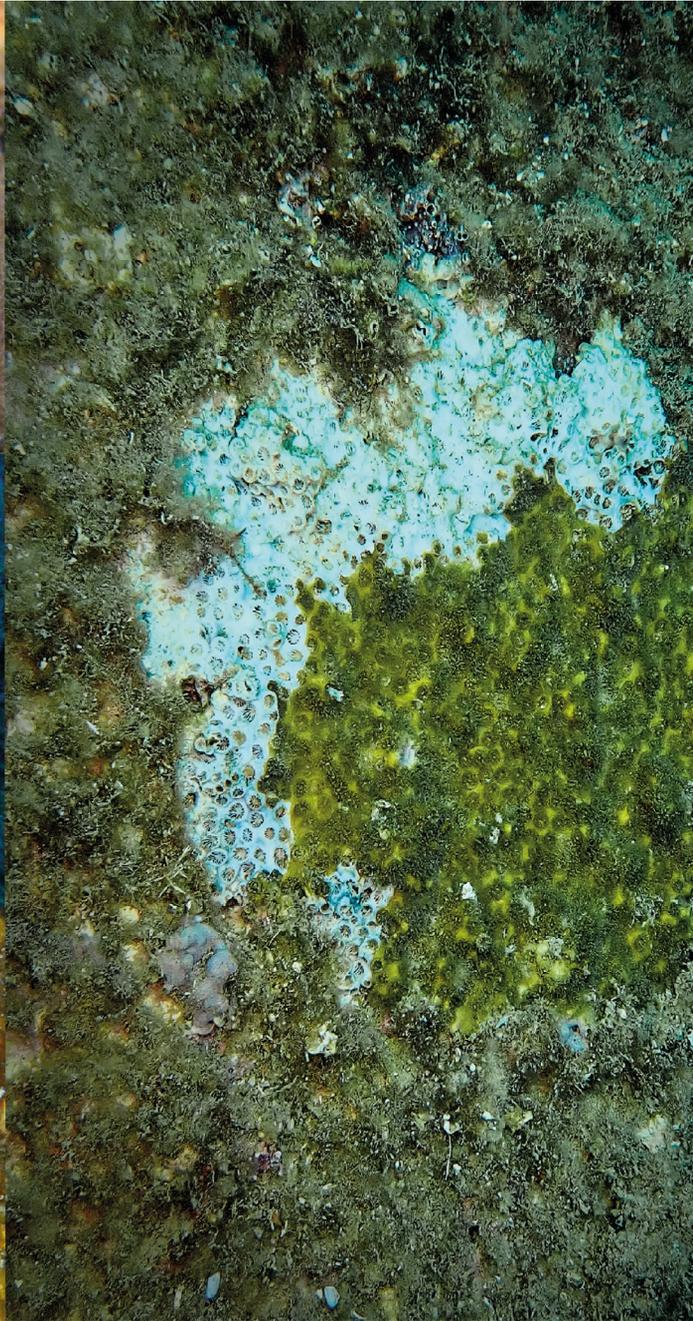


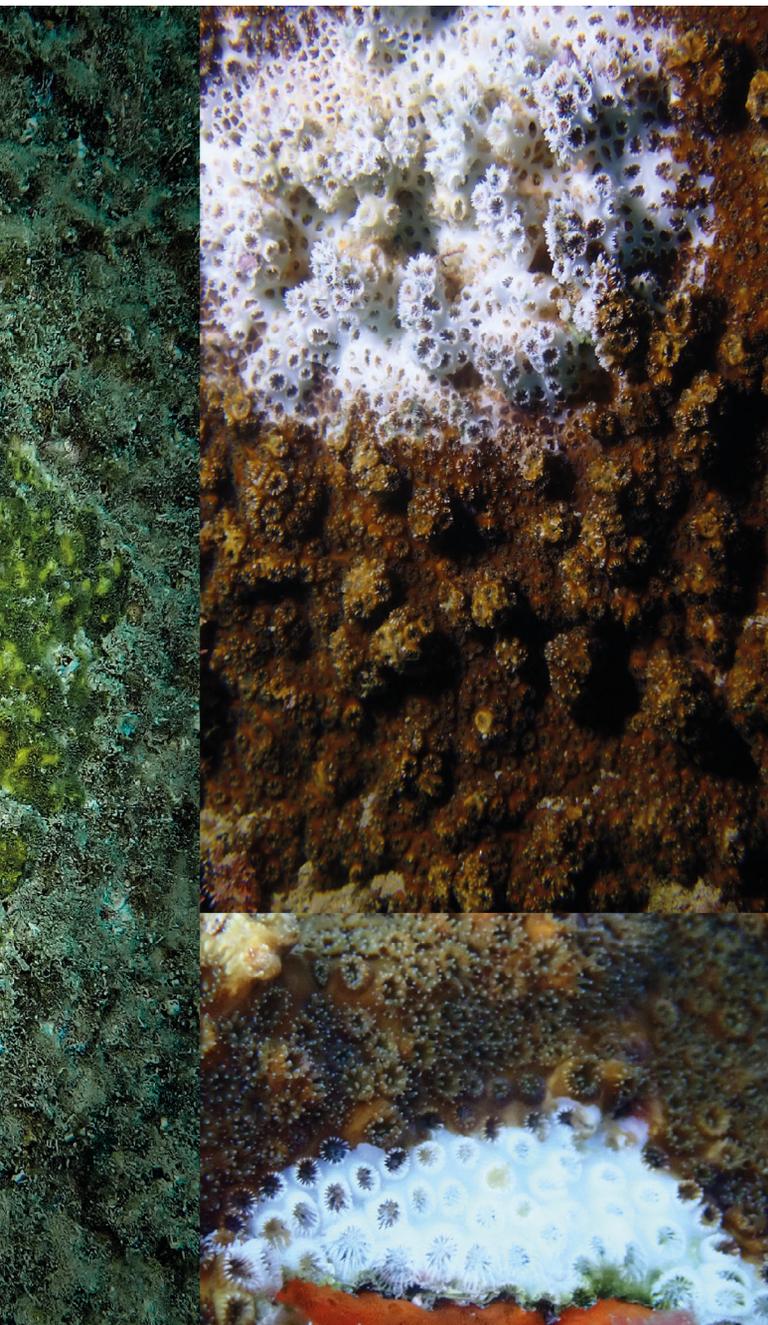
Sistemas de monitorización de las olas de calor marinas desplegados por el CSIC para la cuenca y subcuencas del Mediterráneo a partir de imágenes de satélite.



