



# La desoxigenación de los océanos: un problema de todos

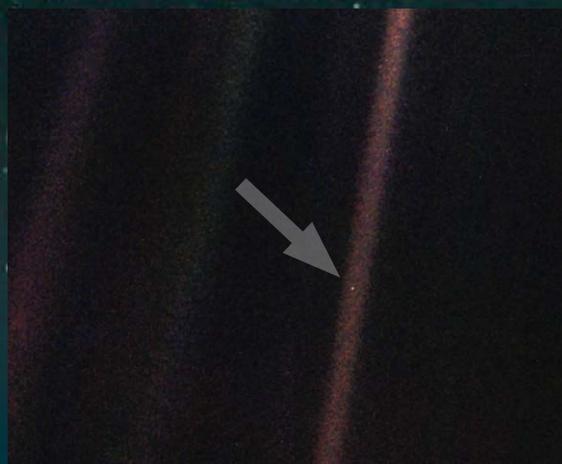
**Causas, impactos, consecuencias y soluciones**

**Resumen para los responsables de formular políticas**



# INTRODUCCIÓN

Más personas han visitado la luna que las mayores profundidades del océano. No obstante, los 7700 millones de personas que viven en la Tierra dependen de un océano sano y funcional, lo conozcan o no. El océano representa el 97% del espacio físico habitable del planeta y es fundamental para mantener la vida en la Tierra. El famoso astrónomo estadounidense Carl Sagan, ya fallecido, identificó la Tierra como “el punto azul pálido” en la imagen más lejana de la Tierra jamás tomada, captada en la década de 1970 por la sonda espacial Voyager 1 desde 6 mil millones de kilómetros de distancia. Sagan lo resumió así:



La Tierra: un punto azul claro © NASA/JPL-Caltech

*“...Eso es nuestro hogar. Eso somos nosotros. Allí viven y han vivido todas las personas que amas, que conoces, de las que has oído hablar y que han existido jamás”.*

Por lo tanto, es asombroso que aún no nos hayamos dado cuenta del pleno impacto que nuestras actividades han tenido en el océano, que sustenta la vida, domina nuestro mundo y define su color desde la distancia. El Informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2019 sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante<sup>1</sup> presenta una severa advertencia de los cambios que hemos provocado y, junto con esa publicación, este nuevo informe sobre la desoxigenación de los océanos forma parte de un ejercicio urgente de sensibilización mundial para impulsar una ambición mucho mayor y una acción más rápida y decisiva.

Sorprendentemente, solo desde el año 2000 se han realizado esfuerzos importantes y dedicados a aumentar la sensibilización y comprensión de las consecuencias de las emisiones de gases de efecto invernadero en los océanos. Actualmente sabemos que el dióxido de carbono que emiten las actividades humanas está dando lugar a condiciones de mayor acidez en el océano –el llamado fenómeno de la acidificación de los océanos–. Solo en la última década se ha empezado a reconocer más ampliamente que la temperatura de los océanos del mundo también está siendo afectada considerablemente como consecuencia del efecto que el dióxido de carbono y otros potentes gases de efecto invernadero están teniendo en la atmósfera de la Tierra. Aproximadamente un 93% del posible calentamiento atmosférico causado por las emisiones desde mediados del siglo XX ha sido absorbido por el océano, creando el fenómeno del calentamiento oceánico, o lo que actualmente podría describirse más correctamente por la escala del efecto como calentamiento oceánico. La conciencia de estos dos fenómenos, además de otras preocupaciones como la sobrepesca, la contaminación y la destrucción de hábitats, ha comenzado a suscitar una gran preocupación por las repercusiones en la biodiversidad marina y la funcionalidad del océano en su conjunto, y la forma en que esto puede influir en cuestiones como el clima, el éxito de las cosechas y el suministro de agua, con consecuencias para las personas en todo el mundo.

Este resumen y el informe técnico completo que lo acompaña<sup>2</sup> muestran que el calentamiento del agua de los océanos y su acidificación progresiva no son en modo alguno las únicas consecuencias importantes a escala mundial de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito marino. Desde hace algunas décadas se sabe que la escorrentía de nutrientes de la agricultura ocasiona que se formen zonas sin oxígeno en el mar, ya que el oxígeno vital se agota en la columna de agua y en el fondo del mar. Sin embargo, no se ha podido establecer la verdadera escala de las causas y

1 [https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC\\_FinalDraft\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_FullReport.pdf)

2 [www.iucn.org/deoxygenation](http://www.iucn.org/deoxygenation)

repercusiones del fenómeno llamado “desoxigenación de los océanos”. ¿Existe algún vínculo con el cambio climático, y cuáles son sus consecuencias actuales y futuras para las personas y el medio ambiente? Elaborado en colaboración entre 67 expertos científicos que representan a 51 instituciones de 17 países, este documento constituye el mayor estudio revisado por especialistas realizado hasta el momento sobre la desoxigenación de los océanos. Expresado en palabras de los principales científicos del mundo sobre este tema, presenta el hecho ineludible de que las actividades humanas están reduciendo el oxígeno que sostiene la vida en el océano. Es necesario que la sociedad despierte rápidamente y reconozca la gran magnitud de los cambios perjudiciales que en la actualidad estamos causando a los sistemas reguladores de la Tierra, y los esfuerzos casi monumentales que los gobiernos y la sociedad deben realizar para superar y revertir tales efectos.

Este resumen y el informe técnico completo posiblemente sean una subestimación de lo que está sucediendo en la actualidad. La ciencia es incompleta y apenas está despertando una mayor conciencia sobre la desoxigenación de los océanos, pero lo que ya se sabe es sumamente preocupante. Este trabajo debería interesar y preocupar a todas las personas. Su finalidad es suscitar un interés adicional por la investigación profunda que se necesita, sobre todo cuando estamos a punto de iniciar la Década de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021- 2030). El objetivo de este decenio es apoyar los esfuerzos para revertir el ciclo de disminución de la salud del océano, por lo que una mayor conciencia sobre la desoxigenación de los océanos es muy oportuna. La década de las ciencias oceánicas también tiene como objetivo alinear a los interesados en los océanos de todo el mundo en torno a un marco común que garantice que las ciencias oceánicas puedan apoyar plenamente a los países en la creación de mejores condiciones para la explotación sostenible de los océanos.

Este informe sobre la desoxigenación de los océanos es quizás la última llamada de atención necesaria para aumentar drásticamente nuestras ambiciones de abordar y reducir de inmediato nuestras emisiones de dióxido de carbono y otros potentes gases de efecto invernadero como el metano. Esto es necesario antes de que las acciones humanas afecten y modifiquen irremediablemente las condiciones favorables para la vida en la Tierra, que impulsan y sustentan los valores naturales en nuestra vida cotidiana.

## Datos sobre la desoxigenación oceánica de un vistazo

La mayor parte del exceso de calor retenido por la Tierra debido al calentamiento por gases de efecto invernadero está siendo absorbida por los océanos. La desoxigenación de los océanos se está produciendo en todas las profundidades debido a una menor solubilidad del oxígeno en aguas más cálidas, una estratificación vertical más fuerte (un gradiente de temperatura más pronunciado) que inhibe la difusión de oxígeno de la superficie al océano profundo, y una circulación profunda más lenta que reduce el suministro de oxígeno a las aguas profundas. Además, el aumento de nutrientes que ingresan al océano mediante la escorrentía de los ríos y la deposición atmosférica está promoviendo la proliferación de algas, el aumento de la demanda de oxígeno y el desarrollo de cientos de zonas costeras hipóxicas (muertas), así como la intensificación de zonas de baja concentración de oxígeno de origen natural. The global ocean oxygen inventory has decreased by ~2% over the period 1960 to 2010.

- El inventario mundial de oxígeno del océano ha disminuido en un 2% aproximadamente en el período comprendido entre 1960 y 2010.
- Simulaciones de modelos oceánicos proyectan para el año 2100 una disminución adicional de entre el 1 y el 7% en el inventario de oxígeno disuelto en los océanos del mundo, causada por la combinación de una menor solubilidad del oxígeno inducida por el calentamiento y una menor ventilación del océano profundo.
- Las tendencias a más largo plazo del oxígeno relacionadas con el cambio climático están enmascaradas por la variabilidad del oxígeno en una serie de escalas espaciales y temporales.
- La disminución del contenido de oxígeno en los océanos puede afectar a los ciclos de nutrientes oceánicos y al hábitat marino, con consecuencias potencialmente perjudiciales para los ecosistemas, las personas que dependen de ellos y las economías costeras.
- La pérdida de oxígeno oceánico está estrechamente relacionada con el calentamiento y la acidificación de los océanos causados por el aumento del dióxido de carbono provocado por las emisiones antropogénicas, así como con las consecuencias biogeoquímicas relacionadas con la fertilización antropogénica de los océanos; por lo tanto, un esfuerzo combinado para investigar los diferentes factores estresantes será muy beneficioso para entender los cambios futuros en los océanos.

# ¿QUÉ ES LA DESOXIGENACIÓN DE LOS OCÉANOS?

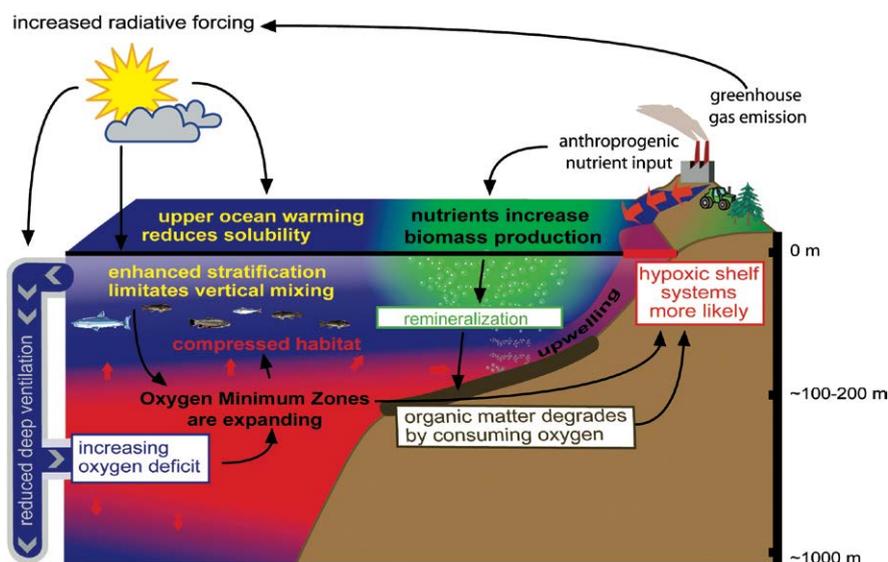
Si bien las acciones para tratar de limpiar el océano se han centrado generalmente en los impactos derivados de presiones como la pesca, la contaminación, la destrucción del hábitat, las especies invasoras y el plástico, no existe una variable ambiental de tal importancia ecológica para los ecosistemas marinos que haya cambiado tan drásticamente en tan poco tiempo a consecuencia de las actividades humanas como el oxígeno disuelto. La actual desoxigenación de los océanos está comenzando a alterar progresivamente el equilibrio de la vida, favoreciendo a las especies tolerantes a la hipoxia a expensas de las sensibles a la hipoxia. La pérdida de oxígeno en el océano puede atribuirse en general a dos causas subyacentes: la eutrofización como resultado de la escorrentía de nutrientes de la tierra y la deposición de nitrógeno por la quema de combustibles fósiles, y el calentamiento de las aguas de los océanos debido al cambio climático, que provoca sobre todo un cambio en la ventilación con la atmósfera suprayacente y una menor capacidad de retención de oxígeno soluble.

Desde mediados del siglo XX hemos notado que el enriquecimiento excesivo de las aguas con nutrientes o materia orgánica (eutrofización) es un problema que amenaza y degrada los ecosistemas costeros, altera la pesca y afecta la salud humana en muchas regiones en todo el mundo. Ya se han identificado más de 900 zonas costeras y mares semicerrados en todo el mundo que son objeto de los efectos de la eutrofización. De estas, más de 700 tienen problemas relacionados con la hipoxia; sin embargo, a través del manejo de los nutrientes y la carga orgánica en tierras adyacentes, cerca de 70 zonas (10%) de ellas se clasifican actualmente como en recuperación. El alcance mundial de la hipoxia inducida por la eutrofización y sus amenazas a los servicios de los ecosistemas están debidamente documentados, pero aún

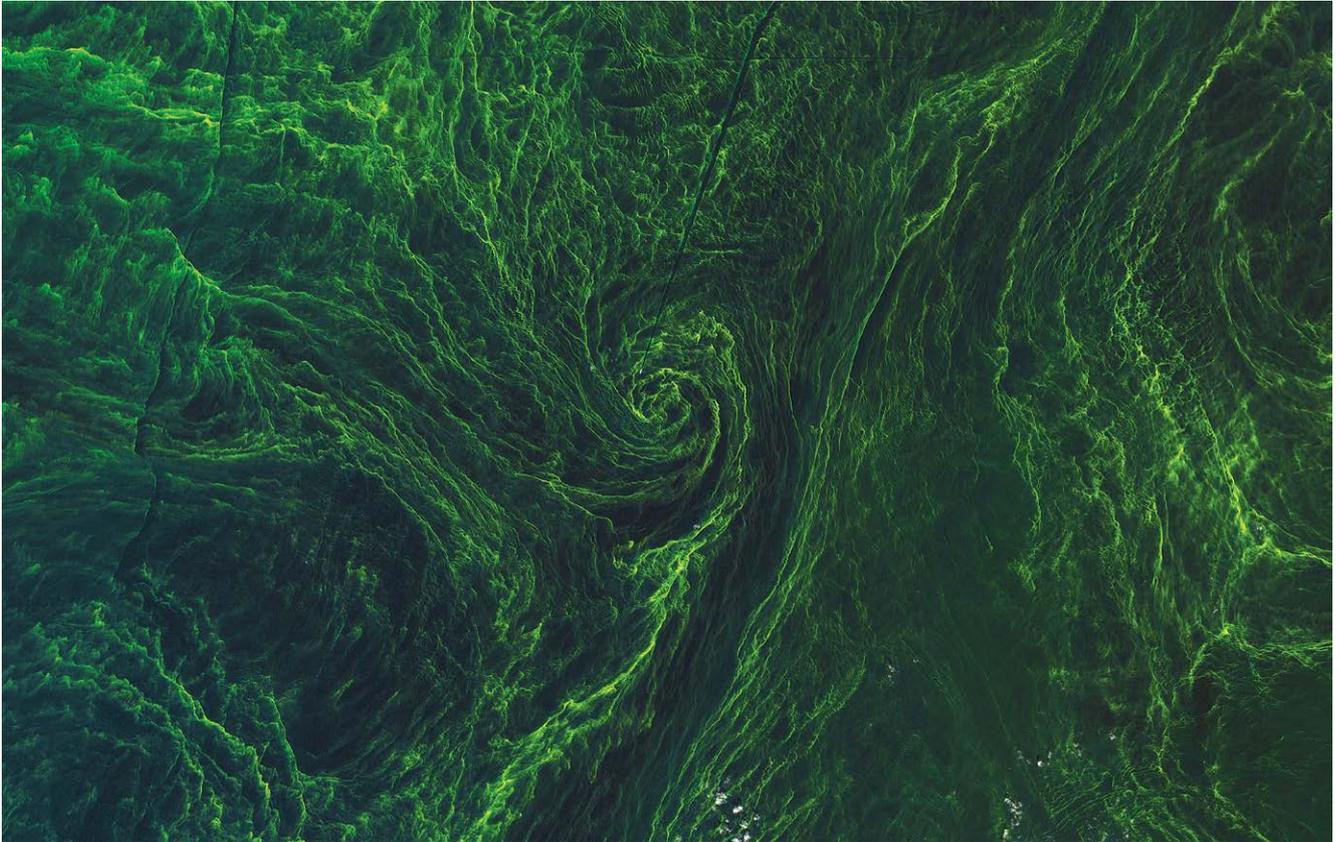
se desconocen muchas de las consecuencias a largo plazo para la salud humana, sociales y económicas, y sus efectos en combinación con otros factores estresantes del océano.

