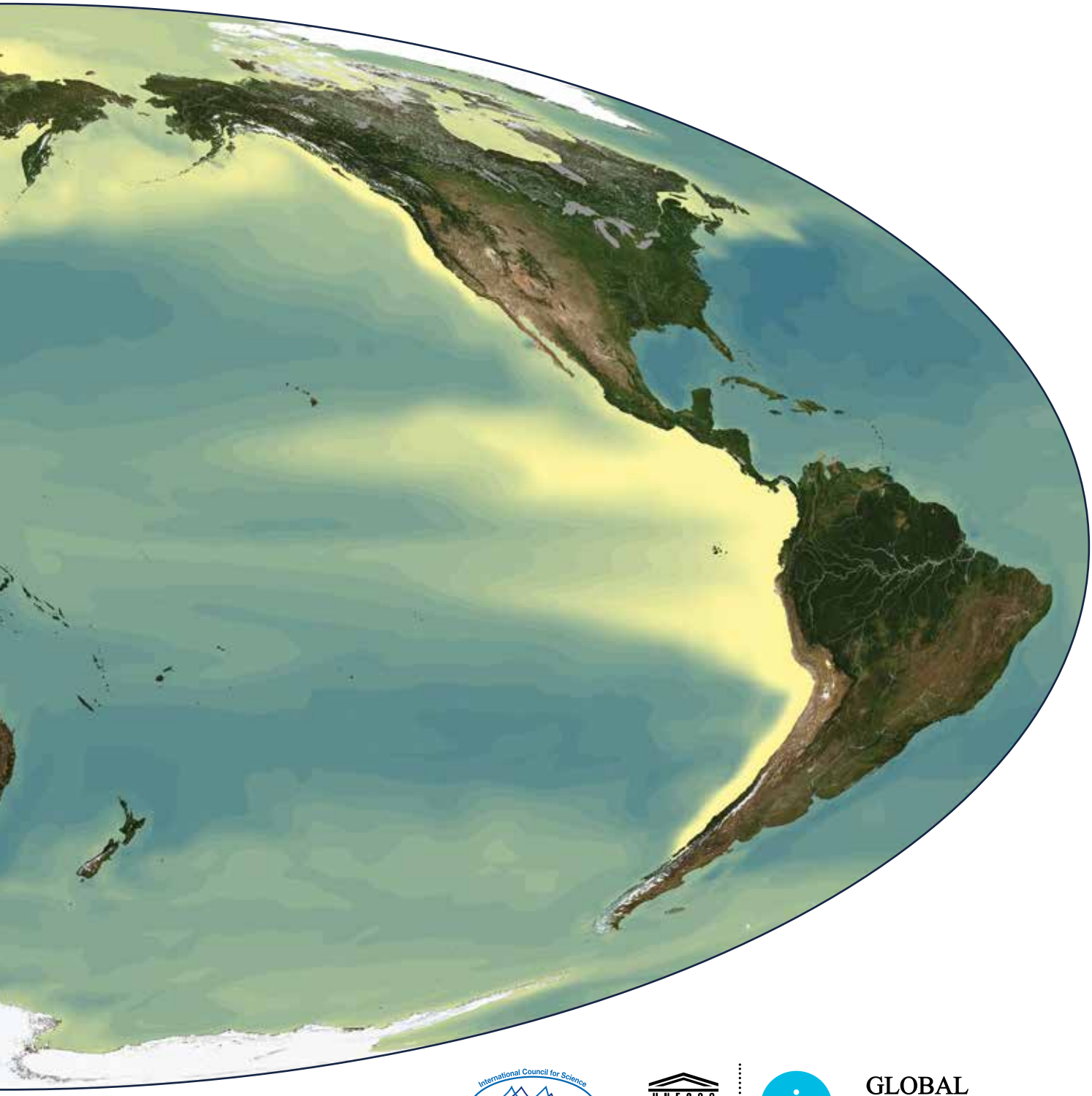
La acidificación del océano

Resumen para responsables de políticas

Tercer simposio "El océano en un mundo con altos niveles de CO_2"



International Council for Science
SCOR
Scientific Committee on Oceanic Research

UNESCO

GLOBAL CHANGE
IGBP International Geosphere-Biosphere Programme

Patrocinadores científicos:

El **Programa Internacional para la Geosfera y la Biosfera** (IGBP) fue creado en 1987 con el fin de coordinar la investigación internacional en las interacciones a escala mundial y regional entre los procesos biológicos, químicos y físicos que se producen en la Tierra y sus interacciones con los sistemas humanos. Los proyectos centrales internacionales del IGBP, como el Proyecto Integrado sobre Biogeoquímica Marina y Análisis de Ecosistemas (IMBER), el Estudio sobre la capa superficial del océano en relación con la baja atmósfera (SOLAS), Los Cambios Mundiales Pretéritos (PAGES) y la Interacción Tierra-Océano en las Zonas Costeras (LOICZ) se ocupan de la acidificación del océano.

La **Comisión Oceanográfica Intergubernamental** (COI-UNESCO) fue instituida por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) en 1960, con el fin de brindar a los Estados Miembros de las Naciones Unidas un mecanismo esencial de cooperación mundial en el estudio del océano.

El **Comité Científico de Investigaciones Oceánicas** (SCOR) fue creado en 1957 por el Consejo Internacional de Uniones Científicas y es un copatrocinador de los proyectos internacionales IMBER y SOLAS.

Referencia:

IGBP, COI, SCOR (2013). *La acidificación del océano. Resumen para responsables de políticas – Tercer simposio "El océano en un mundo con altos niveles de CO_2*. Programa Internacional Geosfera – Biosfera, Estocolmo (Suecia). (IOC/BRO/2013/5)

Editores:

Wendy Broadgate (IGBP), Owen Gaffney (IGBP), Kirsten Isensee (COI-UNESCO), Ulf Riebesell (GEOMAR), Ed Urban (SCOR) y Luis Valdés (COI-UNESCO).

Autores:

Wendy Broadgate, IGBP; **Ulf Riebesell**, GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Alemania; **Claire Armstrong**, University of Tromsø, Noruega; **Peter Brewer**, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA; **Ken Denman**, University of Victoria, Canadá; **Richard Feely**, Pacific Marine Environmental Laboratory, NOAA, USA; **Kunshan Gao**, Xiamen University, China; **Jean-Pierre Gattuso**, CNRS-UPMC, Laboratoire d'Océanographie, Francia; **Kirsten Isensee**, COI-UNESCO; **Joan Kleypas**, National Center for Atmospheric Research (Climate and Global Dynamics), USA; **Dan Laffoley**, International Union for Conservation of Nature, Suiza; **James Orr**, Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Francia; **Hans-Otto Pörtner**, Alfred Wegener Institute, Alemania; **Carlos Eduardo de Rezende**, Universidade Estadual do Norte Fluminese, Brasil; **Daniela Schmidt**, University of Bristol, Reino Unido; **Ed Urban**, SCOR; Anya Waite, University of Western Australia; **Luis Valdés**, COI-UNESCO.

Los autores agradecen a las siguientes personas los comentarios que han realizado durante la elaboración del texto: Jim Barry (MBARI), Richard Black (Global Ocean Commission), Luke Brander (VU University Amsterdam y Hong Kong University of Science and Technology), Sam Dupont (Gothenburg University), Jonathan Wentworth (UK Parliamentary Office of Science and Technology) y Wendy Watson-Wright (COI-UNESCO).

Infografía:

Félix Pharand-Deschênes (Globaïa), Naomi Lubick (IGBP), Owen Gaffney (IGBP) y Wendy Broadgate (IGBP).

Diseño gráfico y producción:

Hilarie Cutler (IGBP) y Naomi Lubick (IGBP)

Imagen de la portada:

pH oceánico en 2100. Datos de modelos suministrados por Tatiana Ilyina, del Max Planck Institute for Meteorology.

La acidificación del océano

La investigación sobre la acidificación del océano está creciendo rápidamente. En el Tercer simposio "El océano en un mundo con altos niveles de CO_2", celebrado en Monterey, California, en septiembre de 2012, participaron 540 expertos de 37 países, que debatieron sobre los resultados de las investigaciones relativas a la acidificación del océano, sus repercusiones en los ecosistemas, sus consecuencias socioeconómicas y sus implicaciones para las políticas. La participación en el simposio de Monterey superó en más del doble la del simposio celebrado cuatro años antes.

En este documento se ofrece un resumen de los conocimientos sobre acidificación del océano, a partir de las investigaciones más recientes presentadas en el simposio y fuera de él.

Los niveles de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico están subiendo como consecuencia de las actividades humanas, como es el caso de la quema de combustibles fósiles y están aumentado la acidez del agua de mar. Desde una perspectiva histórica, el océano ha absorbido aproximadamente 30% de todo el CO_2 liberado a la atmósfera por los humanos desde el inicio de la revolución industrial, lo que ha representado un aumento del 26% de la acidez del océano.[1]

La acidificación del océano provoca cambios en los ecosistemas y en la biodiversidad marina. Puede afectar a la seguridad alimentaria y limita la capacidad del océano de absorber el CO_2 procedente de las emisiones antropogénicas. Las repercusiones económicas de la acidificación del océano podrían ser considerables.

La reducción de las emisiones de CO_2 es la única forma de minimizar los riesgos a gran escala y a largo plazo.

Katharina Fabricius

Resumen de resultados

En los últimos 20 años se ha demostrado que el pH de los océanos disminuye como resultado de las emisiones antropogénicas de CO_2 a la atmósfera.

El Tercer simposio "El océano en un mundo con altos niveles de CO_2"se basa en este hecho.

Katharina Fabricius

- Prosigue el proceso de acidificación del océano a un ritmo sin precedentes en la historia de la Tierra. Las investigaciones más recientes indican que dicho ritmo puede ser el mayor de los últimos 300 millones de años.
- A medida que aumenta la acidez del océano, disminuye su capacidad de absorción del CO_2 atmosférico.
- Las repercusiones de la acidificación del océano en especies concretas han sido estudiadas en organismos en el laboratorio y en el campo desde los polos a los trópicos. En muchos organismos se observan efectos adversos, tales como una menor capacidad de formar y mantener conchas y esqueletos, así como una disminución de la supervivencia, crecimiento, abundancia y desarrollo larvario. Por el contrario, otras observaciones indican que algunos organismos toleran la acidificación y que otros pueden llegar incluso a proliferar con ella.
- Dentro de unas décadas, el agua de una gran parte de los océanos polares ya será corrosiva para las conchas sin protección de los organismos calcáreos marinos.
- Los cambios en la química de los carbonatos de los océanos tropicales podrán dificultar o impedir, dentro de unas décadas, el crecimiento de los arrecifes de coral.
- Se prevé que las consecuencias de largo alcance de la acidificación del océano afecten a las redes alimentarias, la biodiversidad, la acuicultura y, por tanto, a las sociedades.
- Las especies difieren en su capacidad de adaptación a nuevos entornos. Las características químicas de los océanos pueden estar cambiando demasiado rápido para que muchas especies o poblaciones se adapten a través de la evolución.
- Muchos factores de estrés, como la acidificación, el calentamiento, la disminución de las concentraciones de oxígeno (desoxigenación), el aumento de la radiación ultravioleta debido a la reducción del ozono estratosférico, la pesca excesiva, la contaminación y la eutrofización, así como sus interacciones mutuas, están planteando desafíos importantes a los ecosistemas oceánicos.
- No comprendemos plenamente las respuestas biogeoquímicas que puede dar el sistema climático a la acidificación del océano.
- La predicción de cómo se modificarán los ecosistemas en su conjunto ante la elevación de los niveles de CO_2 sigue siendo problemática. Sabemos lo suficiente para prever cambios en los ecosistemas marinos y la biodiversidad en el plazo de nuestras vidas, pero somos incapaces de hacer predicciones cuantitativas fiables sobre las repercusiones socioeconómicas de tales cambios a largo plazo.
- Quienes dependen de los servicios del ecosistema oceánico se encuentran en una situación especialmente vulnerable y pueden necesitar adaptarse o sobrellevar las consecuencias de la acidificación del océano dentro de unas décadas. La pesca y la acuicultura del marisco en algunas zonas podrán hacer frente a esta situación si desarrollan prácticas de gestión que eviten las consecuencias de la acidificación del océano. La pérdida de arrecifes de coral afectará al turismo, a la seguridad alimentaria y a la protección de las costas, en muchos de los lugares más pobres del planeta.