En gran medida, la existencia de estas series es lo que está permitiendo ahondar en las causas y características de las olas de calor marinas. Trabajos recientes de varios grupos del CSIC han permitido analizar las olas de calor marinas de la superficie del océano entre 1982 y 2022. Se han obtenido algunos resultados relevantes, en primer lugar, sobre el impacto de la metodología en la obtención de las características de las olas de calor marinas en la cuenca del Mediterráneo. Hay que destacar que no se ha podido determinar de forma estadísticamente significativa que haya habido un aumento del número de olas de calor o su intensidad en los pasados cuarenta años. Se ha elaborado, además, un catálogo de olas de calor y se han identificado un total de 20 eventos con categoría severa y extrema, y dentro de esta última específicamente 5 (1989-1990, 1993-1994, 1999, 2001, 2007). Esta clasificación se basa en una combinación de propiedades de las olas de calor (duración, área afectada, intensidad, etc.), pero no con relación a su impacto en el ecosistema, que puede depender de otros factores adicionales de carácter ambiental y biológico, como la época del año, la localización geográfica, el estrés térmico y la proliferación de patógenos, entre otros). Así, en términos de impacto biológico, algunas olas de calor —como la de 1999, catalogada como extrema— fueron particularmente dañinas, ya que afectaron a alrededor de 30 especies bentónicas. Otras olas de calor, como las de 2003 y 2022, sin llegar a la categoría máxima, tuvieron y han tenido un impacto ecológico notable bien documentado.

Por último, dadas las limitaciones que conlleva realizar muestreos sistemáticos en el medio marino, en términos tanto de costes como operativos, los registros que generan las plataformas de ciencia ciudadana en el ámbito marino son una fuente de información adicional complementaria para catalogar la biodiversidad marina y estimar el impacto de los eventos extremos en los ecosistemas marinos. El CSIC lidera dos plataformas de ciencia ciudadana: Observadores del Mar, especializada en el medio marino, y MINKA, más general, ya que incluye el medio marino y el terrestre, que organiza jornadas intensivas de observaciones (*biomaratonés*) de recogida intensiva de datos.





Observaciones de blanqueamiento (*bleaching*) de *Oculina patagonica*, realizadas por ciudadanos voluntarios y obtenidas a lo largo de diferentes puntos del litoral catalán. / FOTOS (DE ARRIBA A ABAJO Y DE IZQUIERDA A DERECHA): JAUME PIERA, @JALABALL, XAVI SALVADOR COSTA, MANUEL MESA, BERTA COMPANYS OLIVA, BERTA COMPANYS OLIVA

2.3.

Fenómenos costeros

SOBRE las zonas del litoral, los sistemas de observación junto con los modelos de predicción son las herramientas fundamentales que permiten anticipar la ocurrencia y los efectos de los eventos marinos extremos. Los sistemas de observación orientados a los eventos extremos de fenómenos costeros son más maduros dado el impacto social que han tenido históricamente. Estos sistemas de medida están compuestos por una gran variedad de instrumentación oceanográfica cuya particularidad es que miden una o varias variables del medio en un punto determinado. Este es el caso de las boyas meteoceánicas, que miden parámetros meteorológicos y oceanográficos como la temperatura del agua, la altura, la dirección y período de las olas, la velocidad y dirección del viento, y la presión atmosférica. En el litoral español, destaca la red de medidas de oleaje del organismo público Puertos del Estado (OPPE). En cuanto al nivel del mar, la red de mareógrafos del OPPE y del IGME (CSIC) proporcionan medidas del nivel del mar en el conjunto del litoral de la península ibérica, las islas Baleares y Canarias, así como de Ceuta y Melilla. Las series históricas constituyen una herramienta fundamental para analizar la subida del nivel medio del mar.