En particular, lo nuevo de este informe es la atención adicional que se presta al efecto reconocido más recientemente de la disminución del oxígeno derivada del calentamiento del océano, que está afectando actualmente a enormes zonas del océano. El calentamiento atmosférico resultante de las emisiones de gases de efecto invernadero que se produce en el agua del océano está provocando grandes cambios en la composición física y biológica del mar. Las dos causas también interactúan; la pérdida de oxígeno inducida por el calentamiento causa una hipoxia impulsada por la eutrofización en las zonas costeras y puede contribuir al aumento dramático de la hipoxia costera. La combinación de hipoxia inducida por la eutrofización, que puede revertirse con relativa facilidad y rapidez si se adoptan las medidas necesarias, y la hipoxia debida al calentamiento climático, que no puede revertirse fácilmente –si es que puede revertirse–, está provocando el surgimiento de la desoxigenación de los océanos como un nuevo problema de importancia mundial.

Las actividades humanas han alterado no solo el contenido de oxígeno del océano de la costa y el mar abierto, sino también una variedad de otras condiciones físicas, químicas y biológicas que pueden tener efectos negativos en los procesos fisiológicos y ecológicos. La desoxigenación de los océanos es la última consecuencia de nuestras actividades que falta reconocer. El calentamiento de los océanos y su desoxigenación y acidificación son los principales “factores estresantes” de los sistemas marinos y suelen ocurrir conjuntamente porque comparten una causa común. El aumento de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera provoca simultánea-



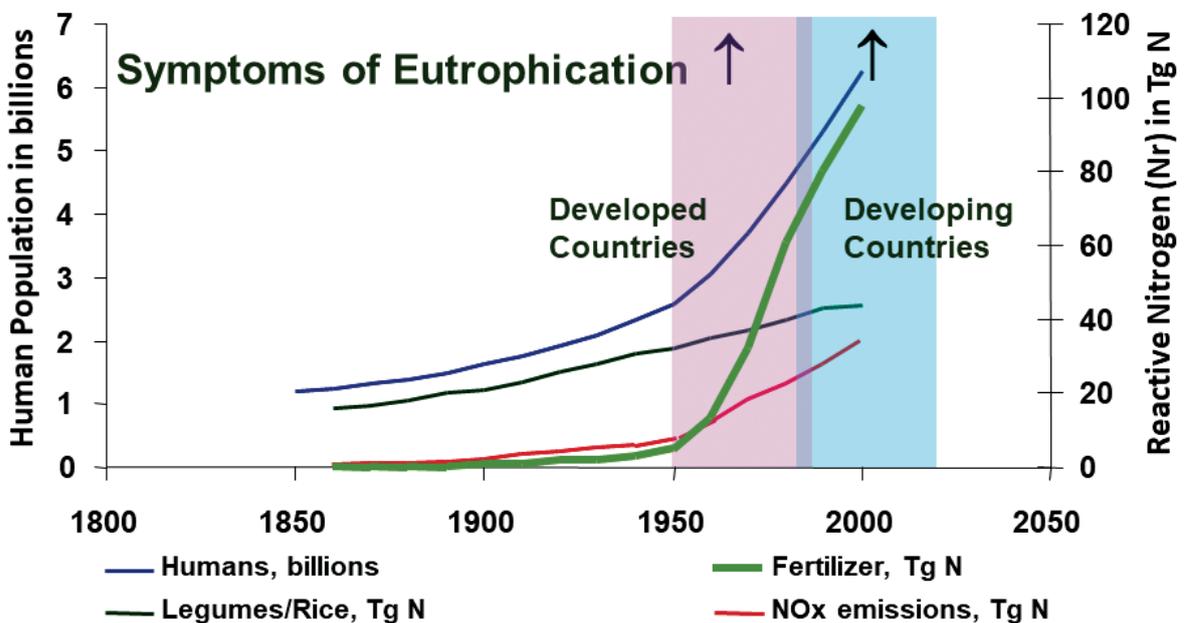
Esquema de las interacciones entre la zona de oxígeno mínimo (OMZ, rojo) en el océano abierto y el sistema de plataforma hipóxica y zonas muertas en las plataformas continentales de los límites orientales con el océano (modificado posteriormente, Stramma et al., 2010).



Las cianobacterias florecen en el Mar Báltico © lavizzara / Shutterstock.com.

mente el calentamiento, la desoxigenación y la acidificación de los sistemas marinos, mientras que la contaminación por nutrientes también contribuye a aumentar la severidad de la desoxigenación y acidificación. Como resultado, los sistemas marinos están sometidos actualmente a una presión intensa y creciente derivada de los efectos acumulados de esta serie de factores estresantes y, considerando las trayectorias sostenidas que se esperan en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, los cambios en los océanos continuarán y se intensificarán. Los efectos combinados de estos "factores estresantes" pueden ser mayores o menores, o pueden

la suma de todos los factores estresantes; sigue habiendo grandes incertidumbres en torno a sus efectos combinados. Existen zonas naturalmente hipóxicas que albergan especies con características fisiológicas y de comportamiento especiales, pero todos los organismos tienen límites y para muchos incluso las reducciones pequeñas de oxígeno tienen costos fisiológicos y ecológicos. La importancia de mantener niveles adecuados de oxígeno en el océano se resume en el lema de la American Lung Association: "Si no puedes respirar, nada más importa".



Período en el que los síntomas de eutrofización e hipoxia/anoxia comenzaron en los países desarrollados y cómo el inicio de los síntomas se ha desplazado en los últimos años hacia los países en desarrollo (Rabalais et al. (2014), modificado a partir de Galloway y Cowling (2002) y Boesch (2002)).

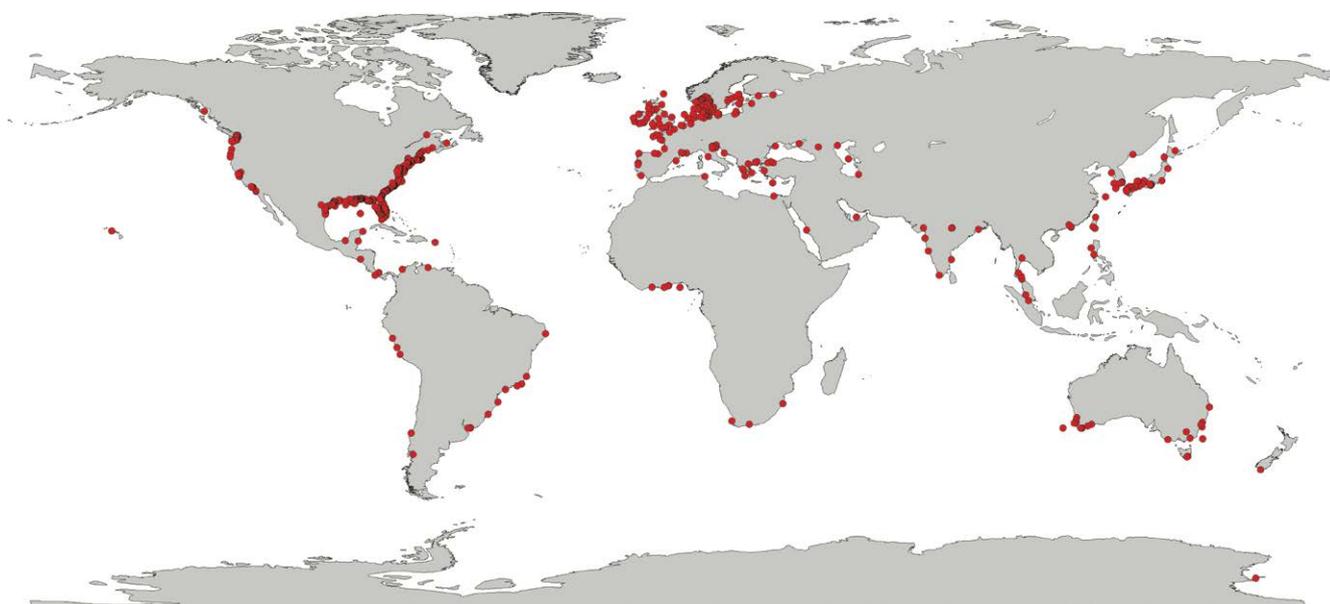
# ¿QUÉ OCURRE EN LA ACTUALIDAD?

© Paulo Oliveira / Alamy stock photo

El “agua que respira” representa una tarea ardua ya que un volumen determinado de agua contiene mucho menos oxígeno que el volumen equivalente de aire. Por ello, el rendimiento fisiológico y el repertorio conductual de los organismos marinos depende en gran medida de su capacidad para extraer oxígeno del agua de mar. Cualquier desviación de los niveles normales de oxígeno en el océano puede suponer un desafío para especies que han evolucionado y se han adaptado a la disponibilidad de ciertos niveles de oxígeno para su vida diaria.

Desde mediados del siglo XX, el aumento de la exportación fluvial de nitrógeno y fósforo, y la deposición atmosférica de nitrógeno debido a la quema de combustibles fósiles ha dado lugar a la eutrofización en zonas costeras (incluidos los mares semicerrados) en todo el mundo. Las altas cargas de nutrien-

tes antropogénicos fertilizan las aguas costeras y aumentan la biomasa de fitoplancton y otros organismos. Estos organismos defecan y mueren, y la materia orgánica se hunde y se descompone. Este proceso de descomposición, causado principalmente por microbios que dependen de la respiración aeróbica (que utiliza oxígeno), agota el oxígeno en el agua circundante. La forma en que esto se desarrolla a escala regional y local está determinada por la estructuración física y la estratificación de la columna de agua, y por el tiempo de retención del agua antes de que llegue al océano. La estratificación salina (sal) o térmica (calor), o ambas, dictan la presencia de una picnoclina (fuerte diferencia de densidad en la columna de agua) a través de la cual se dificulta la difusión de oxígeno disuelto. El aumento del tiempo de permanencia en el agua también aumenta la probabilidad de agotamiento del oxígeno



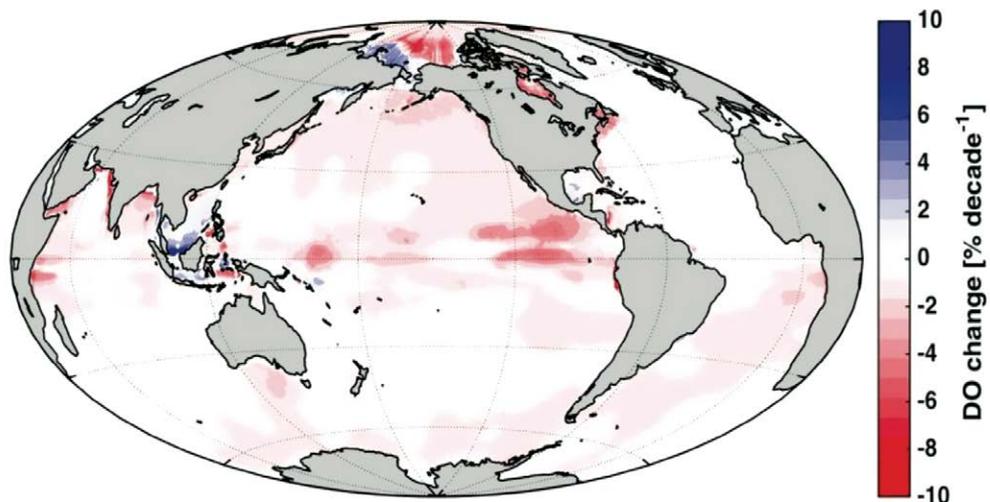
Aguas costeras que han registrado concentraciones de oxígeno  $< 2 \text{ mg L}^{-1}$  ( $63 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$  or  $61 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (puntos rojos) (Díaz y Rosenberg, 2008; Isensee et al., 2016). En su mayoría, los sistemas que se muestran en esta gráfica informaron sobre sus primeros casos de deficiencia de oxígeno después de 1960.



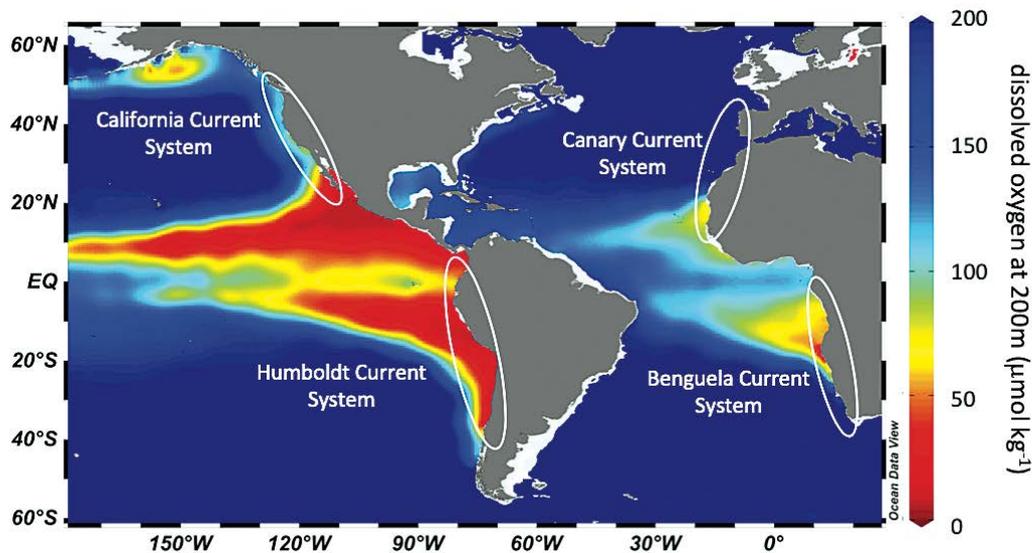
en las zonas costeras. Las barreras físicas, como los umbrales en la profundidad y el avance de las aguas marinas, también pueden afectar el nivel de desoxigenación, positiva o negativamente.

La consecuencia general de las perturbaciones en el estado de equilibrio del sistema océano-atmósfera a lo largo de los últimos decenios es que el océano se ha convertido en una fuente de oxígeno para la atmósfera aun cuando su inventario de oxígeno es de aproximadamente solo un 0,6% del de la atmósfera. En períodos de tiempo prolongados, una mayor respiración debido al calentamiento tenderá a generar déficits de oxígeno cerca de la superficie del mar. Incluso, el aumento del gradiente vertical de oxígeno cerca de la superficie puede ocasionar que los océanos absorban más oxígeno de la atmósfera.

El contenido global de oxígeno del océano ha disminuido aproximadamente entre el 1 y el 2% desde mediados del siglo XX. Desde la perspectiva del cambio climático, un aspecto del aumento de las temperaturas del agua de mar es reducir la solubilidad del oxígeno (y otros gases) en el agua –esto es física simple: el líquido más frío contiene más gas disuelto– pero esto solo es responsable parcialmente de las pérdidas generales de oxígeno del océano que se observan en la actualidad. Hay pruebas que demuestran que los aumentos de temperatura explican aproximadamente el 50% de la pérdida de oxígeno en los 1000 m superiores del océano, lo que equivale a una pérdida de oxígeno impulsada por la solubilidad de alrededor de  $0,013 \text{ Pmol O}_2 \text{ año}^{-1}$ . Hasta la fecha, la contribución de la solubilidad a la pérdida de oxígeno por debajo de los 1000 m de profundidad es de aproximadamente un 2% (alrededor de



Cambio aproximado impulsado por el calentamiento climático en el contenido de oxígeno de los océanos del mundo en el decenio<sup>-1</sup> desde 1960 (Schmidtke et al., 2017). Los tonos rojos representan la disminución de oxígeno y los azules, el aumento.