Mitigación y adaptación

La acidificación del océano no está explícitamente regulada por los tratados internacionales. Los procesos y convenios internacionales y regionales de las Naciones Unidas están empezando a poner de relieve el fenómeno de la acidificación del océano (Convenio de Londres y Protocolo, Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, Convenio sobre la Diversidad Biológica, entre otros). Los negociadores de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) han empezado a recibir informes periódicos sobre acidificación del océano realizados por la comunidad científica, y el tema aparece ahora en los informes de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

En junio de 2012, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río + 20) reconoció que la acidificación del océano constituye una amenaza para los ecosistemas ecológicos y económicamente más importantes, así como para el bienestar humano.

Sin embargo, no existen todavía ni mecanismos internacionales ni una financiación adecuada que se ocupen específicamente de la mitigación de la acidificación del océano o la adaptación a ella.

Consideraciones sobre las políticas

- La causa principal de la acidificación del océano es la liberación a la atmósfera del CO_2 originado por actividades humanas. La única opción realista de mitigación que se conoce a escala mundial consiste en limitar los niveles futuros del CO_2 atmosférico.
- La gestión adecuada del uso de la tierra puede mejorar la absorción del CO_2 atmosférico por la vegetación y los suelos, gracias a actividades como la restauración de las zonas pantanosas, la plantación de nuevos bosques y la reforestación.
- Las propuestas de geoingeniería que no supongan una disminución del CO_2 atmosférico –por ejemplo, métodos que se centran únicamente en la temperatura (como la retrodispersión de aerosoles o la reducción de otros gases de efecto invernadero que no sean el CO_2)– no evitarán la acidificación del océano. Añadir minerales alcalinos al océano podría ser eficaz y económicamente factible, pero solo a una escala reducida en zonas costeras, y se desconocen en gran parte las consecuencias que esto podría tener para el medio ambiente[2].
- Si se limitan las subidas de los niveles de CO_2, disminuirán las repercusiones de otros factores de estrés en los ecosistemas oceánicos, tales como la elevación de la temperatura y la desoxigenación, también asociados al aumento del CO_2.
- La industria acuícola del marisco se enfrenta a amenazas muy serias y podrá beneficiarse de la evaluación de riesgos y del análisis de las estrategias de mitigación y adaptación. Por ejemplo, el control del agua de mar en los criaderos de marisco permite determinar cuándo hay que limitar la entrada de agua de mar con un pH menor, decidir dónde reubicar los criaderos, o a los responsables de estos a seleccionar para la cría variedades o fases larvarias más resistentes a la acidificación del océano.
- A nivel local, los efectos de la acidificación del océano sobre la resiliencia pueden limitarse si se minimizan los factores de estrés[3,4,5] con las siguientes medidas:
  - Determinación de prácticas sostenibles de gestión de la pesca, tales como la regulación de las capturas para reducir la pesca excesiva, y la elaboración de planes a largo plazo de reducción de las capturas incidentales. Ha quedado demostrado que, si se lleva a la práctica y se hace cumplir, este tipo de gestión favorece la resiliencia de los ecosistemas.
  - Adopción de medidas de gestión sostenible de los hábitats, mayor protección de las costas, reducción de los sedimentos acumulados y aplicación de la planificación marina espacial.
  - Creación y mantenimiento de áreas marinas protegidas (MPA) que ayuden a gestionar ecosistemas en peligro o muy vulnerables, con el fin de mejorar su resiliencia frente a los múltiples factores de estrés del medio[6].
  - Control y regulación de las fuentes localizadas de acidificación a causa de escorrentías y contaminantes como los fertilizantes.
  - Reducción de las emisiones de dióxido de azufre y óxido nitroso, producidas por las centrales de energía alimentadas con carbón, y de los gases de escape de los buques[7], que generan intensos efectos de acidificación a nivel local.

ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO

pH oceánico en 2100

Escenario de niveles de emisión de CO_2 altos (RCP* 8,5)

La escala de pH mide la acidez de las soluciones acuosas. Los valores del pH inferiores a 7 indican acidez y los superiores, basicidad. Disminuir el pH en una unidad representa multiplicar por 10 la acidez. El pH medio de las aguas superficiales de los océanos se ha reducido alrededor de 0,1 unidades, de 8,2 a 8,1, desde el inicio de la revolución industrial, lo que corresponde a un aumento del 26% de su acidez.

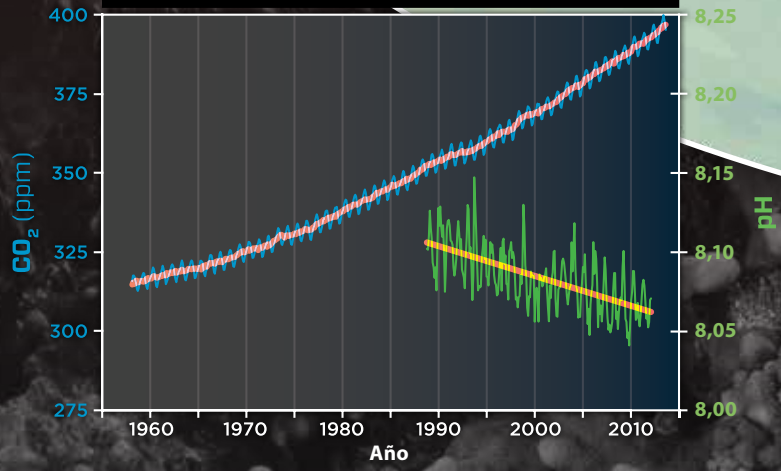
ÁRTICO
La acidez de las aguas del Ártico aumenta más deprisa que la media mundial porque las aguas frías contienen más CO_2, y la fusión de los hielos empeora el problema.

AFLORAMIENTO DE CANARIAS

AFLORAMIENTO DE BENGUELA

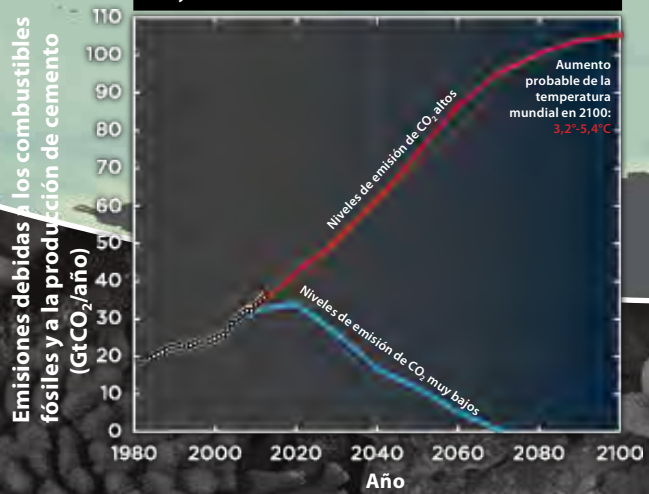
CAMBIOS EN LAS ESPECIES
Algunas especies, como las plantas marinas, pueden proliferar en aguas más ácidas. Otras deberán luchar para adaptarse. Cualquier pérdida de especies podría traducirse en una menor biodiversidad, que es un indicador de la salud del ecosistema.

CO_2 atmosférico y pH oceánico



Observaciones de CO_2 (partes por millón) en la atmósfera y pH del agua superficial, series temporales oceánicas de Mauna Loa y Hawai (HOT) de la estación Aloha en Hawai (Pacífico Norte).
Crédito: Adaptado de Richard Feely (NOAA), Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/ccgg/trends) y Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu)

Emisiones observadas de CO_2 y escenarios de emisiones hasta 2100



Las emisiones mundiales de CO_2 (puntos blancos, incertidumbre en gris) debidas a los combustibles fósiles siguen la trayectoria de los niveles de emisión altos (línea roja, RCP* 8,5), según la cual el planeta se calentará considerablemente. Se requieren disminuciones notables y sostenidas (línea azul, RCP* 2,6) para que aumente la probabilidad de que se mantenga el objetivo acordado internacionalmente de 2°C.
Crédito: Glen Peters y Robbie Andrew (CICERO) y Global Carbon Project, adaptado de Peters et al. 2013 . Datos históricos proporcionados por el Carbon Dioxide Information Analysis Center.

* Escenarios de emisiones del IPCC – Trayectorias representativas de concentración[1].

LA ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO EN CIFRAS

40% de incremento en los niveles de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico desde el inicio de la revolución industrial

26% Incremento de la acidez del océano desde los valores preindustriales hasta la fecha

Alrededor del 170% Proyección del incremento de la acidez del océano para 2100 en relación con los valores preindustriales, si se mantienen los niveles de emisión de CO_2 altos (RCP* 8,5)

10 veces El ritmo de acidificación actual es más de 10 veces superior al de cualquier otro momento en los últimos 55 millones de años

24 millones Número de toneladas de CO_2 que absorbe el océano cada día

2100

ESTRÉS OCEÁNICO

La acidificación es uno de los cambios más notables que experimenta el océano. Otros son el calentamiento del agua, la disminución de la concentración de oxígeno, la pesca excesiva y la eutrofización.

AFLORAMIENTO DE CALIFORNIA

CORALES

De persistir los niveles de emisión de CO_2 altos, los cambios en la química de los carbonatos y el calentamiento de los océanos tropicales podrán dificultar o impedir el crecimiento de los arrecifes de coral dentro de unas décadas. Los corales de aguas calientes se representan en color azul.

REGIONES DE AFLORAMIENTO

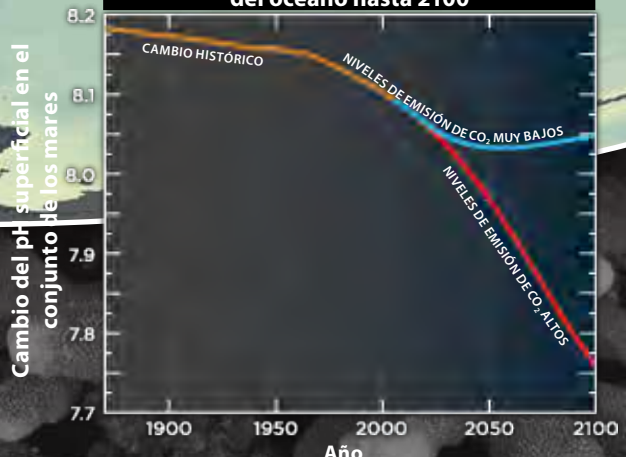
Se prevén grandes cambios en regiones de afloramiento de importancia económica, que ya tienen niveles naturales de pH bajos. En este caso, la acidificación, el calentamiento y la desoxigenación actúan al unísono. (Trazos de color naranja.)

AFLORAMIENTO DE HUMBOLT

MARISCOS

Algunos moluscos valiosos desde el punto de vista económico, como los mejillones y las ostras, son muy sensibles a la acidificación. En la actualidad, algunos criaderos de marisco ya han tenido que adaptarse a niveles de pH más bajos o reubicarse

Proyecciones del pH superficial del océano hasta 2100



Modelo de evolución del pH superficial en el conjunto de los mares de 1870 a 2100. La línea azul corresponde al cambio estimado del pH resultante de unos niveles de emisión de CO_2 muy bajos (IPCC, Trayectoria representativa de concentración RCP* 2,6). La línea roja representa el pH con unos niveles de emisión de CO_2 altos (la trayectoria actual de las emisiones es RCP* 8,5). Crédito: Adaptado de Bopp et al. 2013[9].