El CSIC ha sido pionero en la utilización de sistemas de seguimiento mediante vídeo para evaluar los impactos causados por temporales extremos y la resiliencia de los diferentes sistemas costeros. Desde el año 2001, ha desarrollado e implementado este tipo de sistemas de observación para obtener información sobre la evolución morfodinámica de las playas y las condiciones de clima marítimo de forma operacional. Además, se están desarrollando nuevas técnicas de monitorización remota para el estudio de la morfología submarina. A partir de una serie de productos derivados de imágenes de cámaras de vídeo se obtienen parámetros como la altura, la dirección y el período del oleaje, la posición y la variación de las barras sumergidas y de la línea de costa, así como la batimetría de la zona somera de la playa. Adicionalmente, el uso de fotografías aéreas o imágenes de satélite también es una herramienta rutinaria para la determinación del impacto de los eventos extremos en la costa. También la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ha creado el Sistema de Notificación



de Observaciones Atmosféricas Singulares (SINOBAS) para recoger y poner a disposición de los ciudadanos información sobre la ocurrencia de ciertos fenómenos que se han denominado *singulares*, caracterizados por ser locales, poco frecuentes, de intensidad significativa y con capacidad de provocar un alto impacto social. En particular, SINOBAS proporciona en la costa avisos de oleaje extremo, tormentas intensas, viento o tornados que pueden generar daños en zonas del litoral.



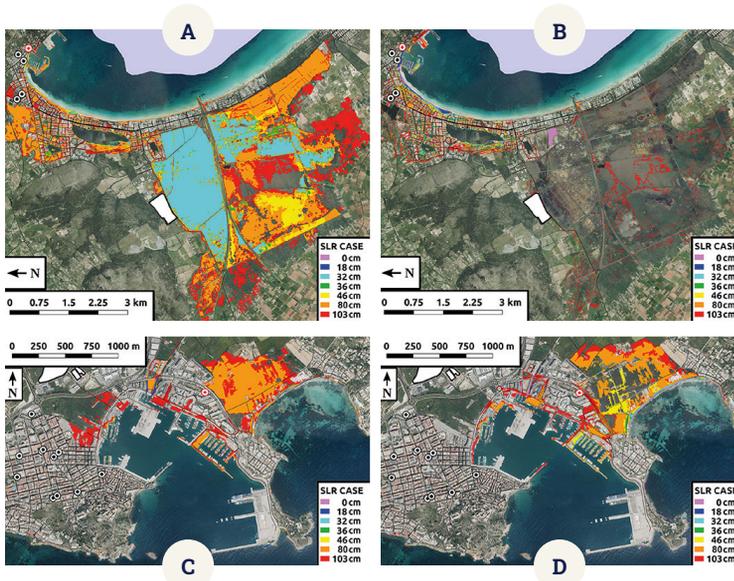
Ejemplo de las playas de la Barceloneta y Somorrostro (Barcelona) antes (arriba) y durante el temporal Gloria (abajo); este fue el temporal más extremo jamás registrado, que afectó a la costa mediterránea en enero de 2020. La videomonitorización permite evaluar con precisión los impactos de los temporales extremos en la costa. / J. GUILLEN

Los avances en la predicción numérica de la atmósfera y del océano están permitiendo afinar los pronósticos sobre la evolución futura de los fenómenos costeros. En el corto plazo (predicciones de menos de tres días), los modelos utilizan datos de observación para simular y predecir la evolución de eventos extremos como tormentas y tsunamis. El OPPE, conjuntamente con la AEMET, produce y distribuye dos veces al día una predicción de viento y de oleaje para el Atlántico Norte y la cuenca occidental del mar Mediterráneo. El sistema de predicción está formado por una serie de aplicaciones, basadas en un modelo de generación de oleaje, que utilizan los campos de viento previstos por el modelo meteorológico de área limitada HARMONIE-AROME, proporcionado por AEMET. El horizonte de esta predicción es de 72 horas y proporciona campos previstos cada hora. Estas predicciones a corto y largo plazo se incorporan a modelos morfodinámicos para determinar la evolución costera y permiten estimar el impacto puntual de los eventos extremos.

A más largo plazo (años y décadas), los cambios inducidos en la costa por procesos que ocurren de manera regular y predecible y por eventos ocasionales extremos pueden modificar la morfología tanto en planta como en el perfil de la costa. El perfil de equilibrio de una playa viene determinado por el régimen medio de oleaje en la zona. Entender cómo las tormentas extremas o los huracanes modifican el perfil que determina la capacidad de disipación de la energía de las olas de la playa es de crucial importancia para establecer estrategias correctas de gestión y es uno de los aspectos relevantes de la investigación que se realiza en el CSIC. En el largo plazo, estos modelos morfodinámicos simulan los efectos de la erosión, la inundación y otros procesos geomorfológicos en la costa.

También en el largo plazo, el aumento del nivel del mar lleva asociado una pérdida permanente de zonas costeras emergidas con impactos ecológicos y económicos generalizados. El retroceso de la costa y la subida del nivel del mar harán que los temporales ciclónicos provoquen daños más severos en el conjunto del litoral español, con una erosión generalizada y la ampliación de las zonas inundables. Estos efectos, que ocasionarán estos cambios durante las próximas décadas, se han evaluado en el CSIC a partir de modelos numéricos predictivos de inundación y

Gráfico 13 Extensión de las inundaciones permanentes y extremas, por distintas estimaciones de subida del nivel del mar, sobre el humedal de Alcúdia, Mallorca (A, B) y el puerto de Ibiza (C, D)



Los caminos y calles están marcados con líneas negras. Las instalaciones educativas se indican con puntos negros, los edificios sanitarios con cruces rojas y las plantas de producción de energía con polígonos blancos.