Ubicación de los cuatro principales sistemas de afloramiento de los límites orientales y valores de oxígeno disuelto a 200 m de profundidad que ilustran la ubicación de cada uno de los sistemas en relación con las zonas de oxígeno mínimo en los océanos. Información tomada del World Ocean Atlas 2013.

0,001 Pmol O<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>), y de acuerdo con el cálculo más reciente de la desoxigenación global ( $0.096 \pm 0.042$  Pmol O<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>), los cambios en la solubilidad representan el 15% (rango del 10% al 30%) de la pérdida total de oxígeno en el período comprendido entre 1960 y 2010.

La mayor parte de la pérdida de oxígeno ha sido ocasionada por los cambios en la circulación oceánica y la ventilación relacionada –el intercambio de gases– que lleva oxígeno de la atmósfera y de las aguas superficiales a la profundidad. Esto se ve agravado por la reducción de la mezcla de los océanos y por los cambios en las corrientes y los patrones de viento. Hay menos confianza en la magnitud del efecto en cadena sobre la respiración –otro factor que explica la disminución del oxígeno–. Menos del 15% de la disminución de oxígeno puede atribuirse a los cambios inducidos por el calentamiento en la respiración de las partículas y la materia orgánica disuelta.

Si bien los cambios biogeoquímicos y físicos relacionados con el calentamiento, la desoxigenación y la acidificación de los

océanos se producen en los océanos de todo el mundo, la huella de estos factores estresantes mundiales tiene un fuerte carácter regional y local. Entre las zonas conocidas por su bajo contenido de oxígeno se encuentran el Mar Báltico y el Mar Negro. Estos son los mayores ecosistemas marinos semicerrados cuyo contenido de oxígeno es bajo. Si bien la cuenca profunda del Mar Negro es naturalmente anóxica, el agotamiento del oxígeno en la parte noroccidental del Mar Negro se ha atribuido a las altas cargas de nutrientes. Las condiciones generalizadas de deficiencia de oxígeno que se observan actualmente en el Mar Báltico son consecuencia de una mayor aportación de nutrientes por parte de la escorrentía terrestre, exacerbada por el calentamiento global.

Las repercusiones de la desoxigenación no se limitan a los mares cerrados. Los sistemas de afloramiento de las regiones de los límites orientales (EBUS) constituyen uno de los biomas más productivos del océano y albergan una quinta parte de la captura mundial de peces marinos silvestres. Estos ecosistemas se definen por las corrientes oceánicas que arrastran



Muerte masiva de langostas en la bahía de Santa Helena, Sudáfrica © G.C. Pitcher.

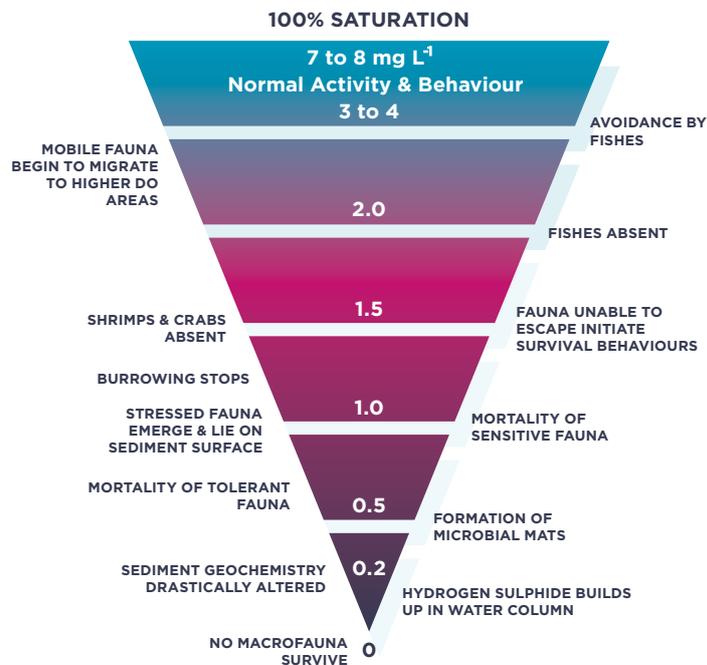
agua rica en nutrientes pero pobre en oxígeno a los límites orientales de las cuencas oceánicas del mundo. Como sistemas naturalmente pobres en oxígeno, los EBUS son especialmente vulnerables a otros cambios en la desoxigenación oceánica mundial, por lo que el contenido de oxígeno de los EBUS finalmente se extenderá y afectará a muchos cientos de millones de personas.

La dinámica de los EBUS está íntimamente relacionada con las alteraciones globales en la química y la circulación de los océanos derivadas del cambio climático. Las corrientes de afloramiento conectan la vasta región del océano abierto subsuperficial, que está experimentando disminuciones de oxígeno disuelto, con las aguas costeras productivas de los EBUS. La fuerza y ubicación de las corrientes de afloramiento dependen de los campos de viento que también se ven afectados por el cambio climático. Para algunos sistemas, esta combinación de cambios dará lugar a una intensificación y expansión de las zonas costeras de poco oxígeno (LOZ).

En comparación con el océano abierto, los cambios a largo plazo en la disponibilidad de oxígeno disuelto en los EBUS dinámicos son mucho más difíciles de entender. No obstante, han comenzado a surgir tendencias importantes. En algunos de estos sistemas, el oxígeno disuelto ha disminuido en alrededor de  $10 \mu\text{mol kg}^{-1}$  por década. Esto es una gran preocupación porque muchos EBUS locales ya se encuentran cerca, si no más allá, de lo que algunos consideran como el umbral clave para la hipoxia de  $60 \mu\text{mol O}_2 \text{ kg}^{-1}$ . Las observaciones sobre el fortalecimiento de los vientos a consecuencia del cambio climático que impulsan el aporte a los afloramientos de aguas deficientes en oxígeno y ricas en nutrientes en algunos sistemas conllevan mayores riesgos de cambios en los ecosistemas que superan los que se prevén solo a partir de la desoxigenación de los océanos. Los EBUS son regiones clave para el sistema climático debido al complejo de procesos oceánicos y atmosféricos que conectan el océano abierto, la tropósfera y la tierra, y el hecho de que albergan zonas de mínimo oxígeno (OMZ), responsables de la mayor fracción del mundo de desnitrificación de la columna de agua y de la mayor emisión estimada ( $0,2 - 4 \text{ Tg de N año}^{-1}$ ) de óxido nitroso, un gas de efecto invernadero.

Debido a que muchos EBUS ya están expuestos a condiciones de poco oxígeno, aumenta el riesgo de franquear importantes umbrales biológicos que regulan la distribución y productividad de las poblaciones dependientes de la pesca y el funcionamiento del ecosistema. La anoxia en aguas poco profundas ya ha provocado la muerte masiva de peces y mariscos en algunos sistemas. La expansión de las zonas deficientes en oxígeno ha dado lugar a una invasión rápida y transitoria del calamar gigante, tolerante a la hipoxia en otros sistemas. El movimiento de peces que se alejan de las zonas deficientes de oxígeno también ha afectado la precisión de los estudios independientes sobre la pesca, aun a medida que aumenta la necesidad de herramientas para la gestión frente al cambio climático.

Los EBUS también son propensos a las floraciones de algas nocivas (HAB) que poseen una gran biomasa y que motivaron algunos de los primeros relatos sobre casos de anoxia relacionados con las mareas rojas. La expansión de las floraciones de algas es más evidente en Asia que en cualquier otra parte



Rango de comportamiento y repercusiones ecológicas a medida que los niveles de oxígeno disuelto descienden, desde la saturación hasta la anoxia.

de los océanos del mundo y es allí donde se informa cada vez más sobre las relaciones entre la creciente prevalencia de las floraciones de algas nocivas y las operaciones de acuicultura. Varias predicciones basadas en modelos muestran la probabilidad de una mayor contaminación por nutrientes y, por consiguiente, de la constante expansión regional y mundial de hipoxia y anoxia costeras, relacionada con las floraciones de algas nocivas.

A partir de los datos disponibles, es evidente que aquellas zonas cuyo contenido de oxígeno es limitado (como las aguas anóxicas, las zonas de mínimo oxígeno y las áreas menos severamente hipóxicas) se han expandido drásticamente en la mayor parte del Atlántico en los últimos 50 a 100 años, lo que está claramente relacionado con las actividades humanas. Las aguas cuyo contenido de oxígeno es limitado y las condiciones hipóxicas y aun anóxicas se encuentran actualmente en muchas zonas costeras en el Océano Atlántico, incluso en mares conectados como el Mediterráneo, el Golfo de México, el Mar Negro y el Mar Báltico. Junto a esto, las grandes cuencas oceánicas, como las del Atlántico ecuatorial y meridional, están siendo afectadas por los niveles decrecientes de oxígeno, aunque tales condiciones estaban presentes en aguas profundas mucho antes de que las actividades antropogénicas comenzaran a influir en el medio ambiente marino. Además de encontrarse en muchas aguas costeras, las aguas cuyo contenido de oxígeno es limitado también están a profundidades medias, generalmente entre 300 y 1000 m, en la mayoría de las cuencas del Océano Atlántico. Las concentraciones de oxígeno en estas áreas han disminuido en los últimos 60 años, en parte debido al calentamiento del océano y en parte a consecuencia de la disminución de la mezcla y ventilación de los océanos.

En otras partes se prevé que las zonas de poco oxígeno del Océano Índico sigan expandiéndose e intensificándose. El norte del Océano Índico contiene aproximadamente dos tercios de la zona del borde continental del mundo que está en contacto con aguas con muy bajo contenido de oxígeno (<

0,2 ml O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>) y también alberga la mayor zona poco profunda de bajo contenido de oxígeno formada naturalmente (frente a las costas de la India occidental). Los países que rodean sus cuencas semicerradas representan alrededor una cuarta parte de la población humana mundial, y su medio ambiente, su biodiversidad y sus recursos vivos son más vulnerables a los cambios inducidos por los humanos, en especial la desoxigenación.

Estas expansiones en el volumen de las OMZ tienen muchos efectos nocivos en la vida marina, tales como la pérdida de hábitat, cambios en las cadenas alimentarias, reducción del crecimiento y la reproducción, estrés fisiológico, migración, vulnerabilidad a la depredación, interrupción de los ciclos de vida y, en casos extremos, la muerte. Cuando el oxígeno disuelto se agota por debajo de los niveles de detección, como ocurre en un gran volumen de agua a profundidades medias en la OMZ del Mar Árabe, la comunidad microbiana respira anaeróbicamente, utilizando predominantemente nitrato, un nutriente esencial, convirtiéndolo en nitrógeno molecular inerte (N<sub>2</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), un potente gas de efecto invernadero. Mientras que el nitrógeno molecular producido a través de este proceso (desnitrificación) modula el balance reactivo del nitrógeno y la productividad biológica marina, las emisiones oceánicas de óxido nitroso juegan un papel importante en el balance de radiación de la Tierra.

La OMZ de la bahía de Bengala retiene algo de oxígeno en trazas diminutas, pero aún así lo suficiente para inhibir la desnitrificación a gran escala. El volumen de agua que contiene trazas de oxígeno (< 0,2 ml O<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>) en el norte del Océano Índico es mucho mayor que el volumen de OMZ funcionalmente anóxicas del Mar Árabe; esto junto con la extrema sensibilidad de la desnitrificación a niveles extremadamente bajos de oxígeno subraya la respuesta no lineal de la producción de nitrógeno molecular y óxido nitroso ante la desoxigenación del océano. Por lo tanto, se prevé que la expansión e intensificación de las OMZ oceánicas tengan un gran impacto en la productividad como resultado de la pérdida de nitrógeno reactivo, y en el clima a través de una mayor producción de óxido nitroso.

Sin embargo, sigue habiendo una carencia básica de información sobre los posibles puntos críticos para la desoxigenación, lo que incluye las desembocaduras de los ríos Indo, Ganges-Brahmaputra e Irrawaddy. Por lo tanto, las representaciones pictóricas de la extensión actual de la desoxigenación de los océanos subestiman, casi con toda seguridad, los efectos que se están experimentando en los océanos del mundo. Se requiere de creación de capacidad y establecimiento de redes para ampliar y mejorar la vigilancia de la desoxigenación y otros efectos del cambio mundial en el océano.

## Los efectos de la desoxigenación de los océanos de un vistazo

### Pérdida de biomasa

- Mortalidad directa de especies pesqueras
- Mortalidad directa de especies de presa
- Reducción del crecimiento y la producción
- Reducción de la captación

### Pérdida de biodiversidad

- Mortalidad de especies sensibles
- Diversidad reducida
- Mayor susceptibilidad a enfermedades y otros factores estresantes
- Menor complejidad de la cadena alimentaria

### Pérdida de hábitat

- Hacinamiento de organismos en hábitats subóptimos
- Mayor riesgo de mortalidad por depredación natural y presión de pesca
- Salida forzada del hábitat preferido
- Rutas de migración alteradas o bloqueadas

### Energía y ciclos geoquímicos alterados

- Mayor flujo de energía a través de microbios
- Producción de sulfuro de hidrógeno tóxico
- Liberación de fósforo y otros nutrientes de sedimentos que alimentan las floraciones de algas
- Pérdida de la desnitrificación



# QUÉ PUEDE OCURRIR EN EL FUTURO?

Simulaciones actuales del modelo de cambio climático para finales de este siglo proyectan una disminución del oxígeno del océano tanto en los escenarios de altas como en los de bajas emisiones, mientras que las proyecciones de las exportaciones fluviales a los océanos costeros indican que la eutrofización probablemente continuará o empeorará en muchas regiones del mundo. Se prevé que el calentamiento amplifique aún más el problema de la desoxigenación en zonas costeras influenciadas por la eutrofización mediante el fortalecimiento y la ampliación de la estratificación del agua de mar.

A medida que el océano se calienta desde la superficie, se prevé que la estratificación aumente, con una tendencia a la desaceleración de la circulación oceánica en el océano abierto. La circulación desacelerada podría representar hasta el 50% de la desoxigenación observada en los 1000 m superiores y hasta el 98% de la observada en el océano profundo (> 1000 m de profundidad). Los patrones espaciales y mecanismos individuales aún no se conocen lo suficiente y es necesario seguir mejorando los modelos para optimizar las proyecciones. También se prevé que los índices de respiración de la materia orgánica disuelta (DOM) aumenten con la temperatura. Las estimaciones de la respiración son difíciles debido a la composición y accesibilidad biológica poco conocidas de la materia orgánica muerta. Experimentos de incubación indican cierta aceleración de la respiración inducida por el calentamiento, lo que podría explicar que aún no se haya observado hasta un 10% o 0,01 Pmol O de disminución del inventario de materia orgánica muerta del océano.

Un mayor calentamiento de las aguas del fondo debido al clima también puede dar lugar a una mayor desestabilización de los hidratos de gas metano, y conducir a una mayor liberación de metano de los sedimentos y a la posterior respiración aeróbica del metano hacia el dióxido de carbono. Sin embargo, hay pocas pruebas de observación de que ya se esté produciendo una aceleración inducida por el calor de la liberación de metano. A medida que el océano continúe calentándose, perderá aún más oxígeno debido al efecto directo de la tem-

peratura sobre la solubilidad del gas. Además, se producirán reducciones en las mezclas verticales relacionadas con una mejor estratificación de la flotabilidad en la capa superior del océano, lo que dará lugar a que en la profundidad ocurra un agotamiento del oxígeno impulsado por la respiración. Se prevé que el océano en su conjunto pierda entre el 3 y el 4% de su inventario de oxígeno para el año 2100 en un escenario de "normalidad" (RCP8.5), y que la mayor parte de esta pérdida se concentre en los 1000 m superiores de la columna de agua en donde la riqueza y abundancia de especies es mayor.