1850

ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO (pH)

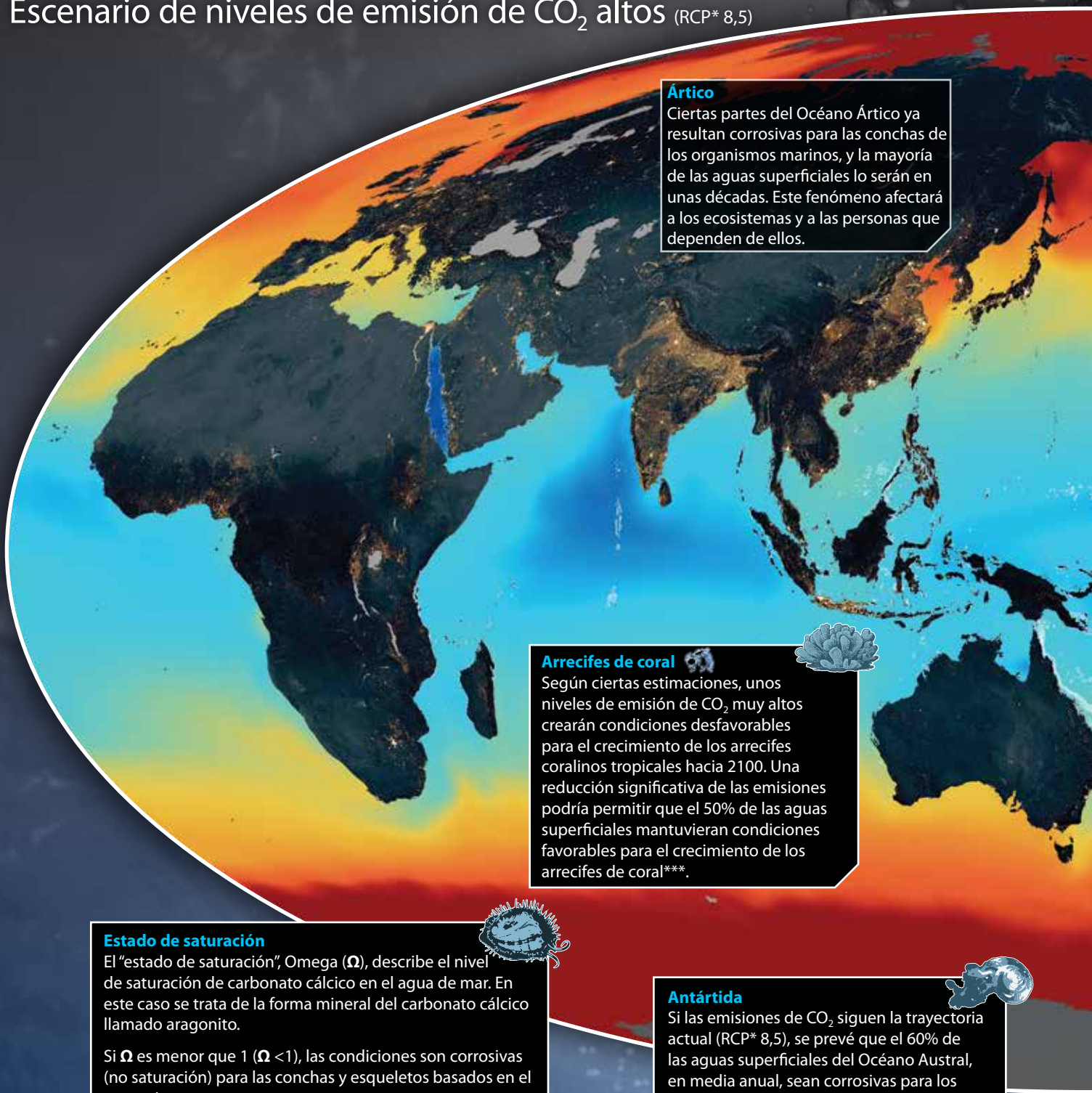
7,1 — 7,7 — 8,3

Mapas de acidificación del océano: las proyecciones de los modelos han sido calculadas por MPI-ESM-LR; datos suministrados por Tatiana Ilyina, del Ocean Biochemistry Group, Max Planck Institute for Meteorology.
Diseño: Félix Pharand-Deschênes, Globaia.

ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO

Saturación de aragonito en 2100

Escenario de niveles de emisión de CO_2 altos (RCP* 8,5)



Ártico

Ciertas partes del Océano Ártico ya resultan corrosivas para las conchas de los organismos marinos, y la mayoría de las aguas superficiales lo serán en unas décadas. Este fenómeno afectará a los ecosistemas y a las personas que dependen de ellos.

Arrecifes de coral

Según ciertas estimaciones, unos niveles de emisión de CO_2 muy altos crearán condiciones desfavorables para el crecimiento de los arrecifes coralinos tropicales hacia 2100. Una reducción significativa de las emisiones podría permitir que el 50% de las aguas superficiales mantuvieran condiciones favorables para el crecimiento de los arrecifes de coral***.

Estado de saturación

El "estado de saturación", Omega (**Ω**), describe el nivel de saturación de carbonato cálcico en el agua de mar. En este caso se trata de la forma mineral del carbonato cálcico llamado aragonito.

Si **Ω** es menor que 1 (**Ω** <1), las condiciones son corrosivas (no saturación) para las conchas y esqueletos basados en el aragonito.

Si Ω es mayor que 1 (**Ω** >1), las aguas están sobresaturadas de carbonato cálcico y las condiciones son favorables para la formación de conchas. El crecimiento del coral resulta favorecido cuando **Ω** ≥3.

Las proyecciones de los modelos indican que, hacia 2100, **Ω** será inferior a 3 en la aguas superficiales alrededor de los arrecifes tropicales, si las emisiones de CO_2 siguen la trayectoria actual***.

Antártida

Si las emisiones de CO_2 siguen la trayectoria actual (RCP* 8,5), se prevé que el 60% de las aguas superficiales del Océano Austral, en media anual, sean corrosivas para los organismos con conchas de aragonito, por ejemplo los pterópodos, que forman parte de la red alimentaria marina. Una reducción significativa de las emisiones (RCP* 2,6) podría evitar que la mayor parte de las aguas superficiales del Océano Austral se vuelvan corrosivas para los organismos con conchas de aragonito**.

* Escenarios de emisiones del IPCC – Trayectorias representativas de concentración[1].
** Comunicación personal: Joos & Steinacher, según Steinacher et al. 2013[10].
*** Ricke *et al.* 2013[11].

Conchas y esqueletos

Las conchas y los esqueletos de muchos organismos marinos están compuestos de calcita o de aragonito. Ambas son formas de carbonato cálcico. Los científicos están especialmente interesados en el aragonito, que producen muchos corales y algunos moluscos, porque es más soluble que la calcita.

Los organismos generan conchas y esqueletos más fácilmente cuando en el agua abundan los iones carbonato (situación de sobresaturación). Las conchas y los esqueletos sin protección orgánica se disuelven cuando en el agua escasean los iones carbonato (situación de subsaturación).

2100

Fitoplancton

Las conchas duras de los cocolitóforos –diminutos organismos marinos flotantes– producen una gran parte del carbonato cálcico marino. Al morir, se hunden y transportan carbono al fondo del océano. Son una fuente importante de alimento para otros seres vivos marinos y constituyen una fuente destacada de sulfuro de dimetilo (DMS), un gas que reduce la temperatura del aire y del agua.

La respuesta de los cocolitóforos a la acidificación está siendo objeto de una intensa investigación. Mientras la acidificación del océano parece ser tolerada por algunas especies, en otras provoca disminuciones de las tasas de calcificación y de crecimiento en aguas ácidas.

Estado de saturación del aragonito (Ω)

<1 (corrosivas) | 1 | 2 | 3 | >3

1850

Mapas de acidificación del océano: datos suministrados por Tatiana Ilyina, del Ocean Biochemistry Group, Max Planck Institute for Meteorology.
Diseño: Félix Pharand-Deschênes. Globaia.

Coordinación internacional de la investigación

Ulf Riebesell; GEOMAR

- La investigación es una necesidad urgente para reducir las incertidumbres. Resulta crucial establecer de forma coordinada una **red mundial de experimentación, observación y modelos marinos**. Las respuestas de las especies clave y los ecosistemas en su conjunto, especialmente en el largo plazo, deben constituir los ámbitos prioritarios de investigación, así como la capacidad de adaptación de los organismos, las repercusiones socioeconómicas y las reacciones del sistema climático.
- En junio de 2012, en la Cumbre de las Naciones Unidas Río+20, se anunció la creación del **Centro Internacional de Coordinación sobre la Acidificación de los Océanos**. Estará ubicado en Mónaco, en el Laboratorio del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para el Medio Ambiente Marino y facilitará, informará y promoverá actividades internacionales de observación e investigación sobre acidificación del océano, y fomentará el vínculo entre ciencia y política.
- En junio de 2012 se creó la **Red mundial de observación de la acidificación de los océanos**[12], en estrecha colaboración con el Centro Internacional de Coordinación. A nivel mundial, son pocos los lugares en los que se realizan mediciones multi-decenales, y las regiones remotas están poco cubiertas. Esta red medirá las variables químicas y ecosistémicas necesarias con vistas a elaborar una referencia para la evaluación oportuna de las repercusiones de la acidificación océano. Garantizará la calidad y la comparabilidad de los datos, elaborará síntesis a partir de ellos e informará a la sociedad, para su beneficio.
- Para hacer el seguimiento de las repercusiones sobre los ecosistemas, un aspecto esencial de las futuras actividades de coordinación internacional de la investigación será sin duda la cuantía de las inversiones.
- **'Future Earth'**, la iniciativa de investigación internacional de diez años de duración sobre sostenibilidad mundial, promovida por el Consejo Internacional para la Ciencia, aportará un mecanismo para el desarrollo de un programa de investigación coordinada a nivel internacional en el que se abordarán temas como la acidificación del océano.

Compromiso de las partes interesadas

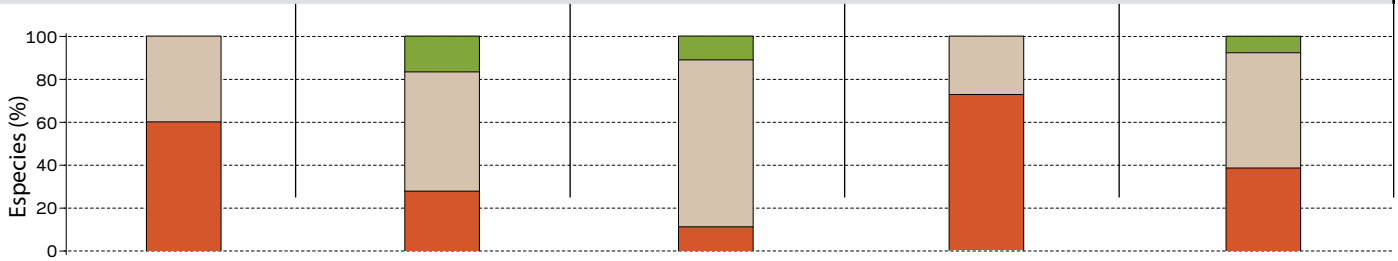
El intercambio eficaz de conocimientos entre la ciencia, la política y la industria es crucial para conseguir que la adaptación y la mitigación puedan llevarse a cabo. Se ha creado un foro de diálogo entre la comunidad científica y las partes interesadas, denominado **Grupo Internacional de Usuarios de Referencia sobre Acidificación Oceánica**, a partir de una iniciativa europea previa. Agrupará a un gran número de usuarios finales y científicos de primera fila y facilitará el rápido intercambio de conocimientos.

Además, 'Future Earth' (véase más arriba) tiene la intención de actuar como plataforma de diálogo centrado en soluciones, sobre temas globales como la acidificación oceánica.

Organismos importantes desde el punto de vista comercial y ecológico

La investigación científica muestra la vulnerabilidad y la sensibilidad de importantes especies marinas, desde el punto de vista comercial y ecológico, ante la acidificación del océano a niveles de CO_2 elevados (adaptado de Turley y Boot, 2011[13]; y Wittmann y Pörtner, 2013[14]).