Fuente: Luque *et al.*, 2021.

propagación. Estos modelos tienen en consideración el impacto de eventos extremos de marejadas y oleaje (definidos por períodos de retorno de cien años) junto con la subida del nivel del mar, forzada por escenarios climáticos bajo diferentes condiciones de emisiones de gases de efecto invernadero. Las proyecciones de subida de nivel del mar para el año 2100 oscilan entre 32 cm en un escenario de emisiones medias y 82 cm en un escenario de emisiones severas. En el caso de Baleares, la pérdida de la superficie emergida de las playas se cuantificó entre 7,8 km² y 27,7 km² en el escenario de emisiones medias y hasta entre 10,9 km² y 36,5 km² en el escenario de emisiones severas. Esta disminución de la superficie emergida, que en algunas playas representa la pérdida de más del 50 % de su superficie hacia finales de



siglo, conlleva una pérdida de servicios turísticos recreativos que podría representar una disminución del producto interior bruto (PIB) de hasta el 7,2 % con respecto al PIB de 2019.

La detección de tsunamis en las costas españolas se enmarca en el Sistema Nacional de Alerta por Maremotos (SINAM), un sistema coordinado para la detección de sismos capaces de generar maremotos. El SINAM parte de la información recopilada por la Red Sísmica Nacional, la red de mareógrafos REDMAR del OPPE, los sistemas de detección del IEO (CSIC), así como los demás sistemas de detección marina de las distintas Administraciones públicas. El CSIC también realiza la evaluación de los riesgos en la zona costera ocasionados por eventos extremos a partir de la identificación de los fenómenos excepcionales ocurridos en el pasado, tanto a escalas históricas como geológicas, y de la cartografía de las zonas potencialmente peligrosas. Por ejemplo, se llevan a cabo estudios para la identificación de los depósitos sedimentarios generados por temporales extremos, la evaluación de los impactos geomorfológicos causados por tsunamis y la interpretación de los mecanismos que los generaron (terremotos, deslizamientos o actividad volcánica), así como la localización de zonas de fallas activas que potencialmente pueden causar terremotos y derivar en un riesgo para la zona costera. Todas estas informaciones contribuyen a una mejora en la determinación de la recurrencia de eventos extremos y de su intensidad, y permiten optimizar la predicción de la vulnerabilidad. En cuanto a los meteotsunamis, el CSIC colabora con la AEMET para la detección temprana de condiciones susceptibles de generación de este tipo de fenómenos a partir de modelos numéricos de propagación de onda larga, especialmente en las costas de Ciutadella, en Menorca.

2.4.

Proliferaciones de algas nocivas

DESDE que en el año 1976 se produjese una intoxicación masiva a nivel europeo después de consumir mejillones de las rías gallegas, se puso de manifiesto la necesidad urgente de establecer un programa de monitorización de las proliferaciones de algas nocivas.

En el Estado español el seguimiento y control de estos eventos de acuerdo con la normativa europea corre a cargo de las comunidades autónomas, que lo implementan en función del sector económico (acuicultura, turismo, etc.) o el medioambiente que pueda verse afectado. En Galicia, este sistema de monitorización semanal en las rías gallegas se llevó a cabo en primera instancia por parte del IEO y posteriormente se transfirió, en los años noventa, a la Xunta de Galicia. En la actualidad lo realiza el Instituto Tecnológico del Control del Mar (INTECMAR). Cada semana proporciona información de distintas estaciones de las rías gallegas acerca de los recuentos de fitoplancton potencialmente tóxico (como *Dinophysis acuminata*, *D. acuta*, *D. caudata*, *Anfidomataceas*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Alexandrium* spp., *Gymnodinium catenatum*, etc.) y de biotoxinas (paralizantes, amnésicas o lipofílicas, como el ácido okadaico, toxinas diarreicas, yesotoxinas y azaspirácidos). En función de si estos valores superan ciertos umbrales, se decreta el cierre o apertura de las áreas de producción acuícola en las rías. Además, una red de observación oceanográfica, en colaboración con centros del CSIC en Galicia, recoge datos que permiten caracterizar las condiciones ambientales, como la temperatura, la salinidad, el pH, el oxígeno o la clorofila en la columna de agua. La red de observación oceanográfica se completa con una red costera para la medida discreta de dichos parámetros mediante medidores portátiles, o con sistemas de registro continuo mediante instrumentos automatizados.

Centros del IEO en Galicia mantienen asimismo el monitoreo de estaciones del sistema de observación multidisciplinar en las rías de Vigo y A Coruña dentro del programa de series históricas RADIALES. Estas series temporales recogen información de las condiciones físicas, biogeoquímicas y del plancton desde hace más de treinta años, con una resolución temporal mensual incrementada a semanal en los últimos años. Estos datos



oceanográficos, junto con otras fuentes de información tanto de agencias regionales (Augas de Galicia, con información de caudales y calidades de aguas de ríos, y Meteogalicia, con información meteorológica, entre otras) como nacionales (AEMET y Puertos del Estado), han permitido mejorar la caracterización de las condiciones oceanográficas en las que se producen estas proliferaciones de algas nocivas y avanzar hacia la predicción, herramienta fundamental para la prevención de los impactos de estos eventos.