La futura intensificación y expansión de las zonas deficientes en oxígeno puede tener otras consecuencias para los ecosistemas, ya que los ciclos de los elementos dependientes del oxígeno por parte de los microbios alteran el suministro de nutrientes o, en casos extremos, dan lugar a una mayor producción de sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), un gas tóxico. Los EBUS de bajo contenido de oxígeno también son regiones de enriquecimiento de dióxido de carbono, ya que la pérdida de oxígeno disuelto se asocia a la producción de dióxido de carbono. En combinación con la absorción oceánica de las emisiones humanas de dióxido de carbono, los niveles de dióxido de carbono en algunos EBUS ya han alcanzado niveles en los que las capas de carbonato de calcio de los organismos marinos se disuelven con facilidad. Por lo tanto, los EBUS representan puntos críticos tanto para la hipoxia como para la acidificación de los océanos, donde se justifica el desarrollo urgente de soluciones de mitigación y adaptación.

Se prevé que habrá diferencias regionales evidentes en la intensidad de la pérdida de oxígeno, al igual variaciones en los efectos ecológicos y biogeoquímicos. Los modelos coinciden en que la pérdida de oxígeno en las latitudes medias y altas será importante y estará impulsada tanto por la reducción de la solubilidad como por el aumento de los efectos de la respiración. Las proyecciones son más ambiguas en las zonas tropicales, en las que los modelos sugieren que se observará una compensación entre la disminución de oxígeno debido a la reducción de la solubilidad y el aumento de oxígeno causado



por las reducciones en la respiración acumulada. Por lo tanto, podrían aumentar las concentraciones de oxígeno en el núcleo de las zonas de oxígeno mínimo actuales; sin embargo, es probable que el volumen total de aguas clasificado como “subóxico” e “hipóxico” siga aumentando considerablemente.

En conjunto, las condiciones de poco oxígeno y el aumento de la temperatura limitan el hábitat viable para los macroorganismos marinos. El calentamiento constante de los océanos estimulará, junto con la desoxigenación, la contracción y fragmentación de hábitats en regiones en las que los niveles de oxígeno disminuyen por debajo de las necesidades metabólicas. La expansión de las zonas subóxicas podrían perturbar el ciclo de nitrógeno en el océano; la desnitrificación podría aumentar, produciendo mayores índices de pérdida fija de nitrógeno del océano. Entre las perturbaciones en el ciclo del nitrógeno podría haber cambios considerables en la producción de óxido nitroso, aunque esto es sumamente incierto.

A corto plazo, los organismos marinos responden a la desoxigenación del océano a través de cambios en su fisiología y comportamiento. Tradicionalmente se observa la alteración en el comportamiento alimentario y el patrón de distribución, lo que podría dar lugar a la reducción de su crecimiento y mayores dificultades para completar su ciclo de vida. Además, se predice la compresión vertical del hábitat para organismos de la capa superior del océano y las aguas costeras. A mediano plazo, los procesos epigenéticos (influencias no genéticas en la expresión génica) pueden proporcionar a las poblaciones marinas una manera rápida de aclimatarse al estado rápidamente cambiante de la condición de oxigenación. Sin embargo, este campo en desarrollo de las ciencias biológicas es demasiado reciente para evaluar plenamente la contribución de las respuestas epigenéticas a la adaptación de los organismos marinos a la desoxigenación de los océanos. Aún no se han observado cambios en la fenología (sincronización de casos específicos de las etapas de vida) de las especies marinas en relación con la desoxigenación de los océanos. Sin embargo, la desoxigenación suele producirse simultáneamente con otras perturbaciones del medio ambiente (calentamiento y acidificación de los océanos) que también

pueden afectar los ciclos de vida de las especies marinas. Actualmente, la falta de comprensión de sus interacciones y sinergias limita nuestra habilidad para evaluar la capacidad de las poblaciones marinas para responder fenológicamente a la desoxigenación de los océanos.

En la actualidad es difícil predecir si las especies marinas podrán adaptarse a los cambios que se observan actualmente en el oxígeno disuelto del océano o, en su caso, cuáles serían dichas especies. A largo plazo, podría producirse la adaptación a través de la selección natural, pero esto es más probable en especies con tiempos de generación muy cortos. Sin embargo, esta adaptación evolutiva es mucho más difícil de prever en la mayoría de especies de peces comerciales que se caracterizan por tener un tiempo largo de generación. Entre el presente y el año 2100, aproximadamente 80 generaciones de sardina (*Sardina pilchardus*; edad de la primera madurez: 1 año), pero solo 10-15 generaciones de bacalao del Atlántico (*Gadus morhua*; edad de la primera madurez: 5 a 8 años). El número de generaciones en ambos casos es reducido y pone en duda la capacidad de las especies de peces comerciales en particular para adaptarse a las condiciones oceánicas en rápida evolución.

Hay una gran variación interindividual e interespecífica en la tolerancia a la disponibilidad reducida de oxígeno en la naturaleza. Esta diversidad en las respuestas de las especies marinas las vuelve difíciles de entender. Además, a esta dificultad se suman las sinergias con otros factores estresantes del medio ambiente, ya sean naturales o antropogénicos como el calentamiento y la acidificación de los océanos. Durante los últimos 30 años, los biólogos y fisiólogos marinos han realizado enormes esfuerzos para entender cómo los animales marinos responden a las condiciones del medio ambiente y a la reducción de la disponibilidad de oxígeno. No obstante estos esfuerzos, aún queda un largo camino por recorrer y es de importancia fundamental que se intensifique la colaboración entre fisiólogos, ecologistas, modeladores y administradores para proporcionar a los responsables de formular políticas y los administradores de recursos marinos información plenamente operativa y basada en la ciencia.

# ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE?

Las consecuencias de la creciente desoxigenación de los océanos se manifestarán a diferentes escalas en el sistema Tierra/Océano. En estuarios individuales, el agravamiento de la deficiencia de oxígeno reduce el hábitat vital para especies pesqueras y favorece a las especies tolerantes al oxígeno (como muchas medusas) en las cadenas alimentarias. En regiones costeras de afloramiento impulsado por el viento se producen mecanismos físicos en donde afloran aguas frías, ricas en nutrientes y deficientes en oxígeno que albergan una gran abundancia de plantas oceánicas (es decir, la productividad primaria). En escenarios futuros, el calentamiento global podría modificar la oxigenación de dichas aguas, lo que afectaría a otros servicios, como la pesca. A una escala más amplia, la desoxigenación de los océanos puede influir en la interacción de gases entre el océano y la atmósfera. Esto se debe a que, cuando las aguas de las OMZ afloran e inciden en la zona eufótica, existe la posibilidad de que se liberen a la atmósfera gases de efecto invernadero como el óxido nitroso, dióxido de carbono y metano, lo que exacerbaría aún más el calentamiento global con reacciones posteriores en la estratificación, la productividad biológica y el inventario de oxígeno.

Las zonas de oxígeno mínimo juegan un papel esencial en el ciclo mundial de nitrógeno, en el que participan varias especies químicas como el amonio, nitrito, nitrato, óxido nitroso y gas nitrógeno, y diferentes procesos bacterianos están involucrados en las transformaciones de una especie química a otra. En las OMZ se observan pérdidas considerables de nitrógeno que representan aproximadamente el 10% de la desnitrificación mundial, el proceso por el cual los microbios reducen el nitrato a gas nitrógeno cuando no hay presencia de oxígeno. En tierra, este proceso es vital para el reciclaje del nitrógeno en el sistema de la Tierra para la salud del suelo, el crecimiento de microbios y plantas y la salud de los animales. Sin embargo, la desnitrificación también puede agravar el calentamiento global a través de la producción de óxido nitroso. Con el calentamiento global se prevé que las OMZ se expandan considerablemente, lo que provocará alteraciones en el equilibrio de nitrógeno de los océanos y una mayor producción de óxido nitroso oceánico, y esto exacerbará aún más el calentamiento de la atmósfera y el océano.

Junto con las influencias del ciclo del nitrógeno, el reciclaje de fósforo (P) en los sistemas marinos mejora cuando los niveles de oxígeno en el agua de mar son sumamente bajos o nulos. La consiguiente disponibilidad creciente de fósforo puede mejorar aún más la productividad y, por lo tanto, la demanda de oxígeno en aguas más profundas. Este circuito de retroalimentación positiva entre la productividad, pérdida de oxígeno y mayor disponibilidad de fósforo puede contribuir a una mayor desoxigenación en el océano abierto y en los sistemas costeros. Los sedimentos de las zonas del océano más cercanas a la tierra –los márgenes continentales– pueden actuar como una fuente del oligoelemento hierro (Fe) para las aguas en zonas adyacentes de océano abierto. Esta liberación de sedimentos de hierro responde de manera no lineal a la desoxigenación de los océanos y está en un nivel máximo cuando las concentraciones de oxígeno cerca del fondo del mar son bajas y hay ausencia de sulfuro. Esto implica que la desoxigenación de los océanos puede mejorar inicialmente la disponibilidad de hierro para productores primarios, seguido de una disminución en la disponibilidad de hierro cuando las aguas se vuelven sulfídicas. El desarrollo de una mayor comprensión de los ciclos de elementos acoplados y sus vínculos con el oxígeno del océano fortalecerá nuestra capacidad para predecir los impactos del cambio climático. El calentamiento global alterará la ventilación y las propiedades de las fuentes de agua, la estratificación oceánica, los vientos próximos a la superficie, la actividad de mesoescala, los índices de afloramiento, la nubosidad baja y el intercambio de gases y partículas entre el aire y el mar. La comprensión de estos cambios y sus influencias compensadoras / sinérgicas en la trayectoria futura de la desoxigenación de los océanos es importante pero compleja debido a la escasez de datos biogeoquímicos disponibles y sesgos de los modelos mundiales.

Junto con la influencia de la disminución del oxígeno en los ciclos geoquímicos, la desoxigenación también tiene consecuencias considerables para las especies y los servicios que brindan. Para un organismo individual hay diversas consecuencias que la disminución de oxígeno en el agua de mar puede ocasionar. Lo más obvio es la reducción del oxígeno disponible en el agua ventilada en las superficies respiratorias (branquias, piel). Esto da lugar a una difusión reducida del

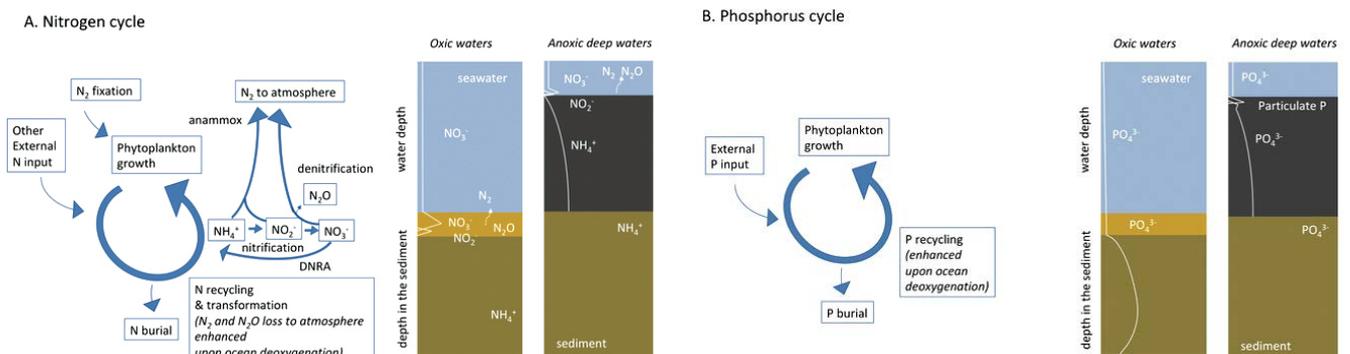


Figura conceptual de las vías de nutrientes para (A) el ciclo del nitrógeno y (B) el ciclo del fósforo. Las diferencias entre los ciclos de nitrógeno y fósforo se representan entre aguas oxígenadas y en aguas profundas anóxicas. Para las vías del nitrógeno, la pérdida de  $N_2$  y  $N_2O$  a la atmósfera se intensifica con la desoxigenación de los océanos. En el caso del fósforo, se produce un mayor reciclaje con la desoxigenación de los océanos.



oxígeno a través del epitelio de los órganos respiratorios y, por consiguiente, disminución del oxígeno transportado a las células a través del fluido circulatorio interno (sangre, fluido extracelular). Una reducción en la oxigenación del fluido circulatorio conduce a su vez a una disponibilidad reducida de oxígeno para las centrales de energía celular (mitocondrias). Luego esto da lugar a una menor producción de energía, lo que a su vez reduce la capacidad para actividades como el crecimiento y la reproducción. Esos efectos pueden derivar en un aumento del riesgo de depredación, influir en la captación y alterar la producción de la población (biomasa) y la demografía.

La desoxigenación también reduce los hábitats adecuados para muchos organismos marinos asociados al fondo del mar, provoca la movilización de especies de aguas de profundidad intermedia hacia las aguas superficiales más oxigenadas y perturba los ciclos biogeoquímicos. Estos fenómenos ya son ilustrados por las repercusiones en las especies y los cambios en la composición de especies de las comunidades marinas, como se describe más adelante en este resumen.

El contenido de oxígeno en los océanos del mundo ha disminuido en el pasado y esto se ha relacionado con cambios y pérdidas en la biodiversidad, de manera similar a lo que estamos comenzando a presenciar en la actualidad. De estos registros se desprende que la actual degradación considerable de los ecosistemas marinos –que incluye la pérdida de diversidad, la disminución de la abundancia y los cambios en la composición de la fauna, a menudo con un mayor predominio de especies oportunistas– es comparable con paleoindicadores de las condiciones del pasado. Una combinación de múltiples indicadores, influenciados por las bajas concentraciones

de oxígeno junto con otros parámetros ambientales, apunta al desarrollo de aguas superficiales deficientes en oxígeno. Esta evidencia es aún más contundente cuando se compara con los datos de calidad del agua a largo plazo que indican un aumento en las cargas de nitrógeno o de carbono orgánico. En el pasado, se registraron cambios faunísticos en la infauna de mayor tamaño (moluscos) junto con la eutrofización y disminución de oxígeno.

La comunidad científica está preocupada por la desoxigenación de los océanos y está adoptando medidas al respecto. La Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (COI-UNESCO) estableció la Red Mundial de Oxígeno Oceánico (GO2NE), que se ha comprometido a proporcionar una visión global y multidisciplinaria de la desoxigenación, centrada en la comprensión de sus múltiples aspectos y efectos. Esta red ha contribuido en gran medida a la elaboración del presente informe. En una reciente Conferencia sobre Desoxigenación Oceánica celebrada en Kiel, Alemania, en 2018, para deliberar sobre la disminución del oxígeno, sus causas y consecuencias, los 300 científicos participantes de 33 países publicaron la “Declaración de Kiel”. Esta Declaración, cuyo subtítulo es “el océano está perdiendo el aliento”, hace un llamamiento a todas las naciones, colectivos sociales, científicos y las Naciones Unidas para que aumenten la conciencia mundial acerca de la desoxigenación de los océanos, adopten medidas inmediatas y decisivas para limitar la contaminación y, en particular, el aporte excesivo de nutrientes a los océanos, y limiten el calentamiento del planeta a través de medidas decisivas de mitigación del cambio climático. Los asesores políticos, los responsables de la toma de decisiones y el público en general deben prestar especial atención a esta Declaración.