GRUPOS				
Moluscos	**Equinodermos**	**Crustáceos**	**Peces**	**Corales**
Pterópodos, almejas, vieiras, mejillones, ostras, orejas de mar, caracoles marinos y cefalópodos (calamares, sepias y pulpos)	Erizos, pepinos de mar, estrellas	Camarones, cangrejos, langostas, copépodos (zooplancton), etc.	Pequeños pelágicos (arenques, sardinas, anchoas), grandes pelágicos (atún, bonito, pez vela), bentónicos (rodaballo, fletán, bacalao, eglefino), etc.	Corales de aguas calientes y frías
Función en el ecosistema				
Los mejillones y los pterópodos son una fuente alimentaria importante para los peces, en concreto el salmón (pterópodos). Los mejillones y las ostras proporcionan hábitats a otros organismos.	Especies clave y fuente alimentaria para los peces. Las estrellas de mar son depredadores importantes.	El zooplancton, ej.: copépodos, tiene una función central en las redes tróficas y conecta el fitoplancton (del que se alimenta) con los depredadores (peces y mamíferos).	Función destacada en el equilibrio de los ecosistemas, como depredadores principales o como conexión entre niveles tróficos importantes.	Construcción de ecosistemas, capaces de proporcionar hábitat a una gran diversidad de especies marinas, muchas de las cuales son específicas de los arrecifes de coral.
Valor comercial mundial estimado en la actualidad*				
24.000 millones de dólares. Importancia local. Fuentes directas de proteínas en algunos Estados insulares.	700 millones de dólares. Importancia local. Alimento "de lujo"; los pepinos de mar se utilizan considerablemente en la medicina tradicional china.	37.000 millones de dólares.	65.000 millones de dólares. Parte importante de la dieta humana y de la fabricación de aceite y harinas de pescado. Importancia local: en algunas regiones, la alimentación y los ingresos dependen de ellos.	30.000–375.000 millones de dólares**. Representan las áreas críticas de biodiversidad y proporcionan protección a las costas, atraen a turistas y facilitan la pesca.
Vulnerabilidad				
Se observa que los moluscos adultos y los inmaduros presentan tasas reducidas de calcificación, crecimiento y supervivencia. Algunas especies pueden extinguirse a nivel local.	Se han estudiado pocas especies. Vulnerabilidad en las primeras fases de la vida. Algunas especies pueden extinguirse a nivel local.	Menos afectados que otros grupos. La tolerancia térmica de algunos cangrejos se reduce con la acidificación.	Posibles efectos indirectos debidos a los cambios en las presas y la pérdida de hábitat, como los corales. Posiblemente, algunos efectos directos sobre el comportamiento, la adaptación y la supervivencia de las larvas.	Reducción de la calcificación, aumento de la bioerosión y de los efectos sinérgicos del calentamiento y la acidificación.
Sensibilidad (porcentaje de especies afectadas)$^{\Delta}$				



* El valor comercial de la pesca es la suma de la pesca de captura y la acuicultura en dólares estadounidenses de 2010[15].

** Estimación actual del valor mundial de los bienes y servicios suministrados por los arrecifes de coral, tales como la protección de las costas, el turismo, la biodiversidad y los alimentos[16,17].

$^{\Delta}$ Adaptado de Wittmann y Pörtner, 2013[14]. Estos datos corresponden a trayectorias de los niveles de CO_2 si todo se mantiene igual.

Images: © iStockphoto.com

Sociedades y economías

La sociedad depende del océano para diversos servicios del ecosistema:

- Servicios de provisión, como los alimentos;
- Servicios de regulación, como la absorción de carbono atmosférico;
- Servicios culturales, como el ocio;
- Servicios de apoyo, como el ciclo de los nutrientes.

Aunque se sabe mucho acerca de los efectos de la acidificación del océano sobre organismos individuales, se desconocen en gran medida las posibles respuestas de los ecosistemas completos. Así pues, si bien se prevén consecuencias nocivas para el marisco y los corales de aguas calientes (nivel de confianza alto) y la pesca (nivel de confianza bajo), resulta difícil cuantificar cómo cambiarán los ecosistemas y la pesca y de qué manera las sociedades se adaptarán y harán frente a los cambios.

Niveles de confianza

En este documento se utilizan los niveles de confianza que se indican a la derecha. En el apartado sobre bases científicas, más abajo, podrá encontrarse información adicional sobre la manera de determinar estos niveles.

- V Muy alto
- H Alto
- M Medio
- L Bajo

V La capacidad del océano de actuar como sumidero de carbono disminuye a medida que se acidifica [Nivel de confianza muy alto]

El océano representa un inmenso sumidero para las emisiones antropogénicas de CO_2. Alrededor de una cuarta parte de las emisiones anuales de CO_2 derivadas de las actividades humanas acaban en el océano[18]. No se podrían garantizar estas tareas de absorción en el futuro. El CO_2 atmosférico crece más rápidamente de lo que puede afrontar el océano. La capacidad del océano de absorber CO_2 disminuye conforme disminuye el pH del agua de mar; es decir, disminuye su capacidad de almacenamiento de agua de mar[19]. Esta merma de capacidad es motivo de preocupación cuando se trata de estabilizar las emisiones de CO_2 e implica que habrá que recortar más las emisiones, si se quieren cumplir las metas de mitigación del cambio climático.

M La disminución de la pesca de mariscos acarreará pérdidas económicas [Nivel de confianza medio], pero hoy por hoy resulta incierta la amplitud de tales pérdidas

Las pérdidas económicas en todo el mundo en 2100 debidas al descenso de la producción de molusco, como consecuencia de la acidificación del océano, se estiman en 130.000 millones de dólares (a niveles de precios de 2010), con una tendencia de emisiones de CO_2 similares a las actuales, según una fuente[20] [Nivel de confianza bajo]. En los Estados Unidos, se estima que la reducción de los ingresos debida al retroceso de los cultivos de moluscos a causa de la acidificación será del 13% en 2060[21] [Nivel de confianza bajo]. Las especies de mariscos importantes desde el punto de vista económico pueden responder de formas distintas a la acidificación del océano (véase el cuadro de la página 9), pero no se sabe todavía lo suficiente como para hacer predicciones cuantitativas para el conjunto de la pesca de mariscos.

Los moluscos parecen ser uno de los grupos de organismos más sensibles entre los estudiados en condiciones de acidificación de las aguas. En efecto, las larvas de ostras de los criaderos de la región del Pacífico Norte son muy sensibles a la acidificación y ya están sufriendo los efectos de unas aguas de pH bajo[22,23].

Consecuencias sociales

Los ejemplos presentados ilustran posibles descensos acusados de los ingresos, la posible pérdida de puestos de trabajo y de medios de subsistencia, así como los costos económicos indirectos que pueden producirse si la acidificación del océano daña los hábitats marinos, modifica la disponibilidad de los recursos marinos y distorsiona otros servicios de los ecosistemas.

Las estimaciones actuales sobre las repercusiones económicas se limitan a los servicios comercializados de los ecosistemas, tales como la pesca y el turismo. Su evaluación completa deberá tener en cuenta no solo los servicios directamente ligados a los mercados, sino también los servicios culturales y de regulación, como la

M **Cabe esperar consecuencias socioeconómicas negativas de la degradación de los arrecifes de coral** [Nivel de confianza medio]**, pero hoy por hoy resulta incierto el volumen de tales costos**

Es probable que se produzcan pérdidas económicas considerables como consecuencia del retroceso de los arrecifes coralinos en los trópicos, a causa de la acidificación del océano (en 2100, la escasez de corales provocará pérdidas anuales por valor de más de 1 billón de dólares, a niveles de precios de 2010, según una estimación)[24] [Nivel de confianza bajo]. Una gran parte de estas pérdidas tendrán lugar en comunidades vulnerables y en pequeños Estados insulares cuyas economías dependen de los arrecifes de coral. La degradación de estos arrecifes afectará de manera negativa al turismo, a la seguridad alimentaria, y a la protección y la biodiversidad de las costas. La acidificación del océano no es, sin embargo, el único factor de estrés. Los arrecifes ya soportan la presión de unas temperaturas más elevadas (que provocan su decoloración), la destrucción del hábitat, la pesca excesiva, la sedimentación y la contaminación.

Las actividades que frenan el ritmo de acidificación del océano reducirán sus repercusiones y favorecerán la capacidad de recuperación de los arrecifes de coral, e incluso su capacidad de adaptación, frente a otros factores de estrés. Por consiguiente, los factores humanos adicionales, como las prácticas pesqueras destructivas, la contaminación y la sedimentación, no solo tendrán efectos ecológicos inmediatos, sino que reducirán la capacidad de adaptación de los arrecifes a unas condiciones de temperatura más elevada y mayor acidez.

Además de las políticas específicas sobre cambio climático, las estrategias de gestión de los arrecifes locales –aplicadas a través de instrumentos como las zonas marinas protegidas, la gestión de la pesca y la planificación espacial marina– también aumentan la capacidad de los arrecifes de coral de hacer frente a la acidificación del agua[4,25].

L **Las repercusiones de la acidificación oceánica en los ecosistemas puede afectar a los depredadores principales y a la pesca** [Nivel de confianza bajo]

No se conoce con certeza en qué medida los cambios en la abundancia y la distribución del fitoplancton y del zooplancton se propagarán en los ecosistemas marinos y afectarán a los peces y a las zonas de pesca, de las que dependen muchas sociedades. Tampoco se sabe gran cosa acerca de los efectos directos de la acidificación oceánica sobre los peces, que son el objeto de la pesca de subsistencia y la pesca comercial, lo cual se traduce en una gran incertidumbre para predecir los cambios que experimentará la pesca en el futuro. Sin embargo, este ámbito es esencial para la investigación, ya que la pesca contribuye a la subsistencia de unos 540 millones de personas, es decir, el 8% de la población mundial[26].

protección de las costas, y un amplio conjunto de servicios de provisión, como los productos farmacéuticos de origen marino.

Las sociedades muy vulnerables a la acidificación del océano se encuentran, en gran medida, en países en desarrollo o en pequeños Estados insulares[27]. Sus habitantes dependen del pescado y de otros recursos marinos como fuente principal de proteínas. Además, los pueblos de las culturas indígenas del Ártico, donde el océano se acidifica más deprisa que en el resto, también dependen de los recursos naturales y, por tanto, estas sociedades son potencialmente vulnerables.

Umbrales

¿Pueden definir los científicos un nivel de acidificación "seguro" o "tolerable" que no deba superarse?

Algunas autoridades políticas preguntan a los científicos si es posible empezar a definir umbrales a partir de los cuales los ecosistemas ya no se recuperarán. Se trata de un asunto complejo. Los efectos conjuntos de las modificaciones de la física, la química y la biología de los océanos varían de un ecosistema a otro. Los efectos también varían con la localización geográfica y las características variables locales.

Las repercusiones en un ecosistema dependen de decisiones sobre las políticas adoptadas en un momento dado en relación con las emisiones futuras de dióxido de carbono y de políticas sobre otras cuestiones relacionadas con el medio marino. Sin embargo, existen complejas consideraciones éticas y económicas que también entran en juego al hablar de niveles "seguros" o "tolerables" de acidificación del océano.

La ciencia no puede dar respuesta a estos problemas, pero puede proporcionar alguna información acerca de las posibles consecuencias de las opciones políticas. Es necesario que los científicos, los responsables de políticas y las partes interesadas dialoguen para explorar qué preguntas requieren respuestas y qué opciones se presentan.

Un primer paso en la determinación de umbrales e indicadores consistiría en un esfuerzo investigador concertado a escala mundial. Gracias a él podrían combinarse experimentos, modelos y observaciones, con el objetivo de desentrañar la complejidad de la respuesta de los ecosistemas marinos a la acidificación del océano y otros factores de estrés, bajo la dirección del recién creado Centro Internacional de Coordinación.

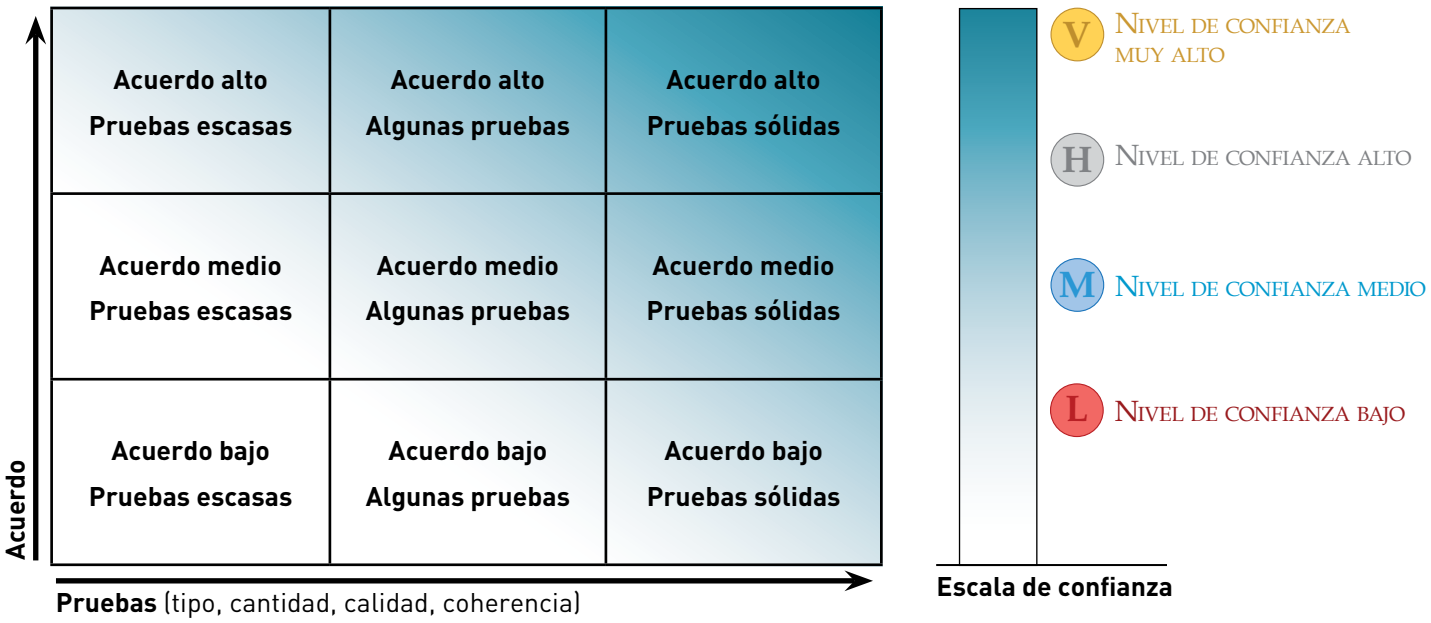
© iStockphoto.com

Bases científicas

La investigación en acidificación del océano es relativamente nueva. El número de científicos que se ocupan del tema y el de publicaciones al respecto crecen rápidamente. Con frecuencia se producen nuevos descubrimientos y nuestros conocimientos se van perfeccionando continuamente.