En Cataluña se lleva a cabo un seguimiento exhaustivo para garantizar que la calidad del agua en toda la región se ajuste a los estándares establecidos por la directiva marco del agua (DMA), una normativa europea. Este control se aplica tanto en ecosistemas acuáticos naturales como en instalaciones acuícolas y zonas recreativas. La aplicación de la DMA comporta el seguimiento de las microalgas en la columna de agua. Sin embargo, en los últimos años se ha detectado la proliferación de microalgas que crecen adheridas a sustratos del fondo marino (por ejemplo, macrófitos o rocas), que requiere un protocolo de muestreo diferente para su estudio y detección. Este muestreo se está implementando en Cataluña a través de la Agència Catalana de l'Aigua en colaboración con el CSIC, con el objetivo de prevenir las afecciones causadas por la proliferación de la microalga *Ostreopsis* en ciertas playas en verano y determinar su cierre si fuera necesario. La expansión de esta especie en el litoral mediterráneo y en playas atlánticas de Francia está motivando la incorporación del protocolo de muestreo bentónico. Al tratarse de un fenómeno emergente, los investigadores del CSIC y otras entidades públicas han iniciado colaboraciones para establecer una base de datos que permita identificar la tendencia de las proliferaciones de estas microalgas.

Además de la observación *in situ* y en combinación con la misma, nuevos métodos desarrollados de manera colaborativa entre varios institutos del CSIC están resultando útiles para la detección de proliferaciones de algas que muestran coloración de las aguas (sean tóxicas o no) utilizando satélites de alta resolución con sensores de color, como Sentinel 2A/B.



El CSIC está utilizando modelos acoplados de hidrodinámica (corrientes, temperatura y salinidad) y biogeoquímica marina (nutrientes y plancton) para simular de manera integrada todos los procesos relacionados con la proliferación de algas nocivas en eventos concretos. Asimismo, los modelos se han utilizado para predecir el transporte por advección de células tóxicas, una vez que han sido detectadas por el sistema de monitorización, como parte de un sistema de alerta temprana iniciada con el proyecto europeo ASIMUTH y continuada con los proyectos MarRISK y PRIMROSE.

La posibilidad de disponer de un sistema de alerta temprana de proliferaciones de algas nocivas que permita conocer con antelación suficiente la probabilidad del momento y el lugar en que se pueden producir supondría un importante avance para el sector acuícola. De este modo, se podrían tomar decisiones que reducirían de manera significativa los impactos económicos. Por otro lado, este sistema también podría aportar información en caso de cierres en las zonas de explotación acuícola cuando las condiciones son favorables para que se produzca la apertura de las zonas de producción cerradas.

Como ocurría en el caso de Galicia, este sistema de alerta temprana solamente es posible mediante la combinación de observaciones (*in situ* y de satélite) y modelos, en un esfuerzo que involucra a múltiples actores. La disponibilidad de los datos en tiempo real (o cuasi real) es un elemento clave en un sistema de alerta temprana. Para ello, los datos deben ser compartidos y proporcionarse en formatos estándar e interoperables. En términos generales, los datos sobre los eventos nocivos y tóxicos son compartidos a nivel internacional, con países concretos con los que España tiene colaboraciones establecidas, y con las plataformas y grupos de trabajo del Comité Intergubernamental de Oceanografía de la Unesco.



Gráfico 14 Elementos del boletín piloto del sistema de alerta temprana de proliferaciones de algas nocivas en Galicia desarrollados durante los proyectos ASIMUTH y PRIMROSE



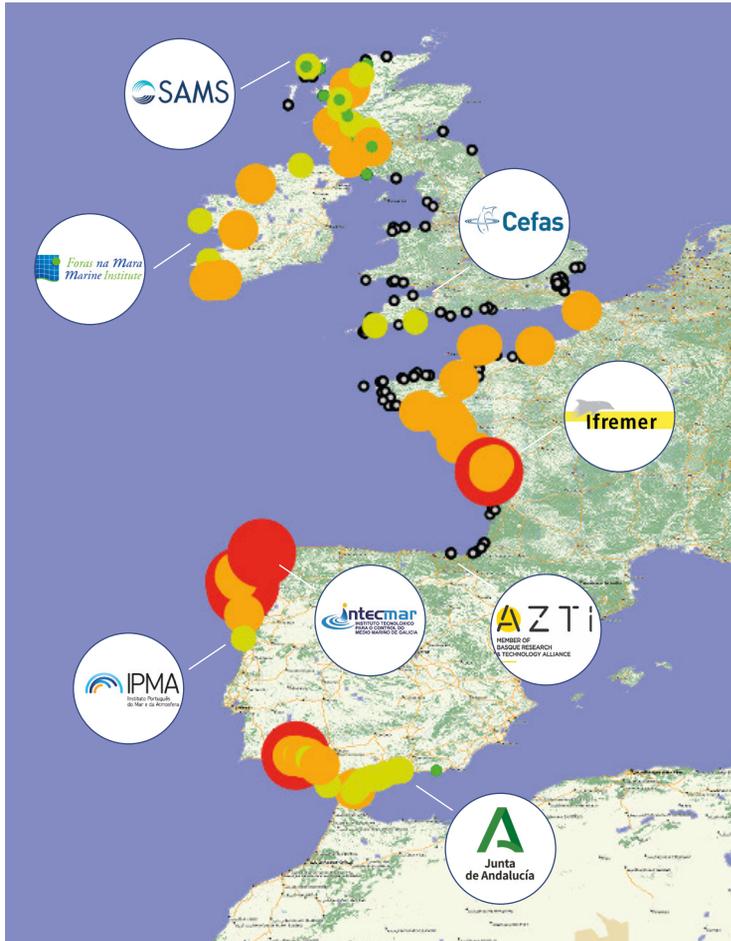
Los datos obtenidos de las distintas fuentes que se muestran en la figura son procesados utilizando lenguajes de programación (Python) y se almacenan en bases de datos (PostgreSQL).