# LAS CONSECUENCIAS DE LA DESOXIGENACIÓN DE LOS OCÉANOS PARA LAS DISTINTAS ESPECIES, HÁBITATS Y ECOSISTEMAS COSTEROS Y MARINOS

## Bentos estuarinos y costeros

Las consecuencias para las especies bentónicas estuarinas y costeras son muy diversas. Los invertebrados bentónicos móviles migrarán para alejarse de las masas de agua con bajo contenido de oxígeno disuelto. Los estudios han demostrado que esto da lugar a que la diversidad de los conjuntos bentónicos disminuya multiplicado por 13; la abundancia de infauna bentónica, por 25; y la biomasa, por 10, a medida que el oxígeno disuelto se aproxima a niveles de  $0,05 \text{ mg de L}^{-1}$  en una zona costera de baja oxigenación estacionalmente severa. Los ecosistemas pierden anualmente entre 343.000 y 734.000 toneladas métricas de carbono en forma de producción secundaria a lo largo de  $245.000 \text{ km}^2$  cuando las aguas del fondo marino están gravemente desoxigenadas. Al mejorar las condiciones de oxigenación, la recuperación de las comunidades bentónicas puede durar años o décadas, y puede que no se acerque a las condiciones previas al impacto.

La desoxigenación estacional severa en las aguas costeras altera la composición de la comunidad bentónica. La infauna que vive a mayor profundidad es reemplazada por organismos, en su mayoría pequeños y oportunistas, que se alimentan de partículas fragmentadas de materia orgánica depositadas en la superficie del sustrato y que viven en los 2 cm superiores del sedimento. La diversidad, el número de grupos taxonómicos, la abundancia y la biomasa disminuyen a medida que disminuye la concentración de oxígeno disuelto. Los sedimentos resultantes no se vuelven azoicos; los organismos multicelulares son mermados mayormente, a excepción de unos cuantos que están aclimatados a la hipoxia o anoxia severas, pero las comunidades microbianas prosperan. Los niveles de gravedad de la desoxigenación afectan a los bentos de forma diferente, ya que algunas etapas de desarrollo de la vida suelen ser más sensibles a la desoxigenación que los adultos. Los taxones también difieren en su sensibilidad a la deficiencia de oxígeno. Los crustáceos pericardeos se exterminarán antes que muchos poliquetos y sipúnculos, mientras que en lo que respecta a la meiofauna, los copépodos harpacticoides son más sensibles que los nematodos.

Esta pérdida de infauna por la desoxigenación afecta el funcionamiento del ecosistema. La pérdida de bentos bioturbadores permite que la potencial discontinuidad de la reacción de reducción-oxidación

(redox) del sedimento se acerque a la interfase sedimento-agua. La pérdida de organismos bentónicos y la producción secundaria disminuye la disponibilidad de alimentos para los consumidores de mayor consumo, mientras que, a niveles

de oxígeno severamente bajos, hay efluentes de amonio y ortofosfatos de los sedimentos que generan una retroalimentación negativa para una mayor desoxigenación.

En los ambientes estuarinos y costeros, las áreas de desoxigenación reducen el hábitat adecuado para especies de importancia comercial. A su vez, esto puede provocar un menor crecimiento y puede repercutir en los precios de mercado.

## Algas marinas y macroalgas

Debido a que las algas marinas y otras macroalgas son productoras primarias y absorben dióxido de carbono y producen oxígeno, los efectos de la hipoxia podrían ser modestos. Sin embargo, las algas marinas y otras macroalgas también respiran, lo que requiere oxígeno. Por lo tanto, la hipoxia puede tener efectos perjudiciales en procesos como la producción primaria neta (NPP), que suministra materia orgánica para mantener las redes alimentarias y los ecosistemas de las algas marinas. Sin embargo, se prevé que los efectos de la hipoxia varíen ampliamente dependiendo de las especies de macroalgas y su hábitat, ya que este grupo de organismos es diverso en su morfología y distribución.



*Ecklonia radiata* © John Turnbull.

Las algas marinas y otras macroalgas se encuentran en sistemas oceánicos cercanos a las costas de todo el mundo, que son dinámicos y experimentan grandes fluctuaciones de oxígeno, pH y temperatura. En zonas de afloramiento costero dinámico, los casos de deficiencia de oxígeno son a menudo más episódicos. A diferencia de la hipoxia impulsada por la respiración en las bahías y los estuarios, estas exposiciones a la hipoxia impulsadas por el afloramiento tienden a ser agudas, con inicios y recuperaciones rápidas, y normalmente duran menos de 24 horas cada una. Habrá que determinar si es menos probable que los organismos de estos sistemas su-

fran una mortalidad directa debido a las adaptaciones a altos grados de variabilidad natural en el oxígeno disuelto o si están cerca de sus límites fisiológicos.

Se sabe muy poco sobre los efectos directos de la desoxigenación en las macroalgas. Por un lado, la hipoxia puede repercutir negativamente en los procesos metabólicos, dando lugar a una menor producción primaria neta. Estos procesos también podrían verse afectados en diferentes etapas del ciclo de vida macroalgal. Sin embargo, muchas algas marinas fotorrespiran (utilizando oxígeno en vez de dióxido de carbono), reduciendo su eficiencia fotosintética, por lo que la disminución de las concentraciones de oxígeno puede aumentar los índices de fotosíntesis en algunas macroalgas marinas. Estas predicciones se complican cuando se consideran los efectos del oxígeno en combinación con factores estresantes que ocurren simultáneamente como la acidificación y el calentamiento del océano. Dependiendo de factores como la calcificación, la proximidad a los bentos, el ritmo de crecimiento y los mecanismos de concentración de carbono, se prevé que estos tres factores estresantes afecten de forma diferente a los grupos de macroalgas.

Además de las repercusiones directas en las macroalgas, la deficiencia de oxígeno (y las fluctuaciones en el pH y la temperatura relacionadas con los afloramientos) podría tener consecuencias profundas en los herbívoros, descomponedores y depredadores que impulsan la estructura y función de los ecosistemas de algas marinas. Son escasos los estudios publicados sobre las respuestas de los organismos de los bosques de algas marinas a la falta de oxígeno, pero los existentes sugieren cambios en la búsqueda de alimento, la alimentación y el movimiento. Los invertebrados bentónicos sedentarios como el abulón pueden verse afectados negativamente porque las depresiones en el fondo rocoso pueden almacenar pozas de agua fría, ácida y de poco oxígeno durante horas después de que pasen las olas internas, de manera muy similar a la forma en que una poza de marea atrapa el agua cuando baja la marea. Además, los efectos de la desoxigenación en los organismos probablemente alteren las interacciones tróficas y el flujo de energía. Las diferencias en la vulnerabilidad entre los herbívoros y los depredadores pueden fortalecer o debilitar las cascadas tróficas y el control vertical desde arriba sobre las poblaciones de algas marinas.

## Ecosistemas tropicales: corales, pastos marinos y manglares

La desoxigenación repercute en los ecosistemas costeros tropicales, pero no se ha estudiado lo suficiente y es poco conocida. El número de ecosistemas hipóxicos puede ser subestimado en un orden de magnitud en el trópico debido a la

falta de capacidad de investigación. Por ejemplo, los corales y praderas marinas constituyen el hábitat de diversas comunidades de organismos vulnerables a las bajas concentraciones de oxígeno, pero a su vez son vulnerables a la hipoxia y tienen la capacidad de influir en las concentraciones de oxígeno del agua circundante, lo que da lugar a reacciones que pueden influir en los índices de desoxigenación. Las temperaturas más cálidas propias de los ecosistemas tropicales, junto a la dependencia de los arrecifes de coral de la calcificación, sugieren que se necesita una perspectiva de diversos factores estresantes para predecir los efectos de la desoxigenación en esta región.

Hay pruebas que demuestran una parte de la escala y naturaleza de los efectos de la desoxigenación en el trópico:

- 75%: porcentaje de disminución de la diversidad de corales en una zona muerta hipóxica de Panamá.
- 1.000.000: número de peces de arrecifes de coral que murieron tras un solo evento hipóxico en Australia.
- 13%: porcentaje de ecosistemas de corales en todo el mundo que corren un alto riesgo de desoxigenación.
- 8.66 mg L<sup>-1</sup>: oscilación de la concentración de oxígeno disuelto registrada en un estanque de manglares durante un período de 24 horas, entre un mínimo de 0,46 y un máximo de 9,12 mg L<sup>-1</sup>.

Cuando la hipoxia se establece a lo largo de los gradientes de conectividad con los insumos terrestres y flujos oceánicos, las especies pueden segregarse o limitarse a una fracción de un área de distribución anterior y las capturas de peces pueden disminuir o verse desplazadas. El bajo nivel de oxígeno también puede desencadenar cambios biogeoquímicos que exacerbaban la hipoxia en los circuitos de retroalimentación.

— donde el bajo nivel de oxígeno puede fomentar la producción de sulfuros tóxicos, provocando la muerte de plantas bentónicas y algas. Las diferentes tolerancias y capacidades para aclimatarse de las especies de base de los corales, pastos marinos y manglares pueden dar lugar a una disminución en la diversidad general de las especies de base, tal como se observa en los corales formadores de arrecifes, mientras que las comunidades pueden pasar a ser dominadas por especies tolerantes al estrés cuya complejidad de hábitat es menor. El hecho de que la hipoxia medie en las interacciones de las especies debido a las diferentes tolerancias al estrés de los interactores significa que los patógenos pueden ganar ventaja sobre los receptores estresados, como en el caso



(A) Arrecife de coral © blue-sea.cz; (B) Lecho de pastos marinos © Ethan Daniels/Shutterstock.com; (C) Manglares © happystock/Shutterstock.com.



Enfermedad de la banda negra © Rogers et al. (2008).

de la enfermedad de la banda negra de los corales; que un mayor estrés puede aumentar la dependencia de los mutualismos, como en el caso de los peces que nadan dormidos y llevan agua oxigenada a las grietas hipóxicas de los corales; y que las algas pueden aumentar en los arrecifes debido a que son más tolerantes que los corales a las condiciones de muy poco oxígeno.

Los eventos de bajo contenido de oxígeno también pueden causar la mortalidad masiva de pastos marinos y corales que forman hábitats, de tal manera que se pierden los servicios de los ecosistemas, incluida la función de criadero, y la complejidad estructural de los hábitats se simplifica con la pérdida de estructuras como los arrecifes de coral y los lechos de pastos marinos que son construidos y mantenidos por organismos aeróbicos. La hipoxia en los ecosistemas tropicales puede interactuar con otros factores estresantes del cambio global, como la acidificación y el calentamiento de los océanos, aunque la salud y la supervivencia de los corales y las praderas marinas pueden responder de manera no lineal a los cambios en las concentraciones de oxígeno disuelto. El consumo fotosintético de dióxido de carbono y la producción de oxígeno por parte de corales y pastos marinos pueden aliviar el estrés relacionado con la desoxigenación y acidificación de los océanos, mientras que, por otro lado, el aumento de la respiración por parte de los organismos fotosintéticos, especialmente con el calentamiento, puede tener el efecto contrario.

## Comunidades mesopelágicas

Entre las comunidades mesopelágicas hay peces y otros organismos que habitan en las profundidades intermedias del mar, entre unos 200 y 1000 m (entre 650 y 3300 pies) de profundidad. La estructura de la comunidad mesopelágica depende directamente de la disponibilidad de oxígeno para el metabolismo aeróbico.

La diversidad, abundancia, distribución y composición de las especies mesopelágicas están influenciadas por las variaciones a pequeña y gran escala en los niveles de oxígeno. La desoxigenación de los océanos disminuirá el contenido mínimo de oxígeno en la zona mesopelágica y ocasionará que las oxiclelinas se desplacen verticalmente (es decir, la expansión del núcleo de las OMZ) en la columna de agua. En este ámbito del océano, la capacidad de las especies para extraer oxígeno del agua de mar ha evolucionado para satisfacer las

demandas específicas de oxígeno. En consecuencia, las especies no tienen un exceso de capacidad, ni viven en ambientes con un exceso de oxígeno en relación con su capacidad evolucionada; por lo tanto, son susceptibles a reducciones en la presión parcial de oxígeno y al aumento de la temperatura (lo que eleva la demanda metabólica).

Por lo tanto, en el caso de las especies mesopelágicas, los cambios en los perfiles de temperatura y oxígeno en la columna de agua pueden disociar o aumentar la competencia entre las diferentes especies de zooplancton mesopelágico y los depredadores mayores que se alimentan de ellas en la profundidad, al cambiar la abundancia, distribución y profundidad de las capas de zooplancton, y al alterar la composición y diversidad de las especies. Los ciclos biogeoquímicos (es decir, la bomba biológica y las comunidades microbianas) que dependen de la comunidad de zooplancton mesopelágico se verán alterados considerablemente.

La disminución de la presión parcial de oxígeno en los hábitats reducirá el rendimiento metabólico aeróbico de todas las especies que viven allí.

Para las especies mesopelágicas, la disminución de oxígeno reducirá su capacidad de captura de presas y evasión de depredadores y, dependiendo de la medida de la desoxigenación y de las consecuencias interrelacionadas por el aumento de la temperatura, pueden traducirse en reducciones específicas de las especies en cuanto a la supervivencia, crecimiento y reproducción.

Las capas más superficiales y menos profundas de oxiclelina y de hipóxidos pueden dar lugar a la supresión de movimientos verticales específicos de las especies y la compresión del hábitat vertical aeróbico hacia la superficie. Esto puede alterar las relaciones ecológicas entre las especies que viven en estratos de diferentes profundidades, y puede reducir la abundancia de especies a medida que son forzadas a entrar en aguas menos profundas, más iluminadas y con una mayor presión de depredación. Además, puede reducir la diversidad en el núcleo de las OMZ y alterar la composición de las especies del ecosistema y los ciclos biogeoquímicos y la eficiencia de la bomba biológica de carbono. La futura expansión de las OMZ forzarán a la comunidad de oxiclelina inferior a desplazarse hacia aguas más profundas. Esto puede alterar las historias de vida (diapausa y reproducción) de habitantes estacionales, las interacciones depredador-presa con especies batipelágicas más profundas y puede alterar aún más los ciclos biogeoquímicos y la eficiencia de la bomba biológica.

## Comunidades mesopelágicas del margen continental

Los modelos climáticos mundiales predicen que el calentamiento global dará lugar a una disminución de las concentraciones de oxígeno en las aguas de profundidad intermedia, y que las mayores repercusiones se registrarán en las regiones de las OMZ a lo largo de los márgenes continentales. Las series cronológicas de estas regiones indican que ha habido cambios considerables en la concentración de oxígeno, y hay pruebas tanto de la variabilidad decenal como de una tendencia secular decreciente en las últimas décadas. La ex-

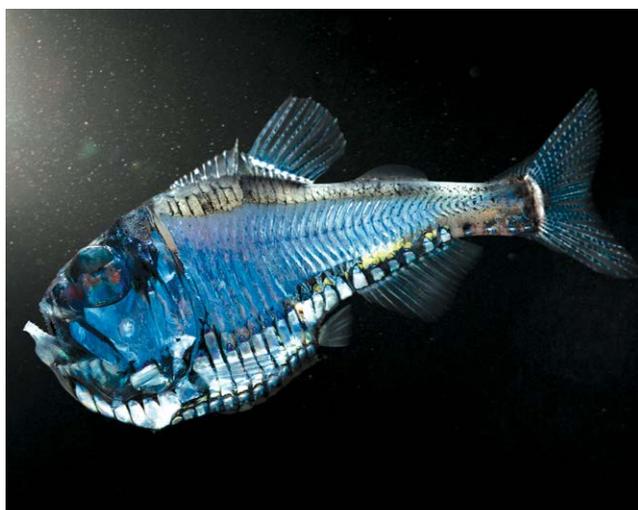
tensión y el volumen de las aguas hipóxicas y subóxicas han aumentado considerablemente en los últimos decenios, con una importante acumulación de capas límite hipóxicas a lo largo de los márgenes continentales.