Definición de los niveles de confianza

En este documento, a los niveles de confianza se les asigna los calificativos "bajo", "medio", "alto" y "muy alto". Con ellos se pretende sintetizar los juicios de los autores sobre la validez de los resultados, mediante la evaluación y el acuerdo de las pruebas. El análisis se basa en las declaraciones de confianza derivadas de diversas síntesis, todas ellas revisadas por especialistas, como el libro de síntesis del Proyecto Europeo sobre Acidificación Oceánica[28] y el Quinto Informe de Evaluación del IPCC. El más reciente metaanálisis de 228 estudios sobre acidificación oceánica y organismos marinos[29] y de 167 sobre animales marinos[14] aportó nuevas indicaciones que permitieron a los autores analizar y resumir los resultados de las pruebas experimentales. La mayor solidez de las pruebas y el aumento del grado de acuerdo están correlacionados con un nivel más alto de confianza (véase la figura), como se indica en la nota orientativa sobre el tratamiento de la incertidumbre[30] en el Quinto Informe de Evaluación.



Aumenta rápidamente la acidificación del océano, a un ritmo sin precedentes en la historia de la Tierra

Se conoce bien la química de la acidificación del océano y los científicos cuentan con modelos muy ajustados que pueden predecir los cambios en las propiedades químicas de la superficie oceánica a medida que aumenta el CO_2 atmosférico. Cuando el CO_2 gaseoso se disuelve en el agua de mar, se forma ácido carbónico y se modifica la composición del agua: es la acidificación del océano.

V La acidificación del océano está provocada por las emisiones de CO_2 derivadas de las actividades humanas y liberadas a la atmósfera, que finalmente acaban en el océano [Nivel de confianza muy alto]

En la actualidad, los océanos absorben aproximadamente una cuarta parte del CO_2 que arrojan a la atmósfera las actividades humanas cada año[18], gracias a lo cual disminuyen considerablemente las repercusiones de este gas de efecto invernadero en el clima.

V La acidificación antropogénica del océano está en marcha y se puede medir [Nivel de confianza muy alto]

Las emisiones antropogénicas de CO_2 provocan cambios observables hoy en las características químicas del océano y previsibles con certeza a escala mundial en el futuro.

La acidez de las aguas superficiales oceánicas ha crecido un 26% desde el inicio de la revolución industrial[1]. Al aumentar la cantidad de CO_2 disuelto, a los organismos con conchas calcificadas les resulta más difícil producirlas.

H La acidificación del océano aumenta más rápidamente de lo que lo ha hecho en millones de años [Nivel de confianza alto]

La acidificación actual inducida por los humanos es un acontecimiento único en la historia geológica de nuestro planeta debido a su intenso ritmo de cambio.

Al analizar la acidificación del océano en los últimos 300 millones de años, se observa que su ritmo de cambio actual no tiene precedentes[31]. El acontecimiento más parecido se produjo hace 55 millones de años y se relaciona con la extinción masiva de organismos calcáreos de aguas profundas, asociada a grandes cambios del ecosistema marino en superficie[31]. En esa época, aunque el ritmo de cambio del pH oceánico era intenso, posiblemente era unas diez veces inferior al actual[32].

V El legado de las emisiones históricas de combustibles fósiles en la acidificación del océano se dejará sentir durante siglos [Nivel de confianza muy alto]

El incremento del CO_2 atmosférico se produce demasiado deprisa como para que pueda ser contrarrestado por efectos naturales como la disolución de los carbonatos en aguas profundas, que actúa a escala del orden de miles de años, o el desgaste de las rocas terrestres carbonatadas y silicatadas, para las que la escala es del orden de decenas a centenares de miles de años.

Las proyecciones a nivel mundial de los cambios en las características químicas del agua de mar pueden efectuarse con bastante exactitud, a partir de escenarios de los niveles atmosféricos de CO_2. Incluso en el caso de que las misiones antropogénicas de CO_2 cesasen hoy mismo, el pH del océano tardaría varios siglos en recuperar su valor de la época preindustrial[33].

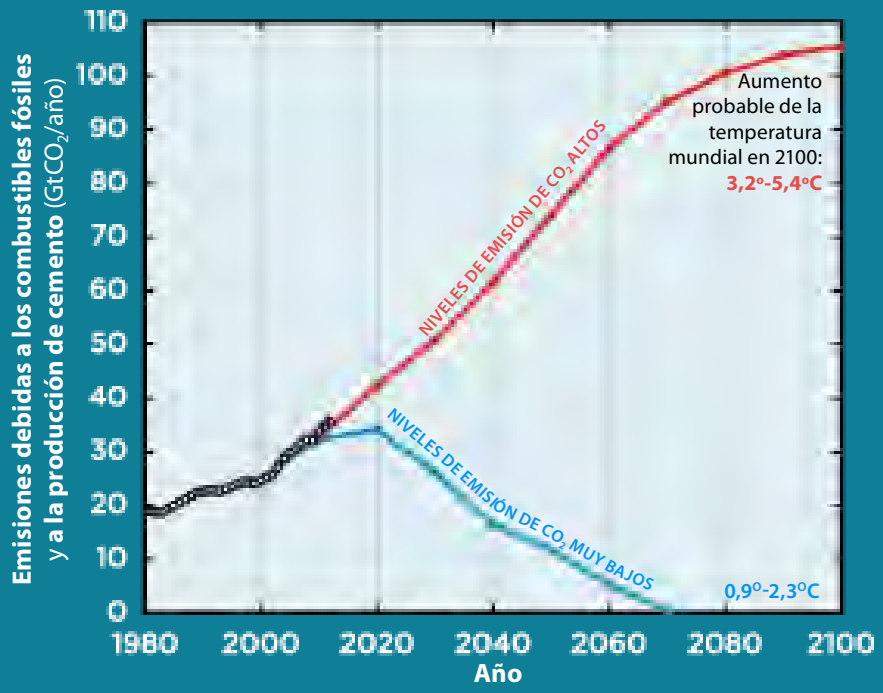
V La reducción de las emisiones de CO_2 frenará el avance de la acidificación del océano [Nivel de confianza muy alto]

La concentración de CO_2 en la atmósfera es aproximadamente de 395 partes por millón (ppm; media mundial del año 2013), un valor más del 40% por encima del nivel de la época preindustrial, 280 ppm. La mitad de este incremento se ha producido en los últimos 33 años[34]. Si se redujesen las emisiones de CO_2, el océano absorbería una menor cantidad y quedaría limitada la intensidad de la acidificación de este[33].

Con la tecnología de que ya disponemos y la que se está poniendo a punto, es posible reducir las emisiones de CO_2. Hoy existen acuerdos para estabilizar las emisiones de CO_2 y limitar así el aumento de la temperatura media mundial a 2°C por encima del nivel de la época preindustrial. Aun así, estos niveles pueden poner en peligro la estabilidad de algunos ecosistemas marinos. Las emisiones actuales están siguiendo una trayectoria que implica un crecimiento mucho mayor de la temperatura mundial (véase el recuadro).

Emisiones de CO_2 en el futuro: Trayectorias representativas de concentración

Las trayectorias representativas de concentración (RCP) son las trayectorias futuras de las emisiones, que se utilizan en el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)[1]. Muchos escenarios pueden llevar a una determinada trayectoria. La RCP máxima (forzamiento radiativo de 8,5 Wm-2) representa niveles de emisión altos, si todo se mantiene igual. El resultado para 2100 es un calentamiento global medio de 4,3°C (intervalo más probable: 3,2°C–5,4°C) por encima de las temperaturas preindustriales. La RCP mínima (forzamiento radiativo de 2,6 Wm-2) requiere un gran esfuerzo de mitigación y reducciones considerables de las emisiones, que den lugar a un aumento global medio de la temperatura de 1,6°C (intervalo más probable: 0,9°C–2,3°C) por encima de los niveles preindustriales.



Consecuencias marinas en el planeta

En 2100, si todo se mantiene igual (RCP 8,5), las emisiones se traducirán en una acidificación de océano que dará lugar a la pérdida del 100% de las aguas superficiales que estén en condiciones compatibles con el crecimiento de los arrecifes de coral. Con reducciones significativas (RCP 2,6), las pérdidas serían menos de la mitad (comunicación personal, Joos y Steinacher[10,11]).

En 2100, el 60% de las aguas superficiales del Océano Austral, en media anual, podrán ser corrosivas para los organismos con conchas de aragonito que forman parte de la red alimentaria marina, si las emisiones siguen la trayectoria actual (RCP 8,5). Con un esfuerzo significativo de mitigación (RCP 2,6) se podrían evitar las condiciones corrosivas de la mayor parte del Océano Austral (comunicación personal, Joos y Steinacher[10]).

Las emisiones mundiales de CO_2 (puntos blancos, incertidumbre en gris) debidas a los combustibles fósiles siguen la trayectoria de los niveles de emisión altos (línea roja, RCP 8,5) según la cual el planeta se calentará considerablemente. Se requieren disminuciones notables y sostenidas (línea azul, RCP 2,6) para que aumente la probabilidad de que se mantenga el objetivo de 2°C acordado internacionalmente.

Fuente: Glen Peters y Robbie Andrew (CICERO) y Global Carbon Project, adaptado de Peters et al. 20138. Datos históricos proporcionados por el Carbon Dioxide Information Analysis Center.

¿Cómo responderán los organismos marinos?

Casi todos los conocimientos acumulados sobre la respuesta de los organismos a la acidificación del océano se han obtenido en experimentos de laboratorio a plazos relativamente cortos, utilizando una única especie. Estos experimentos reproducen versiones simplificadas del medio natural, pero dan pistas sobre las posibles respuestas en el medio oceánico[28].

En los cada vez más numerosos experimentos realizados en el laboratorio y en el campo se estudian al mismo tiempo diversos organismos, por ejemplo con gradientes de pH en ecosistemas acidificados de forma natural y en mesocosmos con comunidades naturales que contienen numerosas especies.

Los resultados obtenidos a partir de una gran variedad de especies muestran la existencia de diversas respuestas, entre las que se destacan la disminución de la supervivencia, la calcificación, el crecimiento, el desarrollo y la abundancia. Se produce también una considerable variación de la sensibilidad y la tolerancia de los organismos marinos ante la acidificación, a veces incluso dentro de una misma especie. Otros organismos presentan respuestas positivas a los aumentos de CO_2. Los organismos más activos, como los crustáceos móviles y los peces, parecen ser menos sensibles a la acidificación de las aguas. Las algas carnosas, ciertos organismos del fitoplancton y algunas plantas marinas pueden beneficiarse de una mayor disponibilidad de carbono. Los efectos en las especies individuales, independientemente de que para ellos la acidificación implique retrocesos o avances, pueden originar perturbaciones en cascada en otras partes de la red alimentaria.