Dando un paso más allá, el CSIC, en el marco del proyecto europeo PRIMROSE, ha desarrollado servicios web que han permitido mejorar la visualización y el análisis de datos de recuentos y toxinas de especies potencialmente responsables de las proliferaciones de algas nocivas, contribuyendo a disponer los datos para el usuario final de una forma más eficiente, transparente y sencilla. Esta colaboración puede ayudar al desarrollo de sistemas de alerta temprana transfronterizos, además de incrementar nuestro conocimiento acerca de la dinámica de estas especies más allá del ámbito regional. La existencia de estos programas de monitoreo es eficiente para evitar que productos marinos contaminados lleguen a los consumidores. En el caso de proliferaciones emergentes como la de *Ostreopsis*, el conocimiento obtenido en los otros casos de superabundancia de algas nocivas está permitiendo realizar un seguimiento coordinado para establecer la línea de base de estos eventos y poder caracterizar y predecir su evolución futura.



Gráfico 15 Mapa de proliferaciones de algas nocivas a nivel europeo de la especie *Dinophysis acuminata* (productora de toxina diarreica) durante septiembre de 2020



Los colores más intensos y mayores tamaños se refieren a un mayor número de células de fitoplancton nocivo. Mapa obtenido del servicio web desarrollado en el marco del proyecto PRIMROSE para compartir datos en formatos estandarizados e interoperables.

tres



Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

|||||

Los **eventos marinos extremos** más severos suelen aparecer como eventos compuestos, es decir, donde varias anomalías extremas de diferente naturaleza se combinan en forma de causa-efecto (por ejemplo, una ola de calor marina induce mortalidad en una población de coral y facilita una proliferación algal que puede resultar nociva). Estos eventos son **caracterizados estadísticamente como eventos de baja probabilidad** a partir de series temporales de observaciones.

|||||

La comprensión de los eventos marinos extremos, su predicción y la posible mitigación de sus impactos requiere de **sistemas observacionales multidisciplinares, con alta resolución espacial y temporal**. Hoy en día, sin embargo, existen pocos sistemas observacionales que ofrezcan series temporales lo suficientemente largas como para cuantificar de manera adecuada las características de los eventos extremos.

|||||

Las olas de calor marinas, los fenómenos costeros y las proliferaciones de algas nocivas son **fluctuaciones naturales** del medio marino donde concurren procesos biogeoquímicos y físicos de interacción atmósfera-océano. Se califican como *extremos* según el grado de desviación de los valores de las magnitudes que los caracterizan (como la temperatura del mar, la altura de ola o la concentración de fitoplancton) respecto a valores de referencia. Su impacto en la sociedad aumenta debido fundamentalmente al cambio climático y al factor humano.

|||||

Mediante la observación, el análisis de los datos y la modelización se pueden diseñar e implementar **sistemas de alerta temprana** para prevenir y mitigar los impactos de los eventos marinos extremos en las sociedades humanas y los recursos económicos procedentes del mar. El CSIC ha participado y continúa implicado activamente en el desarrollo y puesta en funcionamiento de diversas iniciativas regionales, nacionales e internacionales para **detectar, monitorizar y predecir eventos extremos marinos como los presentados en este documento**. Esta estrategia se enmarca en los Objetivos del Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, que plantean conseguir un océano y unas costas donde las comunidades humanas y las infraestructuras disfruten de mayor seguridad frente a los peligros de los eventos marinos extremos.

|||||

Las **olas de calor marinas** pueden comportar grandes impactos en la estructura y evolución de los ecosistemas marinos. Se ha documentado que olas de calor extremas están, en general, asociadas a eventos de mortalidad masiva de especies marinas. En el Mediterráneo, a pesar del calentamiento global (de hasta 0,06 °C por década), **los análisis de temperatura de la superficie del mar de los últimos cuarenta años (en el periodo 1982-2022)** no indican un aumento estadísticamente significativo de las características de las olas de calor marinas. Esto puede demostrar cierta resiliencia del ecosistema mediterráneo en general, aunque no garantiza que pueda mantenerse en el futuro si continúa el calentamiento global.

|||||

Los sistemas de observación orientados a los eventos extremos de **fenómenos costeros** son más maduros debido a su impacto social a lo largo de la historia. Las redes de observación (gestionadas por la entidad pública Puertos del Estado y el CSIC) proporcionan medidas de las variaciones del nivel del mar en el conjunto del litoral. El CSIC ha sido pionero en la implementación de **sistemas complementarios de vídeo-observación** para el estudio de la dinámica de las playas y la morfología submarina, necesarios **para analizar y cuantificar el impacto de los eventos marinos extremos**.

|||||

Por lo que respecta a las **proliferaciones algales nocivas, el principal riesgo para la salud humana consiste en la intoxicación por consumo de marisco**, contaminado por biotoxinas producidas por microalgas. En España, siguiendo la normativa europea, **existe un sistema riguroso de seguimiento y control de estos eventos en las zonas de producción**, que incluye la toma de muestras biológicas en la columna de agua y el análisis de las toxinas en los productos marinos. **El CSIC participa** en estudios diversos que han contribuido a la comprensión de la dinámica recurrente o excepcional de estos eventos (que pueden comportar la prohibición de extracción de marisco durante varios meses cada año), **colaborando con las autoridades sanitarias para la prevención de los impactos en la salud y en la economía**.

|||||

Los avances en la predicción numérica del sistema atmósfera-océano están permitiendo mejorar las predicciones de los **fenómenos costeros**. A corto plazo (por ejemplo, en pre-

dicciones de menos de tres días) se puede anticipar la evolución de tormentas, tsunamis, viento y oleaje, emitir avisos a la ciudadanía y estimar el impacto puntual de los eventos extremos.