Las comunidades mesopelágicas en las regiones continentales de las OMZ son únicas y su fauna se destaca por su adaptación a ambientes hipóxicos y subóxicos. Sin embargo, la fauna mesopelágica es muy diversa, por lo que la desoxigenación y el calentamiento podrían dar lugar a un mayor predominio de fauna subtropical y tropical más adaptada a las condiciones de las OMZ.

Las bacterias desnitrificantes en las zonas subóxicas de las OMZ del océano representan alrededor de un tercio de la pérdida de nitrógeno fijo del océano. La desnitrificación en el Pacífico oriental tropical ha variado aproximadamente por un factor de 4 en los últimos 50 años, y cerca de la mitad se ha debido a la variación en el volumen de aguas subóxicas en el Pacífico. La desoxigenación constante a largo plazo podría dar lugar a una disminución del contenido de nutrientes y, por lo tanto, una disminución de la productividad y absorción de dióxido de carbono en los océanos. La desoxigenación también podría dar lugar a una mayor liberación oceánica de óxido nítrico, un poderoso gas de efecto invernadero que se produce por microbios en condiciones subóxicas.

Existen pocas series temporales para evaluar el impacto de la disminución del oxígeno en la fauna mesopelágica de los márgenes continentales. Sin embargo, en la Corriente de California un amplio conjunto de peces mesopelágicos ha disminuido aproximadamente en un 77%, lo que está estrechamente relacionado con una disminución del 22% en las concentraciones de oxígeno en el agua de profundidad media. El predominio de varios taxones tropicales-subtropicales conocidos por sus adaptaciones a las condiciones hipóxicas ha aumentado. El calamar de Humboldt, adaptado a la caza de peces mesopelágicos en la capa límite hipóxica, ha aumentado drásticamente su área de distribución, y aparentemente su abundancia.

El micronecton mesopelágico es un vínculo trófico clave entre el zooplancton y una variedad de depredadores: calamares, atunes, tiburones y otros peces, y una serie de mamíferos marinos y aves marinas de especial interés para la conser-



*Agyropelecus affinis* © Paulo Oliveira / Alamy stock photo.

vación, por lo que una disminución generalizada de los peces mesopelágicos podría tener consecuencias profundas en los ecosistemas marinos y las pesquerías del mundo. Los márgenes continentales en las zonas de afloramiento están expuestos a la hipoxia natural en un área de 1,1 millones de km<sup>2</sup>; los consiguientes gradientes de oxígeno ofrecen excelentes laboratorios naturales para entender las adaptaciones, tolerancias, umbrales y respuestas de los ecosistemas a la desoxigenación oceánica.

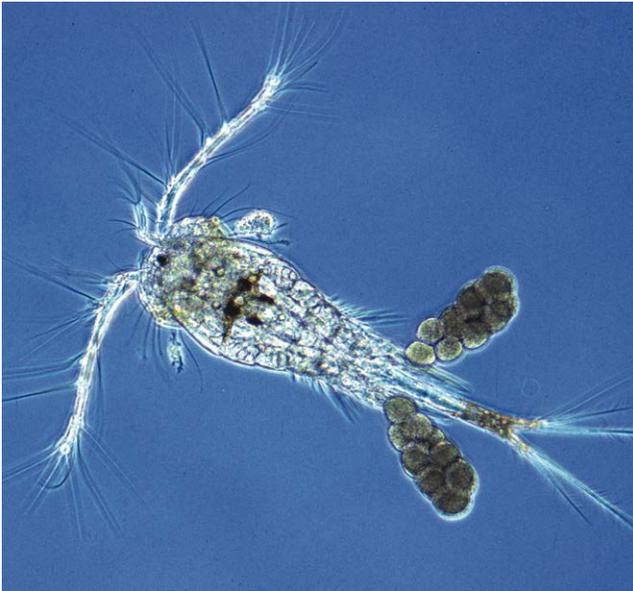
La expansión de las zonas de oxígeno mínimo cambiará la estructura y función de las comunidades bentónicas en los márgenes continentales mediante la alteración de la composición taxonómica, el tamaño corporal, la estructura de la cadena alimentaria, la bioturbación y el ciclo del carbono. La diversidad de la comunidad es especialmente sensible a la hipoxia, y se han observado sistemáticamente disminuciones de la diversidad en condiciones hipóxicas en todos los tamaños de las clases de fauna (desde la meiofauna hasta los peces demersales). La pérdida de diversidad puede dar lugar a una reducción de la capacidad de adaptación y a una menor resiliencia ante diversas perturbaciones. La desoxigenación en los márgenes continentales está causando la compresión del hábitat para especies demersales y bentónicas que no toleran la hipoxia, y la expansión del hábitat para especies tolerantes a la hipoxia, lo que provoca una alteración de la interacción entre las especies, incluso con los humanos.

## Plancton estuarino y costero

La desoxigenación estacional de los ecosistemas estuarinos y costeros da lugar a una variedad de impactos en el plancton estuarino y costero. En el caso del zooplancton, esto incluye una menor abundancia en general; la alteración de la estructura comunitaria donde los taxones más pequeños que transportan huevos y zooplancton gelatinoso aumentan con la disminución del oxígeno disuelto; la distribución vertical menos profunda y reducción de la extensión de la migración vertical; impactos subletales que incluyen la disminución del tamaño en la edad adulta; y reducción de los índices de crecimiento. Las interacciones pelágicas depredador-presa pueden alterarse si las presas del zooplancton utilizan aguas hipóxicas como refugio contra la depredación por parte de los peces. Por el contrario, la evitación de las aguas profundas deficientes en oxígeno puede dar lugar a agregaciones de zooplancton en la interfase entre las aguas hipóxicas apetecidas por depredadores del zooplancton.

En ecosistemas costeros con cizallamiento y flujo diferencial entre capas superficiales y profundas, la evitación de aguas profundas deficientes en oxígeno puede influir en la dinámica espacial de las poblaciones de zooplancton al alterar los patrones de emigración e inmigración, y los tiempos de residencia. Es necesario que los modelos de ecosistemas de los mares estuarinos y costeros incorporen las aguas profundas hipóxicas estacionales para conocer mejor los efectos de la desoxigenación actual y futura en las redes alimentarias pelágicas.

La deficiencia de oxígeno en las aguas profundas puede dar lugar a una menor abundancia de zooplancton en general y una menor presión de apacentamiento sobre el fitoplanc-



El copépodo *Oithona davisae* © Albert Calbet.

ton. Esto puede limitar los niveles de alimento para los peces que consumen zooplancton. Las aguas deficientes en oxígeno también pueden provocar alteraciones en especies de zooplancton a cambio de ejemplares de menor tamaño. Por lo tanto, las diferentes especies de zooplancton pueden ser menos nutritivas para los peces depredadores, y la presencia de presas de zooplancton más pequeñas puede requerir que los peces consuman más zooplancton para satisfacer sus necesidades nutricionales.

El hecho de que el zooplancton utilice aguas profundas levemente hipóxicas como refugio contra la depredación puede derivar en una serie de consecuencias. Los peces que se alimentan de zooplancton pueden evitar las aguas profundas con deficiencia de oxígeno y, por lo tanto, reducir su consumo de zooplancton. En cambio, las medusas que se alimentan de zooplancton pueden tolerar, más que los peces, el agua con deficiencia de oxígeno y, por consiguiente, pueden reemplazar a los peces como consumidores dominantes de zooplancton.

El zooplancton puede evitar las aguas profundas severamente hipóxicas y puede acumularse en la interfase profunda en la que el oxígeno disminuye rápidamente, lo que puede originar zonas de mejor alimentación para los depredadores de zooplancton.

Las diferencias entre el suministro de oxígeno del medio ambiente y la demanda de oxígeno del organismo impulsan la respuesta del plancton a la desoxigenación. La definición de hipoxia como concentración no tiene en cuenta la disminución de la solubilidad del oxígeno y el aumento del índice metabólico de los organismos con el aumento de la temperatura. A altas temperaturas los organismos pueden estar en condiciones de estrés o letales incluso cuando la concentración de oxígeno disuelto está por encima de los niveles definidos como hipóxicos ( $<2\text{mg L}^{-1}$ ). Es muy probable que las repercusiones reales de la hipoxia sean específicas según las especies y la temperatura, relacionadas con la demanda de oxígeno de cada especie de zooplancton.

## Elasmobranquios

Hay más de 1000 especies de tiburones y rayas que obligadamente respiran en el agua y cuya necesidad absoluta de oxígeno es comparativamente alta dado que son depredadores activos con un cuerpo relativamente grande. Su distribución a lo largo de los hábitats acuáticos es grande y exhibe grandes variaciones en las variables físico-químicas, incluida la concentración de oxígeno, lo que indica que el agotamiento del oxígeno influye fuertemente en la fisiología, comportamiento y ecología de los elasmobranquios.

Muchos elasmobranquios exhiben respuestas conductuales rápidas en agua hipóxica por el aumento de la actividad con relación a la evitación. Sin embargo, aparentemente los elasmobranquios también pueden soportar una hipoxia leve con respuestas circulatorias y/o ventilatorias, y posiblemente aun en períodos prolongados. No obstante, estas estrategias pueden ser insuficientes para soportar una hipoxia o anoxia moderada, progresiva o prolongada. A medida que las temperaturas del agua se elevan con el calentamiento climático, muchos elasmobranquios (como los ectotermos) exhibirán índices metabólicos elevados y podrán tolerar cada vez menos los efectos de incluso una hipoxia leve relacionada con la desoxigenación de los océanos. Por lo tanto, la hipoxia sostenida en aguas costeras más cálidas puede dar lugar a cambios en la distribución de elasmobranquios.

Se prevé que la expansión de las OMZ en el océano abierto en especial tenga implicaciones importantes a escala poblacional para los elasmobranquios pelágicos a medida que su hábitat se comprime en las capas superficiales por la acumulación en aguas hipóxicas y, por lo tanto, podrían correr un mayor riesgo de captura por parte de las pesquerías de superficie. Las capas superficiales que cubren las OMZ parecen ser puntos críticos de uso espacial de tiburones pelágicos que pueden tener posibilidades cada vez mayores de "compresión del hábitat" (volumen reducido del hábitat) con la expansión de las OMZ. Es sabido que las capas superficiales que cubren las OMZ son puntos críticos para la pesca comercial de tiburones pelágicos, y la expansión de las OMZ puede dar lugar a nuevos riesgos de sobreexplotación de especies amenazadas como el tiburón mako, marrajo común o



Tiburón mako, marrajo común o de aleta corta *Isurus oxyrinchus*  
© Richard Robinson / Alamy stock photo.

de aleta corta (*Isurus oxyrinchus*) que ya es objeto de pesca excesiva. Por lo tanto, es prioritario mitigar las repercusiones de la desoxigenación de los océanos en los elasmobranquios para que los índices de captura en el futuro se controlen a la luz del cambio climático, en vez de que la explotación se vea exacerbada por la pérdida de oxígeno de los océanos.



Atún rojo, atún común o atún rojo del Atlántico *Thunnus thynnus* © Paulo Oliviera / Alamy stock photo.

## Atunes y peces espada

Los atunes y peces espada deberían ser especialmente sensibles a las condiciones de poco oxígeno ambiental, dados sus índices metabólicos elevados y las grandes diferencias entre sus índices de descanso y sus índices metabólicos máximos. Aunque hay muchas similitudes de comportamiento entre las diferentes especies, también hay diferencias claras y demostrables en los índices de crecimiento, el tamaño máximo de los adultos, las capacidades fisiológicas, las tolerancias a la deficiencia de oxígeno y las condiciones ambientales preferidas.

Se prevé que el cambio climático altere las concentraciones de oxígeno en todo el océano abierto, y que en su mayoría las regiones sufran disminuciones debido a la desaceleración de la ventilación de los océanos y la reducción de la solubilidad del oxígeno superficial. Entre los 200 y 700 m de profundidad (un rango vertical que incluye profundidades a las que los atunes y peces espada suelen descender para buscar alimento), se prevé que las disminuciones mayores y más seguras en las concentraciones de oxígeno ocurran en el Pacífico Norte y gran parte del Pacífico Sur, mientras que los cambios menores y menos seguros se prevén en la región tropical del Océano Pacífico. A lo largo de una línea norte-sur a través del centro del Océano Pacífico (longitud 160°O), las disminuciones proyectadas de la concentración de oxígeno son más pronunciadas entre los 15°N y 50°N, entre 250 y 750 m de profundidad; y al sur de 50°S, entre 50 y 300 m de profundidad.

Se prevé que la profundidad a la que caigan las concentraciones de oxígeno sea inferior a 3,5 ml L<sup>-1</sup> (un umbral de concentración hipóxica para varias especies de atunes y peces espada, incluidos los atunes aleta amarilla y barrilete, marlín y pez vela) se acumulará en todos los océanos del mundo, lo que puede dar lugar a una compresión vertical de hábitats generalizada y cambios en los patrones de movimiento vertical. La acumulación proyectada del umbral de profundidad es especialmente pronunciada en regiones subtropicales y de latitud media del Océano Pacífico. Además, se prevé que la

profundidad de la oxiclelina se reduzca en más de 150 m en estas mismas regiones del Océano Pacífico y en gran parte del Océano Austral. Por lo tanto, las especies que viven en el Pacífico Norte templado, tales como el pez espada y los atunes aleta amarilla, patudo, blanco y aleta azul del Pacífico, podrían verse afectadas en mayor medida por los cambios futuros de oxígeno que otras especies, ya que las disminuciones en las concentraciones de oxígeno son mayores en su rango actual.

Los cambios en la temperatura y el contenido del oxígeno tienen el potencial de alterar la distribución y capturabilidad de los atunes y peces espada en tres dimensiones. Debido a que son sumamente móviles, los atunes y peces espada pueden exhibir cambios complejos en su distribución en respuesta a las condiciones ambientales cambiantes. Cuando las temperaturas de la capa superficial se vuelven demasiado cálidas, pueden pasar más tiempo en la profundidad (en el supuesto que las concentraciones de oxígeno sean suficientes); en donde las capas con deficiencia de oxígeno se vuelven menos profundas o se expanden, pueden pasar más tiempo cerca de la superficie oxigenada (en el supuesto que las temperaturas no sean demasiado cálidas), lo que aumenta su vulnerabilidad a los aparejos de pesca. Si no disponen de un refugio vertical contra las condiciones inadecuadas pueden desplazar horizontalmente su distribución. Debido a que las tolerancias de temperatura e hipoxia de los atunes y peces espada son específicas de las especies, los cambios en la temperatura y el contenido de oxígeno en la columna de agua pueden modificar la competencia entre diferentes especies a medida que sus hábitats verticales y horizontales cambian de diferentes maneras, alterando potencialmente la dinámica de la cadena alimentaria establecida, las estructuras de los ecosistemas y las tasas de captura incidental. Las respuestas diferenciales de las especies de presa a los cambios en las condiciones ambientales también pueden afectar las estructuras de la cadena alimentaria, la capacidad de los atunes y peces espada para encontrar alimento, la edad de la primera reproducción y el tamaño promedio del cuerpo.