M **La acidificación antropogénica del océano afectará negativamente a los organismos calcáreos** [Nivel de confianza medio]

La mayoría de los estudios demuestran que la calcificación, es decir, la capacidad de algunos organismos de producir caparazones o esqueletos, disminuye con la acidificación del océano[29]. Entre ellos se cuentan los planctónicos (como los foraminíferos, los cocolitóforos y los pterópodos), los corales y moluscos, así como los equinodermos (por ejemplo, los erizos de mar) y, en menor medida, los crustáceos (por ejemplo, los cangrejos).

Los estudios sobre acidificación oceánica indican que en muchos organismos calcáreos también disminuyen las cifras de supervivencia, crecimiento, desarrollo y abundancia[29]. En muchos grupos de dichos organismos, las primeras fases de la vida son las más sensibles a los cambios inducidos por el CO_2 en las características químicas del agua de mar. Los crustáceos quedan menos afectados que los corales, los moluscos y los equinodermos[14].

H **Los moluscos (como los mejillones, las ostras y los pterópodos) constituyen uno de los grupos más sensibles a la acidificación** [Nivel de confianza alto]

En las primeras fases de sus vidas, muchos moluscos (larvas e inmaduros), así como los adultos, presentan niveles bajos de calcificación, crecimiento y supervivencia, lo que les convierte en uno de los grupos más sensibles a la acidificación del océano[14].

M **Las conchas de los pterópodos ya se están disolviendo** [Nivel de confianza medio]

Los océanos de latitudes elevadas ya empiezan a ser corrosivos para algunas especies. Las conchas de los pterópodos, pequeños caracoles marinos esenciales en la red alimentaria, empiezan a disolverse en ciertas partes del Océano Austral, alrededor de la Antártida[35]. Son especialmente importantes en la red alimentaria de las regiones polares, pues son, por ejemplo, una fuente decisiva de alimento para el salmón rosado[36].

H **Si las emisiones de CO_2 siguen la trayectoria actual, es probable que la erosión de los arrecifes coralinos le gane la partida a la formación de arrecifes en algún momento de este siglo** [Nivel de confianza alto]

Es probable que, por sí sola, la acidificación del océano haga que a finales del siglo XXI se detenga la formación de arrecifes, si se sigue la trayectoria actual de emisiones de dióxido de carbono[37]. Si además se tienen en cuenta la decoloración debida al calentamiento de las aguas, entonces el ritmo de erosión de la mayoría de los arrecifes podría superar el ritmo de formación global de arrecifes por los corales y otros organismos, cuando los niveles de CO_2 se sitúen en 560 ppm (a mediados de este siglo, en la hipótesis de la trayectoria actual de emisiones)[38]. De ser así, la degradación y pérdida de arrecifes coralinos afectará a ecosistemas completos dependientes de los arrecifes que constituyen su hábitat, y tendrá consecuencias para la biodiversidad, la pesca y la protección de las costas. Se necesitan reducciones muy drásticas de las emisiones de CO_2 para mantener los arrecifes coralinos tropicales en condiciones favorables de crecimiento[11].

H Las comunidades de corales de aguas frías están en peligro [Nivel de confianza alto], y pueden llegar a ser insostenibles

Se estima que para 2100 el 70% de los corales de aguas frías estarán expuestos a aguas corrosivas, aunque algunos lo estarán a aguas subsaturadas ya en 2020[39]. Las condiciones de subsaturación favorecerán el incremento de la tasa de disolución de los esqueletos muertos (la base de estas comunidades de corales de aguas frías), que dará lugar a la desintegración de los ecosistemas coralinos de aguas frías[40,41]. Su pérdida tendrá consecuencias para las redes tróficas[42], ya que proporcionan hábitat y espacios de reproducción, cría y alimentación para muchos organismos de aguas profundas.

La química del océano para la formación de conchas y esqueletos

En el océano, el CO_2 reacciona con el agua y los iones carbonato para formar ácido carbónico. Los niveles altos de CO_2 reducen la concentración de iones carbonato. Los caparazones de muchos organismos marinos están formados por carbonato cálcico, que se presenta en dos formas: calcita y aragonito. Ambos minerales se disuelven a bajas concentraciones de iones carbonato, también llamadas "condiciones de subsaturación", siempre y cuando los organismos calcáreos no hayan desarrollado mecanismos que prevengan la disolución, como capas protectoras u otros medios que aíslen sus estructuras calcáreas del agua corrosiva[43]. El aragonito, que se produce en los corales, en las fases larvarias de muchos moluscos y en algunos moluscos adultos (incluidos los pterópodos), es más soluble que la calcita, producida a su vez por los cocolitóforos, los foraminíferos, los equinodermos y los crustáceos.

La escala utilizada para describir el nivel de saturación de carbonato cálcico en el agua de mar es el "estado de saturación", Omega (Ω), donde $\Omega \leftarrow 1$ indica que las aguas están subsaturadas (aguas corrosivas) y $\Omega \rightarrow 1$ que las aguas están sobresaturadas.

En unas aguas en proceso de acidificación, el crecimiento de los esqueletos y los caparazones suele frenarse significativamente a medida que disminuye el estado de saturación. Por ejemplo, el crecimiento del coral queda favorecido cuando el estado de saturación del aragonito es mayor que 3 ($\Omega \nearrow 3$)[44].

Condiciones en aguas profundas

Las aguas profundas contienen de forma natural más CO_2 y tienen un pH menor comparado con el de las aguas superficiales. Además, la saturación de calcita y aragonito disminuye al aumentar la presión. La frontera entre las aguas más profundas y subsaturadas y las aguas menos profundas y saturadas se denomina "horizonte de saturación".

El horizonte de saturación del aragonito se sitúa cada vez a menor profundidad y, por tanto, las condiciones corrosivas para la formación de organismos con conchas se desplazan progresivamente hacia la superficie.

Es un proceso bien conocido y bien documentado a escala mundial. El horizonte de saturación alcanzará la superficie del océano hacia el final de este siglo en el Pacífico Norte, los mares del Ártico y el Océano Austral, en el escenario de RCP 8,5 (véase la p. 15).

En zonas de afloramiento como el noreste del Océano Pacífico y las costas occidentales de América del Sur y África, las aguas profundas y más ácidas ascienden de forma natural hasta las plataformas continentales. La absorción de CO_2 antropogénico por parte del océano ha incrementado la extensión de las zonas afectadas por aguas más ácidas[45], en las que se incluyen importantes zonas pesqueras.

Christina Kellogg, USGS

Jason Hall-Spencer

M La acidificación del océano puede tener efectos directos sobre la fisiología, el comportamiento y las condiciones físicas de los peces [Nivel de confianza medio]

La acumulación de CO_2 en los cuerpos de los animales puede perturbar sus procesos vitales, y dar lugar a cambios globales de su fisiología y condiciones físicas[46,47]. En general, los peces parecen ser menos sensibles a la acidificación del océano que los organismos de menor movilidad. La acidificación ha provocado un descenso de las tasas de crecimiento de larvas de peces[48].

Existen pruebas de que los peces payaso (que viven en los arrecifes de coral) están modificando su comportamiento (olfato, vista, riesgo visual, etc.), al tiempo que disminuye su capacidad de detectar depredadores y presas[49]. No está claro cuáles serán los efectos a largo plazo, ya que los registros geológicos no dan indicaciones sobre la sensibilidad de los peces ante la acidificación oceánica, a diferencia de los que sucede con otros organismos.

Globalmente, es probable que los cambios en las capturas de pescado para el consumo alimentario tengan efectos más significativos sobre su abundancia que los cambios fisiológicos directos.

H Algunas especies de plantas marinas y de fitoplancton pueden beneficiarse de la acidificación del océano [Nivel de confianza alto]

Los niveles de CO_2 elevados parecen estimular la fotosíntesis y el crecimiento de algunos grupos de organismos. Entre estos destacan las plantas marinas, las algas carnosas y ciertos grupos de fitoplancton (por ejemplo, cianobacterias y picoeucariotas)[50]. Las observaciones realizadas en zonas marinas con aireación natural y altos niveles de CO_2 (por ejemplo, en la isla italiana de Ischia) muestran que las plantas marinas prosperan en aguas ácidas[51].

H La combinación de acidificación e incremento de temperaturas afecta negativamente a muchos organismos [Nivel de confianza alto]

La acidificación del océano parece reducir la tolerancia térmica de algunos organismos[56], mientras que otros resultan más vulnerables a la acidificación en aguas más calientes. La respuesta a ambos cambios al mismo tiempo es mayor que la respuesta a estos cambios por separado[52]. Los estudios muestran una tendencia a la supervivencia, el crecimiento y el desarrollo menor cuando se producen al mismo tiempo la acidificación de las aguas y unas temperaturas más elevadas. La combinación de acidificación y calentamiento puede traducirse en cambios en la diversidad de las especies y la composición del ecosistema, a causa de la reducción del hábitat.

Los corales de aguas calientes también son susceptibles de decolorarse durante períodos de calor intenso. Desde 1979 se han observado diversos episodios de decoloración en masa de corales, que han provocado la mortalidad de los corales de aguas calientes en todo el mundo[53]. Los arrecifes coralinos tropicales se encuentran especialmente amenazados por los efectos combinados del calentamiento y la acidificación.

¿Cómo responderán los ecosistemas marinos?

H Las múltiples respuestas de las especies a la acidificación del océano y otros factores de estrés probablemente generarán cambios en los ecosistemas marinos [Nivel de confianza alto]**, pero es difícil predecir el alcance de las repercusiones**

Sabemos que algunos organismos, como las plantas marinas y algunas especies de fitoplancton, parecen proliferar en situaciones de acidez elevada, mientras que otros, como los corales y los mariscos, resultan dañados. Cuando estas sensibilidades se combinan con otros factores de estrés relacionados, como el calentamiento global, pueden dar lugar a cambios en la composición de las especies y, por tanto, a modificaciones de las fuentes de alimentación de los depredadores. Existen muchas dudas sobre nuestra capacidad de predecir estos cambios y sus consecuencias, pero en la comunidad científica existe un consenso generalizado acerca de que muy probablemente los cambios serán considerables[54].

Los problemas a los que hay que dar respuesta son los siguientes: ¿Cómo serán sustituidas las especies que desaparezcan? ¿Seguirán teniendo la misma función en el ecosistema las especies que sustituyan a las anteriores? ¿Cuáles serán las consecuencias para los ecosistemas? ¿En qué forma afectará esta nueva situación a los ciclos biogeoquímicos de los que depende la vida? ¿Serán capaces algunas especies de adaptarse a tiempo? (Véase el recuadro a continuación.) ¿Se producirán efectos que pasarán de una generación a otra?

A pesar de los rápidos avances en la investigación en torno a la acidificación del océano, seguimos sin ser capaces de hacer proyecciones fiables sobre los ecosistemas marinos y la pesca. Por consiguiente, una prioridad de la investigación sigue siendo saber cómo responderán los ecosistemas completos a la acidificación del océano. Los trabajos de laboratorio y los estudios sobre organismos individuales no pueden simplemente extrapolarse a todo el ecosistema. Sin embargo, los científicos disponen de suficientes pruebas como para sacar algunas conclusiones preliminares con diversos niveles de confianza.

Adaptación

La aclimatación es la capacidad de un organismo individual de ajustarse a los cambios ambientales. La aclimatación puede darse a diversas escalas temporales en la vida del organismo. Las respuestas, que normalmente son reversibles, permiten hacer frente a una serie de situaciones ambientales.

La adaptación es la respuesta evolutiva de una población a lo largo de múltiples generaciones, ante un entorno que ha cambiado. La capacidad de adaptación evolutiva es máxima en las especies con tiempos de reproducción cortos y poblaciones de gran tamaño.

Existen pruebas experimentales de adaptación evolutiva a la acidificación del océano en microorganismos de vida corta, incluidas las microalgas calcáreas (cocolitóforos)[55]. Los miembros de este grupo presentan una gran diversidad genética, sus tiempos de reproducción son cortos, de un día o menos, y el tamaño de sus poblaciones es enorme, hasta un millón de células por litro de agua de mar. En cambio, los organismos con tiempos de reproducción más dilatados, como los corales, tendrán que luchar para adaptarse a la magnitud y a las tasas de acidificación que se darán a lo largo de este siglo.

Los estudios experimentales a corto plazo sobre la respuesta de las especies a los cambios ambientales normalmente no explican los procesos de adaptación. Por tanto, las respuestas detectadas pueden sobrestimar la sensibilidad a largo plazo de las poblaciones ante dichos cambios. Sin embargo, las extinciones en masa que se han producido a lo largo de la historia del planeta, cuando el ritmo de cambio de los océanos era mucho menor que en la actualidad, sugieren que los ritmos evolutivos de algunas especies pueden no ser lo suficientemente altos como para adaptarse a los múltiples cambios ambientales previstos en el futuro en los océanos [Nivel de confianza alto].