|||||

A largo plazo, la información existente y las proyecciones futuras de los diferentes escenarios del cambio climático permiten establecer probabilísticamente rangos de valores sobre la **evolución futura de la costa**, debidos tanto a procesos ocasionales y extremos como a regulares y progresivos (por ejemplo, la subida gradual del nivel del mar). Estos rangos son necesarios para poder **elaborar políticas de gestión en materia de inundaciones y gestión del litoral**.

|||||

La **combinación de observaciones in situ y de satélite con modelos** acoplados de hidrodinámica y biogeoquímica marina posibilita **desarrollar sistemas de alerta temprana**. En el caso de las proliferaciones de algas nocivas, la difusión de la información del sistema de alerta temprana a través de boletines puede ayudar a prevenir intoxicaciones alimentarias por consumo de marisco contaminado con toxinas producidas por fitoplancton. Estos boletines de información también son útiles para los productores y comercializadores de productos marinos a la hora de planificar su actividad y reducir el impacto económico de los cierres en la producción. La **experiencia obtenida a lo largo de más de cuarenta años** permite abordar nuevas proliferaciones algales nocivas emergentes y eventos extremos en coordinación con otros países que se vean afectados de manera similar.

Recomendaciones

Para la gestión política:



Para conocer las causas y consecuencias de los **eventos marinos extremos** y poder predecirlos cada vez con mayor exactitud, es necesario **disponer de un sistema de información multidisciplinar que recoja datos meteorológicos, oceanográficos y biogeoquímicos**. Los eventos extremos pueden superar los períodos habituales de monitorización. En este sentido, **la incorporación de datos geológicos e históricos de estos eventos** extremos puede dar una **visión más robusta** tanto para caracterizarlos como para entenderlos mejor. Actualmente, existe una amalgama de instituciones, departamentos y agencias en todos los niveles de gobierno (local, regional, estatal y europeo) gestionando, a veces de forma solapada, sistemas de observación en el ámbito marítimo. Un **sistema de información** centralizado, al estilo de la NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica) estadounidense, podría ser un ejemplo a imitar. Sin embargo, un modelo **descentralizado sería válido y eficaz siempre que se asegure de contar con estructuras de coordinación intrainstitucional** para alcanzar una cobertura óptima, siguiendo unos estándares de intercambio de información multidisciplinar en la línea de los principios FAIR (del inglés *findable, accessible, interoperable y reusable*) de la Unión Europea.



Los **sistemas de alerta temprana son necesarios** para mejorar la gestión y protección del medio marino y sus recursos, en analogía con lo que ocurre con la gestión de las áreas terrestres. En el caso de los eventos relacionados **con los fenómenos costeros**, los **sistemas de alerta temprana son muy maduros** y su responsabilidad recae sobre las agencias meteorológicas (AEMET, METEOCAT, METEOGALICIA, EUSKALMET), con colaboración de otras instituciones (como Protección Civil y SASEMAR, entre otras). **Algo similar ocurre con los eventos de proliferación de algas nocivas**, que recaen sobre las Administraciones autonómicas. Sin embargo, **respecto a las olas de calor marinas no existen estos sistemas**, más allá de los esfuerzos de los grupos de investigación del CSIC en términos de monitorización. En este sentido, cabe destacar **la importancia de implementar** estos sistemas de alerta también **en las áreas marinas protegidas**, que son indicadoras del estado general de los ecosistemas marinos, para **contribuir a mitigar el impacto** de eventos extremos. Se debe **prever la gestión a corto, medio y largo plazo de los cambios** que estos eventos extremos puedan ocasionar, **con medidas de protección y adaptación de los usos del territorio** en estas zonas.

|||||

Un elemento clave y determinante en un sistema de gobierno multinivel ampliamente descentralizado como el español es el desarrollo de **mecanismos de coordinación y cooperación efectiva entre las diferentes administraciones** (locales, autonómicas, regionales, estatales y europeas). Estos mecanismos de coordinación han de llevar a cabo una integración de políticas y un diálogo organizativo e institucional entre departamentos y agencias. Es decir, deben tratar de optimizar normativas que armonicen las políticas orientadas a preservar y mejorar la resiliencia de los ecosistemas marinos frente al impacto de eventos marinos extremos.

|||||

La combinación de los eventos marinos extremos, el factor humano y el cambio climático a largo plazo son una amenaza creciente sobre nuestras costas. **Es preciso establecer consensos políticos estables, basados en el conocimiento, y la toma de decisiones en fundamentada en evidencia científica (o, al menos, informadas por ella) para desarrollar una gestión resiliente del medio litoral y sus ecosistemas.**

|||||

La **transferencia a la sociedad** del conocimiento adquirido, las observaciones y los sistemas de alerta temprana para reducir los impactos de los eventos extremos **debe incluir** aspectos como la **utilización de nuevas tecnologías y la educación;** elementos complejos y que tienen un amplio margen de mejora para aumentar su eficiencia, y en los cuales el CSIC también ha manifestado la necesidad de implicarse desde distintos ámbitos.