Es probable que los cambios futuros en las distribuciones de los atunes y peces espada compliquen las evaluaciones de las poblaciones y tengan importantes repercusiones socioeconómicas. A medida que cambian los hábitats espaciales de ciertas especies de atunes y peces espada, la capacidad de los índices de abundancia basados en la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) y dependientes de la pesquería para capturar con precisión la dinámica de las poblaciones se verá comprometida, a menos que los métodos de estandarización de la CPUE puedan adaptarse. Cuando las poblaciones de las especies objetivo de atunes y peces espada disminuyen en abundancia o se alejan de los lugares de pesca tradicionales, los pescadores tendrán que invertir más recursos para localizar y capturar estas especies o reconfigurar sus instrumentos para capturar otras nuevas. Sin embargo, las limitaciones económicas, políticas y normativas pueden impedir la capacidad de los pescadores para adaptarse con eficacia, en especial si las especies atraviesan las fronteras de la ordenación. Las pesquerías de menor escala en los países en desarrollo y las pesquerías que dependen de buques con un área de distribución limitada y una baja capacidad tecnológica son probablemente las más vulnerables a los cambios en el área de distribución o en los patrones migratorios.

## La desoxigenación de los océanos de un vistazo

- Los organismos marinos necesitan oxígeno para convertir los alimentos en energía para crecer y reproducirse, así como para escapar de los factores estresantes y adaptarse a los mismos, y para reparar los daños causados por otros factores estresantes. Cuando los niveles de oxígeno en el océano son insuficientes, los organismos podrían carecer de la energía necesaria para tolerar otros factores estresantes. El aumento de la temperatura a escala mundial empeora la disminución de oxígeno y a la vez aumenta los requerimientos de oxígeno de los organismos que dependen de la respiración aeróbica.
- La desoxigenación y la presencia de zonas con poco oxígeno o con ausencia de oxígeno están ocurriendo en áreas cada vez mayores de las plataformas continentales. Se prevé que las consecuencias de la pérdida constante de oxígeno disuelto en los océanos del mundo provoquen cambios en los ecosistemas, compresión de los hábitats actualmente disponibles desde el punto de vista biológico y cambios a gran escala en los servicios de los ecosistemas.
- El bajo nivel de oxígeno por sí solo y en combinación con otros factores estresantes puede reducir la capacidad de los animales para combatir patógenos y parásitos, lo que puede dar lugar a un aumento de la intensidad y prevalencia de una serie de enfermedades de los animales marinos. La deficiencia de energía derivada de la falta de oxígeno también puede aumentar la morbilidad y la mortalidad a consecuencia de las enfermedades.
- La evitación del bajo nivel de oxígeno por parte de las especies puede causar una alteración de las distribuciones espaciales y temporales, en las que las especies móviles pueden sufrir una mayor mortalidad por pesca si los pescadores trabajan en zonas suficientemente oxigenadas que sirven de refugio a animales que se ven obligados a evitar un hábitat sin oxígeno. Puede ocurrir que los hábitats suficientemente oxigenados no sean adecuados como refugio para las especies que viven en áreas con poco oxígeno debido a la presencia de otros factores estresantes como las altas temperaturas y los depredadores.
- Se prevén la disminución de las capturas de pescado y la reducción de los beneficios económicos en los Estados costeros. Los servicios específicos de los ecosistemas pueden verse afectados negativamente por la combinación de la desoxigenación, contaminación y acidificación de los océanos. Se prevén impactos negativos en la regulación biológica, el ciclo de nutrientes y la fertilidad, los alimentos, los recursos ornamentales (tales como corales, perlas y materiales obtenidos de las conchas), el turismo y la recreación.
- La desoxigenación afecta directamente a las especies, los ecosistemas y muchos aspectos de los servicios de los ecosistemas que proporcionan el mar abierto y las aguas costeras. Sus efectos están sujetos a la variabilidad del clima, por lo que las interacciones y la comprensión de las consecuencias y las interacciones son limitadas.
- La disminución del oxígeno induce cambios en el rango de distribución de las especies, cambios en los patrones de movimiento vertical y transversal a través de la plataforma, y pérdidas en los hábitats de desove, lo que se traduce en lo siguiente:
  - Alteración de los índices de interacción ecológica entre depredadores y presas, y especies que compiten por los recursos.
  - Alteración de las interacciones ecológicas a medida que aumenta la abundancia de las especies invasoras.
  - Reducción de la productividad pesquera a medida que disminuye la reposición de la población de especies de desove bentónico y especies que dependen fuertemente del hábitat para su crecimiento.
  - Aumento de los conflictos de pesca debido a que muchas especies objetivo están comprimidas en refugios de oxígeno limitado.
  - Aumento de la incertidumbre en la gestión, a medida que estudios independientes sobre la pesca se ven comprometidos por la reducción de la accesibilidad de los peces a la metodología de los estudios.
- La expansión espacial y/o temporal de zonas afectadas actualmente por suboxia o anoxia, así como la nueva modalidad de los hábitats con poco o ningún oxígeno en regiones en las que anteriormente esto no ocurría, tendrá como resultado lo siguiente:
  - Aumento de la pérdida de nutrientes de nitrógeno a medida que se intensifica la desnitrificación.
  - Un mayor riesgo de efectos de acumulación de sulfuro de hidrógeno en la columna de agua a medida que se intensifica la reducción del sulfato.
  - Alteración de las proporciones de disponibilidad de nutrientes a medida que aumenta el flujo de hierro y fósforo de los sedimentos.
- La intensificación del calentamiento, la acidificación y otros factores estresantes de los océanos en conjunción con la hipoxia de las zonas costeras se traducirá en lo siguiente:
  - Una mayor gama de taxones y procesos afectados.
  - Un cambio más rápido hacia un estado no análogo en el océano moderno, donde varios aspectos del medio ambiente costero del océano se alejan de los rangos naturales de exposición.



Elefante marino del norte *Mirounga angustirostris* © MZPHOTO.CZ / Shutterstock.com.

## Megafauna oceánica

La distribución de los mamíferos marinos está motivada principalmente por la disponibilidad de presas. Por lo tanto, las repercusiones a escala comunitaria en las especies con branquias afectan el comportamiento de los mamíferos marinos. La hipoxia costera está aumentando en zonas de hábitats vitales para los mamíferos marinos. Existen aproximadamente 47 especies de mamíferos marinos en las regiones afectadas por la hipoxia del Sistema de Corrientes del Norte de California, el Mar Negro, el Mar Báltico y el Golfo de México.

Los casos de hipoxia costera dan lugar a cambios en la distribución, movilidad, evitación de depredadores y mortalidad de animales con branquias. La hipoxia severa o prolongada puede conducir a cambios en la cadena alimentaria, y puede repercutir en el éxito de la búsqueda de alimento de los mamíferos marinos. El aumento del calentamiento de los océanos y las disminuciones consiguientes en la capacidad de retención de oxígeno del agua salada sugieren un patrón inminente de empeoramiento de la hipoxia a escala mundial. Estos patrones pueden llevar a un aumento de presión para especies de mamíferos marinos que ya están amenazadas o en peligro. Por el contrario, el aumento de los índices de depredación en especies con branquias que están incapacitadas o comprimidas espacialmente por la hipoxia puede beneficiar a ciertos mamíferos marinos. Los vínculos directos entre la hi-

poxia costera y los mamíferos marinos pueden ser difíciles de cuantificar, pero los abundantes mamíferos marinos cercanos a la costa podrían ser excelentes especies de estudio para comenzar a desentrañar este problema.

La desoxigenación de los océanos promueve la expansión de las OMZ en el mar y la acumulación. Esta expansión puede incidir positivamente en la eficiencia de la búsqueda de alimento de los elefantes marinos del norte, debido a (1) su mayor capacidad para alimentarse de presas inactivas, (2) la disminución de los costos del buceo en términos de inversión de tiempo y energía, y el subsiguiente aumento de búsqueda de presas en la fase inferior de las inmersiones para la búsqueda de alimento, y (3) el aumento de la densidad de las presas en relación con la compresión vertical de su distribución. El aumento de las presas en las OMZ (alrededor del 40% de sus presas) puede dar lugar a cambios en la composición de las especies en la comunidad mesopelágica. El aumento de la eficiencia de los elefantes marinos en la búsqueda de alimento puede dar lugar a un mayor aumento de su población, lo que puede provocar perturbaciones y cambios considerables en el funcionamiento del ecosistema pelágico debido a los efectos de cascada descendentes y tróficos.

Los cachalotes y zifios suelen bucear en las aguas profundas de la zona mesopelágica, se alimentan de calamares que se nutren en la zona mesopelágica superior y a menudo descansan en las OMZ. Aun cuando la búsqueda de alimento y la migración vertical de los calamares no están claramente definidas, se sugiere que en el futuro la acumulación de OMZ causará la compresión vertical de esta "zona de descanso", lo que dará una ventaja de forrajeo a los cachalotes y zifios que se alimentan de calamares. La eficiencia creciente de búsqueda de alimento en hábitats en los que ocurre la acumulación de OMZ mejorará el desempeño de los mamíferos que bucean en aguas profundas en el ciclo de nutrientes mediante el bombeo de nutrientes a las aguas superficiales desde las OMZ, lo que dará lugar a un aumento de la producción y del flujo de nutrientes a las profundidades. En última instancia, este flujo creciente podría afectar el consumo de oxígeno como consecuencia de la respiración microbiana y la nitrificación en la zona de oxígeno limitado, lo que causaría una mayor expansión de la OMZ.



# CONSECUENCIAS PARA LOS SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS

Las repercusiones de la desoxigenación de los océanos en las personas siguen siendo poco estudiadas y son intrínsecamente difíciles de evaluar. Pocos estudios abordan el tema y aquellos que lo hacen por lo general incluyen las pérdidas económicas más fácilmente cuantificables en relación con la desoxigenación de los océanos, excluyen el valor de no uso y existencia y los servicios culturales, y se centran en sistemas relativamente pequeños y limitados en regiones capitalizadas. A pesar de la falta de investigaciones exhaustivas sobre el tema, los conocimientos actuales basados tanto en las ciencias naturales como en las ciencias sociales pueden ofrecer ideas útiles sobre lo que puede esperarse de la constante desoxigenación de los océanos en términos de las vías de efecto generalizadas.

Las personas reciben beneficios de los servicios de los ecosistemas en forma de bienestar (bienes, salud, buenas relaciones sociales, seguridad, organismos). Los servicios de los ecosistemas se traducen en bienestar humano a través de la mediación social, de manera que las diferencias en los niveles de poder y vulnerabilidad determinan cómo los diferentes grupos sociales sufrirán los peligros creados por la constante desoxigenación de los océanos. A pesar de que se desconozcan los mecanismos precisos de los cambios biofísicos impulsados por la desoxigenación de los océanos, los mecanismos sociales establecidos sugieren que la desoxigenación de los océanos exacerbará las desigualdades y perturbaciones sociales existentes.

Se prevé que la reducción del oxígeno disuelto perturbe el funcionamiento de los ecosistemas y se traduzca en la degradación del hábitat, lo que representará problemas y nuevos costos para los sistemas existentes por el uso de los recursos oceánicos. Los arrecifes de corral, humedales y pantanos, y los peces y crustáceos son los más susceptibles a los cambios negativos por la desoxigenación de los océanos, por lo que las personas que dependen de estos sistemas están en especial riesgo de sufrir repercusiones negativas. Algunas especies tolerantes a la hipoxia podrían obtener beneficios derivados de la reducción de los niveles de oxígeno disuelto debido a alteraciones, aunque sean temporales, y esto debería considerarse en las estrategias de adaptación.

Las personas de latitudes bajas, las poblaciones urbanas y rurales costeras, los hogares pobres de los países en desarrollo y los grupos marginados (como mujeres, niños y poblaciones indígenas) son los más vulnerables a los efectos de la desoxigenación de los océanos. Las comunidades en las que estas características se traslapan son especialmente vulnerables, en especial las comunidades costeras de África Occidental y los países en desarrollo de bajos ingresos. Una mejor comprensión de las vías matizadas de repercusión a partir de la desoxigenación de los océanos para el bienestar humano será de importancia crucial para una planificación eficaz en respuesta a la desoxigenación de los océanos en el futuro. Los análisis de los servicios de los ecosistemas deben considerar toda la gama de tipos de servicios de los ecosistemas, incluso cuando no sean cuantificables, a fin de proporcionar la información detallada y precisa que se requiere para una planificación adecuada. Los enfoques interdisciplinarios para evaluar los sistemas en forma holística representan medios prometedores para adquirir conocimientos pertinentes sobre las políticas de la dinámica compleja y ágil de los sistemas socioecológicos.

Las políticas y actividades dirigidas a la adaptación a la desoxigenación de los océanos y la mitigación de la misma deberían centrarse en la reducción de la vulnerabilidad de grupos y personas individuales, abordando las causas últimas y próximas de la gran sensibilidad y exposición, mitigando problemas como la eutrofización y creando capacidades de adaptación. Es preciso prestar atención al papel esencial que desempeñan las instituciones sociales en la mediación del acceso a los servicios de los ecosistemas y las desigualdades inherentes en las maneras en que los seres humanos experimentan las amenazas naturales.

## Consecuencias de la desoxigenación de los océanos en la pesca

La pesca (comercial, artesanal, recreativa) es un servicio de los ecosistemas que provee empleo y nutrición en el sistema

## Un vistazo a las consecuencias de la desoxigenación de los océanos en los servicios de los ecosistemas

Las consecuencias de la desoxigenación de los océanos pueden tener y probablemente tendrán un número cada vez mayor de repercusiones y dificultades para las comunidades humanas, las economías y la sociedad en su conjunto que dependen del mar.

- La reducción del hábitat disponible para los organismos pelágicos, mesopelágicos y bentónicos puede causar lo siguiente:
  - Cambios en la distribución de las especies que dan lugar a la reducción de la disponibilidad de servicios de los ecosistemas en zonas de hábitats perdidos y, en algunos casos, aumento de la disponibilidad de servicios de los ecosistemas en aguas suficientemente oxigenadas o por las especies que ven una ventaja competitiva en zonas hipóxicas.
  - Menos beneficios para el bienestar humano generados por los sectores (como la pesca y el turismo) que dependen de los organismos afectados negativamente y de los servicios que prestan.
  - Cambios e incertidumbre en los sectores y grupos que dependen de las especies afectadas, lo que supone costos relacionados con la adaptación a condiciones nuevas o cada vez menos predecibles.
  - Mayores reducciones en el bienestar de más grupos vulnerables, y acumulación de beneficios por la mayor disponibilidad de servicios de los ecosistemas para grupos con una mayor capacidad de adaptación.
- La reducción de la abundancia y la captura de peces y otras poblaciones marinas en regiones con deficiencia de oxígeno pueden causar lo siguiente:
  - Reducción de la disponibilidad de alimentos en zonas con bajos niveles de oxígeno disuelto. Los más afectados serían los sistemas oceánicos de latitudes bajas y las zonas adyacentes a las poblaciones costeras de alta densidad.
  - Los grupos que dependen más de los servicios de los ecosistemas afectados y cuya capacidad de adaptación a los cambios es menor corren el mayor riesgo debido a la pérdida o reducción de servicios de los ecosistemas.
  - Los grupos que dependen de especies y sistemas que son relativamente más susceptibles a las condiciones de deficiencia de oxígeno, tales como los peces, arrecifes de coral y bivalvos, sufrirán más repercusiones negativas.
  - Los efectos en cascada y la estructura de la cadena alimentaria pueden ocasionar que aumenten algunos servicios de los ecosistemas; sin embargo, solo los grupos que tengan la capacidad de aprovechar el aumento de los servicios verán beneficios.
- Las dificultades en el desarrollo de modelos y la calidad de observación significan lo siguiente:
  - El desarrollo de modelos requiere de nuevas observaciones y experimentos específicos que ejercen presión sobre los bienes y la capacidad social.
  - La incertidumbre de los modelos dará lugar a conocimientos menos completos y a una gestión menos eficaz.
  - El aumento de los costos de la incertidumbre y la necesidad de adaptación a nuevas condiciones.

alimentario mundial. La producción mundial de la pesca de captura se ha estabilizado, mientras que la demanda sigue aumentando. La sobreexplotación y las repercusiones en el hábitat y la cadena alimentaria ocasionan que la pesca deje de ser un servicio de los ecosistemas y se convierta en un factor estresante. Se prevé que la desoxigenación se acreciente en las próximas décadas y repercuta en las pesquerías con implicaciones negativas en el crecimiento, la supervivencia y la reproducción, afectando la biomasa y el movimiento de los peces y su consiguiente disponibilidad para la captura. Se prevé que la magnitud de las consecuencias de la desoxigenación en la pesca aumente por el traslape entre las zonas del océano que registran una desoxigenación creciente y las regiones costeras y oceánicas que sustentan una gran producción pesquera.