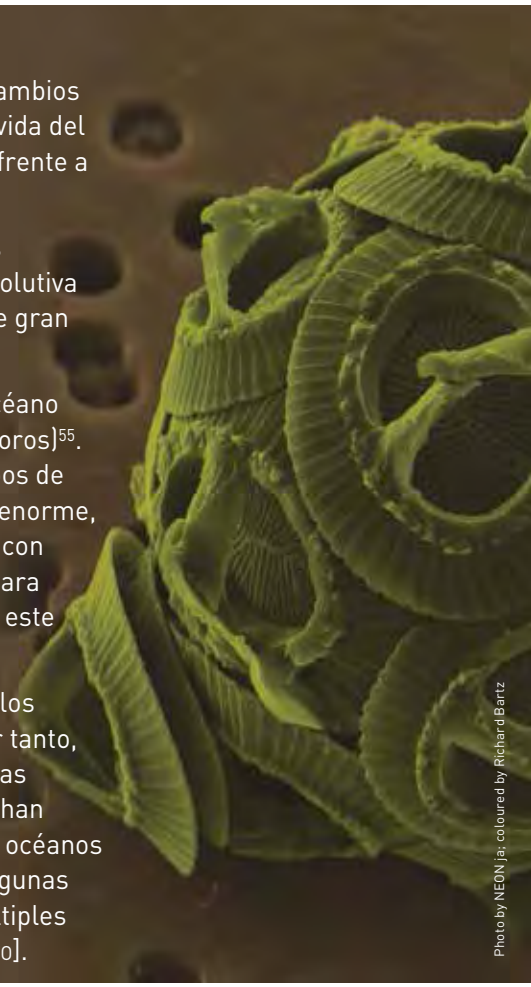
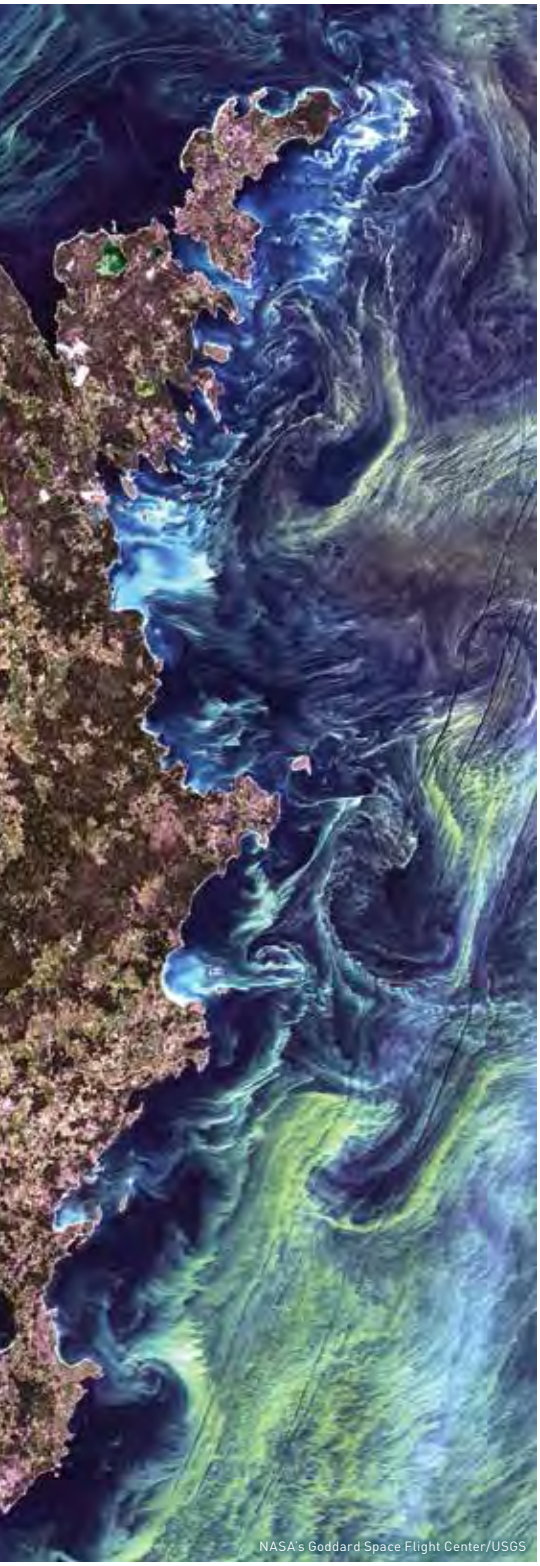


Photo by NEON (a; coloured by Richard Bartz



H Múltiples factores de estrés agravan los efectos de la acidificación del océano [Nivel de confianza alto]

Los problemas derivados de la acidificación oceánica a los que han de hacer frente los organismos suelen ser agravados por otros factores de estrés, como la elevación de la temperatura[56], la pérdida de oxígeno (desoxigenación), la estratificación oceánica[9,57], la sobreexplotación, la contaminación, las situaciones extremas, el aumento de la radiación UV-B (a causa del agotamiento del ozono estratosférico)[58] y los cambios en la salinidad. Algunos de estos factores de estrés también están provocados por el exceso de CO_2 en la atmósfera.

A nivel mundial, el aumento de la estratificación provoca una disminución de la productividad a latitudes bajas, cerca del ecuador, donde los nutrientes existen en cantidades limitadas. Además, a medida que se eleva la temperatura, gran parte de los océanos a latitudes bajas se vuelven vulnerables a la desoxigenación. El efecto conjunto de la acidificación del océano y la desoxigenación podría dar lugar a consecuencias de largo alcance en sus características biogeoquímicas, como la creación de grandes "zonas muertas" y un aumento de la desnitrificación marina y de la oxidación anaeróbica de los iones amonio, quedando así afectado el ciclo marino del nitrógeno[9,57]. Los cambios que se producen en aguas profundas como resultado de la acidificación han sido objeto de muy pocos estudios.

L La acidificación del océano alterará los ciclos biogeoquímicos a escala planetaria [Nivel de confianza bajo]

Los cambios en la composición de los ecosistemas y la química de los carbonatos afectan a los ciclos de forma muy compleja. Algunos organismos proliferarán en aguas más ácidas y otros tendrán que luchar para sobrevivir. Los cambios en el fitoplancton y el zooplancton afectarán a su vez a los depredadores cuya alimentación depende de estos organismos. La acidificación también puede afectar a la producción de óxido nitroso, un potente gas de efecto invernadero, y de sulfuro de dimetilo, un gas que reduce la temperatura del medio ambiente. Es necesario conocer mejor las respuestas de los ecosistemas a los efectos de la acidificación del océano en lo relativo a los ciclos de algunos nutrientes esenciales, para poder mejorar la simulación de los modelos a nivel mundial y predecir los cambios biogeoquímicos[59].

M La fijación de nitrógeno en algunas cianobacterias puede verse potenciada por la acidificación del océano [Nivel de confianza medio]

Existen indicios de que la acidificación del océano potencia la fijación de nitrógeno en algunas cianobacterias[54]. En este proceso el nitrógeno gaseoso adquiere una forma adecuada para estos organismos y supone una importante aportación de nutrientes al océano. Este proceso podría tener consecuencias para el ciclo del nitrógeno y la productividad de los océanos, ya que grandes partes del océano tienen nitrógeno en cantidades reducidas.

Referencias

1 IPCC 2013. *Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del IPCC., Cambio Climático 2013: Resumen para responsables de políticas*, www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf

2 The Royal Society 2005. *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. The Royal Society, Londres.

3 Billé, R., Kelly, R., Biastoch, A., Harrould-Kolieb, E., Herr, D., Joos, F., Kroeker, K., Laffoley, D., Oschlies, A., Gattuso, J.-P. 2013. Taking action against ocean acidification: a review of management and policy options. *Environmental Management*, 52:761–779, doi:10.1007/s00267-013-0132-7.

4 Pandolfi, J.M., Connolly, S.R., Marshall, D.J., Cohen, A.L. 2011. Projecting coral reef futures under global warming and ocean acidification. *Science*, 333(6041):418–422, doi:10.1126/science.1204794.

5 Rau, G.H., McLeod, E.L., Hoegh-Guldberg, O. 2012. The need for new ocean conservation strategies in a high-carbon dioxide world. *Nature Climate Change*, 2:720–724, doi:10.1038/nclimate1555.

6 US National Research Council. 2001. *Marine Protected Areas: Tools for Sustaining Ocean Ecosystem*. The National Academies Press, Washington, D.C.

7 Hassellöv, I.-M., Turner, D.R., Lauer, A., Corbett, J.J. 2013. Shipping contributes to ocean acidification. *Geophysical Research Letters*, 40:2731–2736, doi:10.1002/grl.50521.

8 Peters, G.P., Andrew, R.M., Boden, T., Canadell, J.G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M.R., Wilson, C. 2013. The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nature Climate Change*, 3:4–6, doi:10.1038/nclimate1783.

9 Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J.C., Doney, S.C., Dunne, J.P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Seferian, R., Tjiputra, J., Vichi, M. 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, 10:6225–6245.

10 Steinacher, M., Joos, F., Stocker, T.F. 2013. Allowable carbon emissions lowered by multiple climate targets. *Nature*, 499(7457):197–201, doi:10.1038/nature12269.

11 Ricke, K.L., Orr, J.C., Schneider, K., Caldeira, K. 2013. Risks to coral reefs from ocean carbonate chemistry changes in recent earth system model projections. *Environmental Research Letters*, 8:034003, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034003.

12 www.pmel.noaa.gov/co2/story/International+OA+Observing+Network

13 Turley, C., Boot, K. 2011. The ocean acidification challenges facing science and society. En Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.

14 Wittmann, A.C., Pörtner, H.-O. 2013. Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change* doi:10.1038/nclimate1982.

15 FAO 2012. *Fisheries and Aquaculture Statistics 2010*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.

16 Cesar, H.J.S., Burke, L., Pet-Soede, L. 2003. *The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*. Cesar Environmental Economics Consulting, Arnhem, and WWF-Netherlands, Zeist, The Netherlands. 23 pp. Accesible en: http:// assets.panda. org/downloads/cesardegradationreport100203.pdf.

17 Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neil, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387:253–260.

18 Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R.A., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geoscience*, 2:831–836, doi:10.1038/ ngeo689.

19 Sabine, C.L., Feely, R.A., Gruber, N., Key, R.M., Lee, K., Bullister, J.L., Wanninkhof, R., Wong, C.S., Wallace, D.W.R., Tilbrook, B., Millero, F.J., Peng, T.-H., Kozyr, A., Ono, T., Rios, A.F. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO_2. *Science*, 305(5682):367–371, doi:10.1126/science.1097403.

20 Narita, D., Rehdanz, R., Tol, R.S.J. 2012. Economic costs of ocean acidification: a look into the impacts on global shellfish production. *Climatic Change*, 113:1049–1063, doi: 10.1007/s10584-011-0383-3.

21 Cooley, S.R., Doney, S.C. 2009. Anticipating ocean acidification's economic consequences for comercial fisheries. *Environmental Resource Letters*, 4:024007, doi:10.1088/1748-9326/4/2/024007.

22 Barton, A., Hales, B., Waldbusser, G.G., Langdon, C., Feely, R.A. 2012. The Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. *Limnology and Oceanography*, 57(3):698–710, doi:10.4319/lo.2012.57.3.0698.

23 Waldbusser, G.G., Brunner, E.L., Haley, B.A., Hales, B., Langdon, C.J., Prahl, F.G. 2013. A developmental and energetic basis linking larval oyster shell formation to acidification sensitivity. *Geophysical Research Letters*, 40:2171–2176, doi:10.1002/grl.50449.

24 Brander, L.M., Rehdanz, K., Tol, R.S.J., Van Beukering, P.J.H. 2012. The economic impact of ocean acidification on coral reefs. *Climate Change Economics*, 3(1):1250002, doi:10.1142/ S2010007812500029.

25 Ateweberhan, M., Feary, D.A., Keshavmurthy, S., Chen, A., Schleyer, M.H., Sheppard, C.R. 2013. Climate change impacts on coral reefs: Synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *Marine Pollution Bulletin*, 74:526–539, doi:10.1016/j.marpolbul.2013.06.011.