Para las empresas:

|||||

Es necesario **incorporar y desarrollar nuevas tecnologías** (incluidos sensores de bajo coste) **y estrategias de muestreo** para recoger de forma masiva nueva información. Debe **fomentarse** la recogida de datos de **plataformas de oportunidad**, aprovechando las actividades de las empresas que explotan los recursos marinos, sector conocido como *economía azul* (como las flotas pesqueras, la acuicultura y el turismo recreativo), e infraestructuras lejos de la costa, como los parques eólicos marinos.

|||||

Se requiere inversión en I+D+i para superar las limitaciones técnicas. Por ejemplo, para la utilización de **métodos no invasivos que eviten la recolección de organismos vivos**, mediante sistemas submarinos robotizados, un sector tecnológico en alza gracias a la incorporación de técnicas de inteligencia artificial.

|||||

Es urgente priorizar medidas y recursos para desarrollar e **implementar métodos para la recuperación y restauración de los ecosistemas marinos** (como la microrrestauración, las vedas y la ampliación de espacios protegidos), fomentando un uso más sostenible que contribuya a una mayor resiliencia ante estos eventos. Es esencial la participación e implicación de las empresas del sector de la economía azul en la toma de decisiones para garantizar la salud de los océanos.

Para la sociedad:



En la actualidad, debemos y podemos **fomentar la ciencia ciudadana sobre el ámbito marino**. La obtención de datos de los diversos componentes del ecosistema marino constituye una de las principales limitaciones para comprender los impactos. Es inviable desde un punto de vista económico y humano que la Administración pueda proporcionar sistemas de observación que cubran todo el espacio marítimo estatal a las escalas necesarias. La aportación de los **ciudadanos voluntarios para la observación del medio marino** puede ayudar a cubrir las carencias y complementar los sistemas existentes.



Promover iniciativas de gestión del espacio marítimo para hacer frente y mitigar de forma consensuada los riesgos que representan los eventos extremos marinos y el cambio climático. Se trata de organizar espacios de discusión donde todos los componentes de la sociedad, la administración, la academia, la empresa y los ciudadanos estén representados de forma no jerarquizada. Tales iniciativas se están aplicando con éxito a nivel autonómico en Cataluña en relación a la sostenibilidad de la pesca (comercial y recreativa) y han sido aprobadas en el seno del Parlamento Europeo («Informe sobre la cogestión de la pesca en la Unión y contribución del sector pesquero a la aplicación de medidas de gestión»). Dichas iniciativas podrían extenderse genéricamente hacia otros ámbitos, como la gestión del litoral y la regulación de las actividades recreativas, entre otras actividades.



Los eventos marinos extremos son fenómenos naturales que se ven **agravados por el cambio climático y otros factores antropogénicos**. Es **en esta componente humana donde debemos actuar**. Necesitamos fomentar y priorizar la **educación de la ciudadanía en el conocimiento, el respeto y la protección del medio marino**, dada su importancia fundamental en el clima y como fuente de recursos.

cuatro



Listado de centros



CENTRO	PÁGINA WEB	CORREO ELECTRÓNICO
Centro de Estudios Avanzados de Blanes (CEAB, CSIC)	www.ceab.csic.es	direccion.ceab@csic.es
Instituto de Ciencias del Mar (ICM, CSIC)	www.icm.csic.es	direccion.icm@csic.es
Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN, CSIC)	www.icman.csic.es	direccion.icman@csic.es
Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA, CSIC)	idaea.csic.es	direccion.idaea@csic.es
Instituto Español de Oceanografía (IEO, CSIC)	www.ieo.es	webmaster@ieo.csic.es
Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC)	www.igme.es	sec.dg@igme.es
Instituto de Investigaciones Marinas (IIM, CSIC)	www.iim.csic.es	direccion.iim@csic.es
Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA, CSIC-UIB)	imedea.uib-csic.es	direccion.imedeaa@csic.es
Unidad de Tecnología Marina (UTM, CSIC)	www.utm.csic.es	direccion.utm@csic.es

cinco



Para saber más



AGUILERA, C. (2023). *INFORME sobre la cogestión de la pesca en la Unión y contribución del sector pesquero a la aplicación de medidas de gestión | A9-0119/2023 | Parlamento europeo*. Recuperado 15 de octubre de 2024, de https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0119_ES.html



CIESM Hydrochanges Program. (s. f.). <https://www.ciesm.org/marine/programs/hydrochanges.htm>



Harmful Algal Information System. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://haedat.iode.org/>



T-MEDNet. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://t-mednet.org/>



ICES-IOC Working Group on Harmful Algal Bloom Dynamics (WGHABD)– Harmful Algal Bloom Programme. (2007, julio 12). <https://hab.ioc-unesco.org/ices-ioc-working-group-on-harmful-algal-bloom-dynamics-wghabd/>, <https://hab.ioc-unesco.org/ices-ioc-working-group-on-harmful-algal-bloom-dynamics-wghabd/>



MarRisk. (s. f.). *Centro Tecnológico del Mar*. Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://cetmar.org/projects/marrisk/>



MINKA. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://minka-sdg.org/>



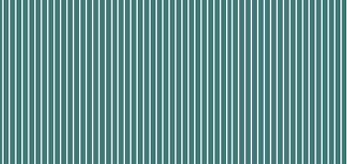
Observadores del Mar. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://www.observadoresdelmar.es/>



Shellfish Safety - PRIMROSE Project - Harmful Algal Blooms. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://shellfish-safety.eu/?lang=es>



Series Temporales de Oceanografía en el Norte de España. (s. f.). Recuperado 15 de octubre de 2024, de <https://www.seriestemporales-ieo.net/>



Ciencia para las Políticas Públicas



Informe de transferencia
de conocimiento



SCIENCE  POLICY