La cuantificación de las repercusiones de la desoxigenación en las pesquerías se complica por los efectos de diferentes factores ambientales y otros factores estresantes que tam-

bién afectan a la dinámica de las poblaciones de las especies de interés, y porque la dinámica del oxígeno y de las pesquerías (pescadores y buques) depende en gran medida de los lugares. La evaluación del cambio climático a escala mundial incluye cambios simultáneos en la temperatura, la acidez y el oxígeno, así como los efectos causados por otros factores estresantes como el aumento del nivel del mar. Es difícil aislar un efecto directo de hipoxia en los desembarques de pesca mediante un análisis basado en la correlación entre los desembarques y las cargas de nitrógeno en todos los ecosistemas, pero la eficiencia trófica (desembarques por unidad de carga de nitrógeno) era menor en los sistemas con hipoxia extensiva.

La desoxigenación de los océanos afecta a la pesca de diferentes maneras. Esto incluye, por ejemplo, las repercusiones de la deficiencia de oxígeno en la propia población de peces objetivo a través de la disminución de la captación y abundancia de la población, y la distribución espacial de los pe-

ces y crustáceos que provoca cambios en la dinámica de los buques pesqueros. Los análisis abarcan desde pruebas circunstanciales basadas en datos de campo, hasta conjuntos de datos y modelos. Los análisis de modelización demuestran que en situaciones en las que la hipoxia por sí sola puede generar efectos pequeños o moderados a escala de la población, los efectos pueden intensificarse cuando la hipoxia se combina con otros factores estresantes.

Un efecto predominante de la desoxigenación lo constituyen los cambios de lugares de pesca en respuesta a los cambios de distribución a pequeña escala de las especies objetivo debido a la hipoxia, lo que luego incide en la capacidad de captura y la bioeconomía de la pesca. La gestión eficaz de las pesquerías se basa en la capacidad de captura, y si los efectos de la desoxigenación no se incluyen en la capacidad de captura los análisis de gestión pueden carecer de fundamento suficiente y el asesoramiento que proporcionen para la captura puede ser incorrecto.

La disminución de las concentraciones de oxígeno en los hábitats que utilizan actualmente los peces que sustentan a las pesquerías dará lugar a reducciones específicas de crecimiento, supervivencia y reproducción de ejemplares de las especies. Cuando un número suficiente de ejemplares se vea perjudicado, se producirán efectos en la población a través de la reducción de la biomasa que se puede pescar, así como la disminución de la calidad de los peces capturados (por ejemplo, peces delgados).

Las concentraciones de oxígeno disminuirán en zonas crecientes del océano, lo que causará que los organismos eviten áreas letales y, en algunos casos, que los ejemplares se acumulen alrededor de las zonas hipóxicas o cambien su distribución espacial. Esto a su vez tendrá repercusiones en la pesca. Las actividades de pesca se verán afectadas económicamente (aumento de costos) dado que los viajes de los buques se prolongarán y se dedicará menos tiempo a la pesca porque se invertirá más tiempo en el viaje para llegar hasta los lugares de pesca. En algunas situaciones la captura de peces se volverá más fácil (cuando haya acumulaciones más cercanas a la costa) y aumentará la disponibilidad de peces para los pescadores locales. En ambos casos, la desoxigenación influirá en la gestión (podría ser más arriesgada de lo que se pensaba) que depende de la relación entre la captura y la abundancia de la población (capacidad de captura) debido a que las capturas ya no se ajustarán a las suposiciones subyacentes sobre la capacidad de captura que se utilizaron en la evaluación de las poblaciones.

La desoxigenación creciente ocurre en todo el mundo, en especial en zonas costeras que también proporcionan una gran parte de la captura de la pesca comercial y de subsistencia del mundo. Dado que la captura de peces silvestres está alcanzando sus niveles máximos de sostenibilidad, el asesoramiento preciso en materia de gestión es fundamental. En sus evaluaciones y deliberaciones sobre las poblaciones, la gestión debe tener en cuenta los efectos de la desoxigenación.

## **Es necesario seguir avanzando en la ciencia de la desoxigenación de los océanos para predecir con mayor precisión los patrones y consecuencias de la disminución del oxígeno en los océanos, y para fundamentar las políticas y soluciones tecnológicas que impidan que el oxígeno oceánico siga disminuyendo. Entre los aspectos fundamentales cabe destacar los siguientes:**

- Ampliación de las observaciones de oxígeno en el océano abierto y las aguas costeras, incluso mediante la integración con programas y redes existentes, dirigida a las regiones en las que la disponibilidad de más información mejorará la evaluación de la situación actual y los patrones de cambio del oxígeno.
- Experimentos y observaciones para mejorar la comprensión de los mecanismos fundamentales que controlan los patrones y efectos de las disminuciones de oxígeno.
- Modelos numéricos con una mayor capacidad para predecir las repercusiones actuales de la deficiencia de oxígeno y otros factores estresantes, cambios futuros en los niveles de oxígeno y beneficios potenciales de las opciones de gestión a escala mundial, regional y local.
- Evaluaciones de las repercusiones en las economías y sociedades humanas, en especial cuando la disminución de oxígeno amenaza la pesca, la acuicultura y los medios de subsistencia.
- Establecimiento de un sistema de gestión de datos, con un riguroso control de calidad y bajo la dirección de un centro de datos oceanográficos reconocido a escala mundial, que permita el libre acceso para su utilización en la ciencia y la formulación de políticas.
- Mejora continua del equipo de vigilancia del oxígeno, lo que incluye sensores que midan con precisión concentraciones de oxígeno extremadamente bajas y sensores de bajo costo que posibiliten una vigilancia más extensa en aguas costeras submuestreadas.
- Habrá que dar alta prioridad a la creación de capacidad en zonas costeras de países en desarrollo para la observación de los parámetros oceanográficos básicos, sobre todo el oxígeno, y de las repercusiones de la desoxigenación en la pesca y la biodiversidad.



# ¿QUÉ PODEMOS HACER AL RESPECTO?

El contenido de oxígeno del mar abierto y de las aguas costeras ha disminuido desde mediados del siglo XX y se prevé que siga disminuyendo durante el siglo XXI como consecuencia del cambio climático y del aumento de las descargas de nutrientes. Entre las repercusiones de esta reducción del oxígeno en los océanos están la disminución de la biodiversidad, cambios en la distribución de las especies, desplazamiento o reducción de los recursos pesqueros, y cambios en los ciclos biogeoquímicos.

La combustión de combustibles fósiles y la agricultura contribuyen tanto al calentamiento global como al enriquecimiento excesivo de las aguas con nutrientes. Las aguas residuales –biomasa en las aguas residuales no tratadas y nitrógeno y fósforo en los efluentes de aguas residuales, tratados y no tratados– también contribuyen en gran medida al agotamiento del oxígeno en las aguas costeras. Las estrategias de reducción de nutrientes que han sido más eficaces han utilizado requisitos legales, establecido objetivos específicos y empleado la vigilancia para detectar problemas y respuestas a las estrategias de manejo. Existe una gama de posibles soluciones para la reducción de nutrientes que pueden adaptarse a las necesidades y economías locales. Las comparaciones de modelos y observaciones sugieren que los modelos subestiman el verdadero ritmo de pérdida de oxígeno de los océanos. La desoxigenación de los océanos puede ocurrir con mayor rapidez y puede ser más severa de lo que sugieren estos modelos.

Para reducir el índice de disminución del oxígeno de los océanos del mundo y reducir al mínimo la contribución del cambio climático a la desoxigenación de las aguas costeras, es necesario realizar un esfuerzo drástico de mitigación del cambio climático, principalmente mediante reducciones urgentes, radicales y de gran magnitud de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a las actividades humanas. Para restaurar el oxígeno perdido a escala milenaria en el último siglo también habrá que reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a niveles inferiores a los actuales mediante la eliminación activa de los gases de efecto invernadero. La desoxigenación por calentamiento no puede invertirse fácilmente, por lo que una acción pronta para limitar las emisiones de dióxido de carbono y reducir el calentamiento producirá mayores beneficios.

Se necesitan esfuerzos continuos e intensificados para cuantificar las tendencias de la desoxigenación y proyectar las condiciones futuras del oxígeno; entender las repercusiones de la desoxigenación en los procesos biológicos, biogeoquímicos y ecológicos; e incorporar la desoxigenación en el desarrollo de las pesquerías y otras estrategias de gestión. La gobernanza a escalas que van desde las jurisdicciones locales hasta los organismos internacionales como las Naciones Unidas desempeña un papel importante en la identificación del problema y las soluciones a la desoxigenación, y en los esfuerzos de mitigación y adaptación para reducir la desoxigenación y sus consecuencias negativas.

Las soluciones a la desoxigenación de los océanos y la elaboración de estrategias de adaptación en su presencia dependen de una ciencia sólida y adecuada. El alcance internacional de la colaboración científica en este tema es importante; el trabajo científico y los grupos de expertos pueden ayudar a facilitar la comunicación entre las diferentes partes interesadas y apoyar a los responsables de la toma de decisiones para que adopten las medidas necesarias para frenar la creciente desoxigenación a escala local, regional y mundial. Sin embargo, es necesario seguir avanzando en la ciencia de la desoxigenación de los océanos, en especial para mejorar los pronósticos de las condiciones y repercusiones futuras en el bienestar humano.

La desoxigenación de los océanos es un problema progresivo que requiere de atención inmediata. La desoxigenación impulsada por el calentamiento no puede revertirse fácilmente; de hecho, es probable que el inventario de oxígeno oceánico tarde siglos en recuperarse del calentamiento proyectado en las hipótesis de las emisiones de manera habitual. La desoxigenación está intrínsecamente relacionada con el calentamiento climático; la reducción del calentamiento provocado por el hombre es el único medio para evitar la pérdida generalizada de oxígeno en el océano. Sin embargo, la estabilización de las emisiones que cambian el clima puede permitir que la ventilación de los océanos se recupere hasta cierto punto, mitigando así la pérdida de oxígeno. Cuanto mayor sea el retraso en aumentar dramáticamente las ambiciones y reducir drásticamente las emisiones, mayores serán las consecuencias que habrá afrontar en el futuro.

# AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este informe ha sido una tarea importante. Los editores agradecen a Minna Epps, Carl Gustaf Lundin, James Oliver y Ulrika Åberg, del Programa Marino Global y Polar de la UICN, a Imre Sebestyén por el diseño y la diagramación y a todos los expertos independientes que llevaron cabo la revisión y aportaron amplias orientaciones técnicas sobre el texto, así como a aquellas personas que han ayudado a suministrar las ilustraciones para el informe.

Los editores también desean agradecer sinceramente a los científicos que se enumeran a continuación que aportaron material para elaborar este informe:

Edward H. Allison, Andrew H. Altieri, Hannah Bassett, Hannes Baumann, Denise L. Breitburg, Richard Brill, Denis Chabot, Francis Chan, Guy Claireaux, Daniel J. Conley, J. Kevin Craig, Larry B. Crowder, Curtis Deutsch, Boris Dewitte, Robert J. Diaz, Timothy H. Frawley, Christina A. Frieder, Halley E. Froehlich, Natalya D. Gallo, Véronique Garçon, Keryn B. Gedan, Denis Gilbert, Katerina Goubanova, Marilaure Grégoire, Dimitri Gutiérrez, Kirsten Isensee, Takamitsu Ito, Gil S. Jacinto, R. Jeyabaskaran, J. Anthony Koslow, Shirley Leung, Lisa A. Levin, Karin E. Limburg, Olof Linden, Matthew C. Long, Natalie H.N. Low, Baye Cheikh Mbaye, Fiorenza Micheli, K.A.S. Mislán, K.S. Mohamed, Ivonne Montes, Barbara Muhling, Yasuhiko Naito, S.W.A. Naqvi, Hannah R. Nelson, Crystal A. Ng, Andreas Oeschlies, Shelton Padua, James J. Pierson, Grant C. Pitcher, D. Prema, Nancy N. Rabalais, Michael R. Roman, Kenneth Rose, Rutger Rosenberg, Sunke Schmidtke, Brad A. Seibel, David W. Sims, Caroline P. Slomp, Inna M. Sokolova, Sheanna Steingass, Alexandra Stote, Lothar Stramma, Kersey Sturdivant, Phillip Williamson, Karen F. Wishner, Moriaki Yasuhara.

Además, los editores expresan su sincera gratitud al Ministerio de Medio Ambiente y Energía del Gobierno de Suecia por su generoso apoyo financiero.

Este resumen ejecutivo y el informe técnico completo pueden descargarse en:  
[www.iucn.org/deoxygenation](http://www.iucn.org/deoxygenation)

La presentación del material en esta publicación y las denominaciones empleadas para las entidades geográficas no implican en absoluto la expresión de una opinión por parte de la UICN o de otras organizaciones participantes sobre la situación jurídica de un país, territorio o zona, o de sus autoridades, o acerca de la demarcación de sus límites o fronteras.

Los puntos de vista que se expresan en esa publicación no reflejan necesariamente los de la UICN o de otras organizaciones participantes.

La UICN y las organizaciones participantes declinan cualquier error u omisión en la traducción de este documento de la versión original en inglés al español. En caso de discrepancia, remítase, por favor, a la edición original. Título de la edición original: *Ocean deoxygenation: everyone's problem. Causes, impacts, consequences and solutions. Summary for policy makers.* (2019). Publicado por: UICN, Gland, Suiza. DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.14.en>

Publicado por: UICN, Gland, Suiza

Derechos reservados: © 2019 UICN, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales

Citación: Laffoley, D. & Baxter, J.M. (éds.) (2019). *La desoxigenación de los océanos: un problema de todos. Causas, impactos, consecuencias y soluciones. Resumen para los responsables de formular políticas.* Gland, Suiza: UICN. 28 pp.

ISBN: 978-2-8317-2027-2 (PDF)

DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2019.14.es>

Traducción al español: Elisabeth Lehnhoff



La UICN es una Unión de Miembros compuesta por agencias gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil. La UICN pone a disposición la experiencia, los recursos y el alcance de sus más de 1300 organizaciones miembro y los aportes de más de 15.000 expertos. La UICN es la autoridad mundial en cuanto al estado de la naturaleza y las medidas necesarias para protegerla.



© Helmut Corneli / Alamy stock photo



UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA  
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

SEDE MUNDIAL  
Rue Mauverney 28  
1196 Gland  
Suiza  
Tel +41 22 999 0000  
Fax +41 22 999 0002  
[www.iucn.org](http://www.iucn.org)

Fotografías de la cubierta: desde arriba, en sentido horario  
© Waterframe / Alamy stock photo; © Andrew Altieri;  
© 2004 MBARI; © D.M. Sheny