26 FAO 2010. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*, 2010. Departamento de Pesca y Aciuicultura de la FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.

27 Cooley, S.R., Lucey, N., Kite-Powell, H., Doney, S.C. 2012. Nutrition and income from molluscs today imply vulnerability to ocean acidification tomorrow. *Fish and Fisheries*, 13:182–215, doi:10.1111/j.1467-2979.2011.00424.x.

28 Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.) 2011. *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.

29 Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.-P. 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*, 19:1884–1896, doi: 10.1111/gcb.12179.

30 Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W. 2010. *Nota orientativa para autores principales del Quinto Informe de Evaluación del IPCC sobre tratamiento coherente de la incertidumbre*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Disponible en www.ipcc.ch.

31 Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D.N., Thomas, E., Gibbs, S.J., Sluijs, A., Zeebe, R., Martindale, R.C., Greene, S.E., Kiessling, W., Ries, J., Zachos, J.C., Royer, D.L., Barker, S., Marchitto Jr., T.M., Moyer, R., Pelejero, C., Ziveri, P., Foster, G.L., Williams, B. 2012. The geological record of ocean acidification. *Science*, 335(6072):1058–1063, doi:10.1126/science.1208277.

32 Ridgwell, A., Schmidt, D.N. 2010. Past constraints on the vulnerability of marine calcifiers to massive carbon dioxide release. *Nature Geoscience*, 3:196–200, doi:10.1038/ngeo755.

33 Joos, F., Frölicher, T.L., Steinacher, M., Plattner, G.-K. 2011. Impact of climate change on ocean acidification projections. In Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.

34 Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. NOAA ESRL, Boulder, Colorado [Disponible en www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/] 2012.

35 Bednarsek, N., Tarling, G.A., Bakker, D.C.E., Fielding, S., Jones, E.M., Venables, H.J., Ward, P., Kuzirian, A., Leze, B., Feely, R.A., Murphy, E.J. 2012. Extensive dissolution of live pteropods in the Southern Ocean. *Nature Geoscience*, 5(12):881–885, doi:10.1038/ngeo1635.

36 Armstrong, J.L., Boldt, J.L., Cross, A.D., Moss, J.H., Davis, N.D., Myers, K.W., Walker, R.V., Beauchamp, D.A., Haldorson, L.J. 2005. Distribution, size, and interannual, seasonal and diel food habits of northern Gulf of Alaska juvenile pink salmon, *Oncorhynchus gorbuscha*. *Deep-Sea Research (Part II, Topical Studies in Oceanography)*, 52:247–265.

37 Fabricius, K.E., Langdon, C., Uthicke, S., Humphrey, C., Noonan, S., De'ath, G., Okazaki, R., Muehllehner, N., Glas, M.S., Lough, J.M. 2011. Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change*, 1(3):165–169, doi:10.1038/nclimate1122.

38 Silverman, J., Lazar, B., Cao, L., Caldeira, K., Erez, J. 2009. Coral reefs may start dissolving when atmospheric CO_2 doubles. *Geophysical Research Letters*, 36:L05606, doi:10.1029/2008GL036282.

39 Guinotte, J.M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George R. 2006. Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4:141–146.

40 Form, A., Riebesell, U. 2012. Acclimation to ocean acidification during long-term CO_2 exposure in the cold-water coral *Lophelia pertusa*. *Global Change Biology*, 18:843–853.

41 Lunden, J., Georgian, S.E., Cordes, E.E. 2013. Aragonite saturation states at coldwater coral reefs structured by *Lophelia pertusa* in the northern Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography*, 58(1):354–362.

42 Roberts, J.M., Wheeler, A.J., Freiwald, A. 2006. Reefs of the deep: The biology and geology of cold-water coral ecosystems. *Science*, 213:543–547.

43 McCulloch, M., Falter, J., Trotter, J., Montagna, P. 2012. Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up-regulation. *Nature Climate Change*, 2:623–627, doi:10.1038/nclimate1473.

44 Kleypas, J.A., McManus, J.W., Meñez, L.A.B. 1999. Environmental limits to coral reef development: where do we draw the line? *American Zoologist*, 39(1):146-159.

45 Feely, R.A., Sabine, C.L., Hernandez-Ayon, J.M., Ianson, D., Hales, B. 2008. Evidence for upwelling of corrosive "acidified" water onto the Continental Shelf. Science, 320(5882):1490–1492, doi:10.1126/science.1155676.

46 Fabry, V.J., Seibel, B.A., Feely, R.A., Orr, J.C. 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. ICES *Journal of Marine Science*, 65:414–432.

47 Pörtner, H.-O. 2012. Integrating climaterelate stressor effects on marine organisms: unifying principles linking molecule to ecosystem-level changes. *Marine Ecology Progress Series*, 470:273–290.

48 Baumann, H., Talmage, S.C., Gobler, C.J. 2012. Reduced early life growth and survival in a fish in direct response to increased carbon dioxide. *Nature Climate Change*, 2(1):38–41.

49 Munday, P.L., Dixsona, D.L., Donelson, J.M., Jones, G.P., Pratchett, M.S. Devitsina, G.V., Døving, K.B. 2009. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(6):1848–1852.

50 Riebesell, U., Tortell, P.D. 2011. Effects of ocean acidification on pelagic organisms and ecosystems. En Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, pp. 99–121.

51 Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S.J., Tedesco, D., Buia, M.-C. 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 454:96–99.

52 Harvey, B.P., Gwynn-Jones, D., Moore, P.J. 2013. Meta-analysis reveals complex marine biological responses to the interactive effects of ocean acidification and warming. *Ecology and Evolution*, 3:1016–1030.

53 Hoegh-Guldberg, O. 1999: Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and Freshwater Research*, 50:839–866.

54 Gattuso, J.-P., Bijma, J., Gehlen, M., Riebesell, U., Turley, C., 2011. Ocean acidification: knowns, unknowns and perspectives. En Gattuso, J.-P., Hansson, L. (eds.), *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.

55 Lohbeck, K.T., Riebesell, U., Reusch, T.B.H. 2012. Adaptive evolution of a key phytoplankton species to ocean acidification. *Nature Geoscience*, 5:346–351, doi:10.1038/NGEO1441.aa.

56 Pörtner, H.O., Farrell, A.P. 2008. Physiology and climate change. *Science*, 322:690–692.

57 Gruber, N. 2011. Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change. *Philosophical Transactions of the Royal Society* A, 369(1943):1980–1996, doi:10.1098/rsta.2011.0003.

58 Gao, K., Helbling, E.W., Häder, D.-P., Hutchins, D.A. 2012. Response of marine primary producers to interactions between ocean acidification, solar radiation and warming. *Marine Ecology Progress Series*, 470:167–189, doi:10.3354/ meps10043.

59 Riebesell, U., Gattuso, J.-P., Thingstad, T.F., Middelburg, J.J. 2013. Arctic ocean acidification: pelagic ecosystem and biogeochemical responses during a mesocosm study. *Biogeosciences*, 10:5619–5626.

The Ocean in a High-CO_2 World

Ocean Acidification

Third Symposium • Monterey • California • 24-27 September • 2012

Agradecemos sinceramente a las siguientes organizaciones su apoyo financiero y en especie al simposio.

- US National Science Foundation
- Fundación Príncipe Alberto II de Mónaco
- Monterey Bay Aquarium Research Institute
- Monterey Bay Aquarium
- Monterey Bay Sanctuary Foundation
- Naval Postgraduate School
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
- Comisión Mundial de Zonas Protegidas
- COMPASS
- UK Ocean Acidification Research Programme
- Gordon and Betty Moore Foundation
- US National Oceanic and Atmospheric Administration
- US National Marine Sanctuaries
- Blue Ocean Film Festival
- Google
- XPrize

Ulf Riebesell; GEOMAR

Patrocinadores del simposio

Comité Científico de Investigaciones Oceánicas

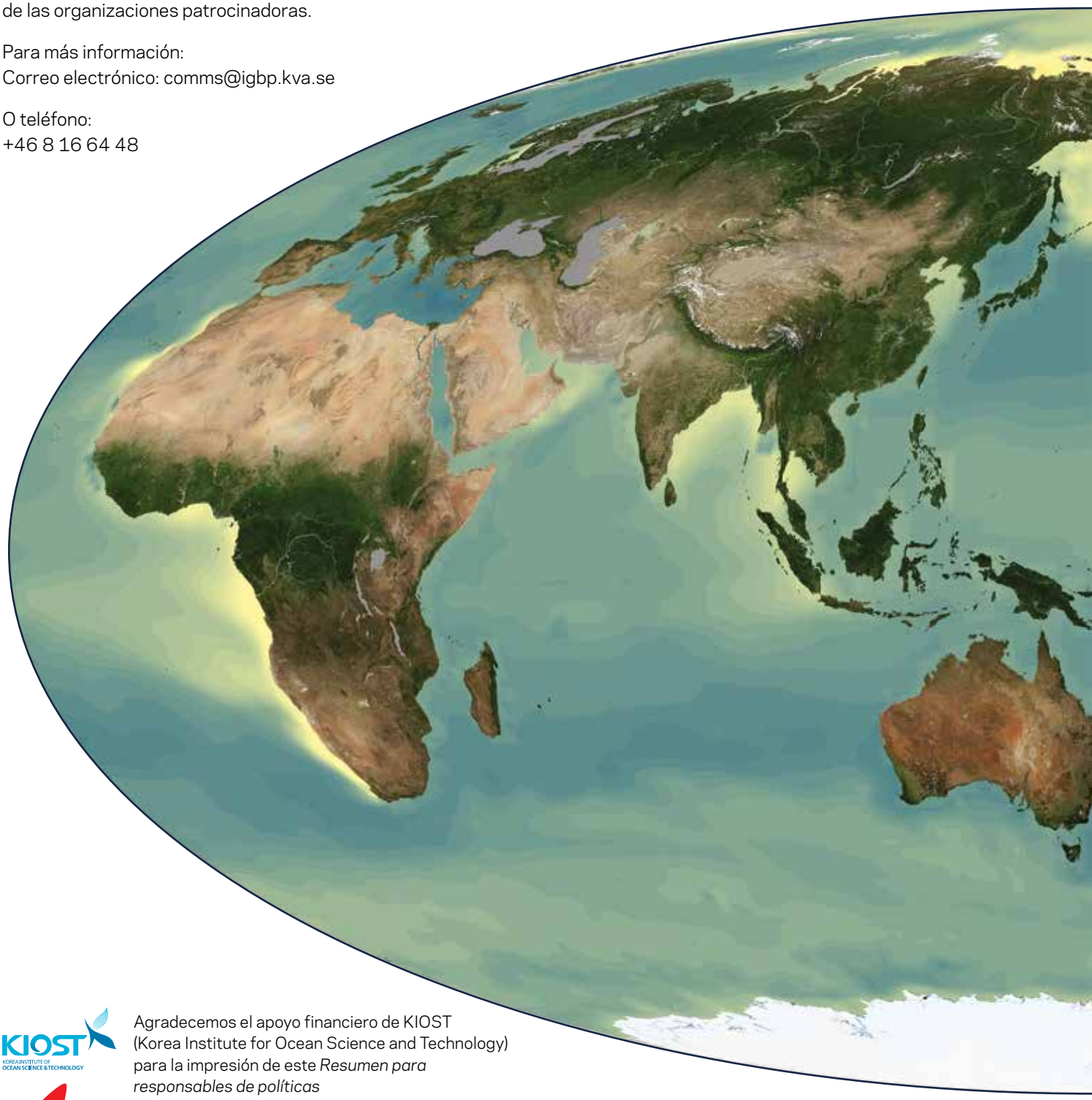
Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO

Programa Internacional para la Geosfera y la Biosfera

Esta versión ampliada del resumen para responsables de políticas está disponible en www.ocean-acidification.net y en los sitios web de las organizaciones patrocinadoras.

Para más información:
Correo electrónico: comms@igbp.kva.se

O teléfono:
+46 8 16 64 48



Agradecemos el apoyo financiero de KIOST (Korea Institute for Ocean Science and Technology) para la impresión de este *Resumen para responsables de políticas*

Este documento se elaboró con la ayuda financiera de la Fundación Príncipe Alberto II de Mónaco.
La responsabilidad exclusiva del contenido de este documento corresponde al IGBP, al SCOR y a la COI. En ninguna circunstancia se puede considerar que este documento refleja la posición de la Fundación Príncipe Alberto II de Mónaco.