



Foto: Dave Burdick

# ACIDIFICACIÓN:

## ¿CÓMO AFECTA EL CO<sub>2</sub> A LOS OCÉANOS?

Ellycia Harrould-Kolieb  
Jacqueline Savitz  
Segunda edición Junio 2009

# Agradecimientos

Los autores de este informe quieren mostrar su agradecimiento a: Dr. Michael Hirshfeld, Dra. Joanie Kleypas, Dr. Jeff Short, Dra. Rachel Jakuba, Andrew Collier, Monica Perez Watkins y Lynn Englum. También queremos agradecerle a The Scherman Foundation su apoyo al trabajo de Oceana en la reducción del impacto del cambio climático en los océanos. La edición en español de este informe ha sido posible gracias a la colaboración de Marta Madina, Carmen Calzadilla, Aitor Lascurain y Natividad Sánchez.

# ÍNDICE

2	Resumen
6	Introducción
	¿Qué es la acidificación del océano?
8	Química Oceánica
11	Efectos de la acidificación de los océanos
16	Efectos fisiológicos en la vida marina
17	Efectos en los ecosistemas
20	Efectos de la acidificación del océano en los seres humanos
22	Llegando al límite
24	Soluciones
25	Recomendaciones
26	Referencias

# RESUMEN



## Introducción

Combatir el cambio climático es el desafío medioambiental más importante de nuestra época. El medio ambiente no es el único que está en peligro. También nosotros sufriremos sus consecuencias. Pertenecemos al entorno que nos rodea y dependemos de él, desde el aire que respiramos y las condiciones climáticas en las que vivimos, hasta los alimentos que consumimos. Estamos perfectamente adaptados a la vida en este planeta. Sin embargo, nuestras actividades alteran el equilibrio de los gases en la atmósfera, los cuales ayudan a regular la temperatura y el clima. Las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el dióxido de carbono, están en continuo aumento, atrapando más calor en la atmósfera y provocando por tanto, un aumento de la temperatura de la superficie de la Tierra. ¿Resultado? Capas de hielo que se funden, nivel de mar en aumento, temperaturas medias más altas, migraciones de animales, aparición de nuevas enfermedades y sequías y tormentas más devastadoras. Estos cambios en el clima producirán a su vez cambios drásticos en el modo de vida de los humanos. Se espera que aparezcan más enfermedades y muertes relacionadas con el calor, y fuertes sequías que influirán tanto en la cantidad de alimentos como en su coste final. Es muy probable que el hambre se extienda en muchos países. La subida del nivel del mar inundará grandes zonas costeras. En los próximos siglos, algunas de las ciudades más grandes e importantes del mundo, como Nueva York, Bangkok y Londres, podrían inundarse e incluso quedar totalmente sumergidas. Países enteros, como Bangladesh, y la mayoría de las pequeñas islas, perderán gran parte de su territorio, provocando millones de desplazados.

*“Los océanos no sólo están aumentando de nivel y de temperatura, sino que también se vuelven más ácidos”*

Además de desestabilizar el clima, las emisiones de dióxido de carbono tienen un grave y fuerte impacto en los océanos. Los océanos absorben aproximadamente el 30% de las emisiones globales de dióxido de carbono y el 80% del calor generado por el creciente aumento de los gases efecto invernadero, atenuando de esta forma muchos de los impactos nocivos de la contaminación atmosférica<sup>1,2</sup>. Sin embargo, este proceso nos sale caro. Los océanos no sólo están aumentando de nivel y de temperatura, sino que también se vuelven más ácidos.

El aumento de la cantidad de dióxido de carbono en los océanos provoca reacciones que cambian la composición química de éstos, a través de un proceso conocido como acidificación. Esto pone en peligro a organismos marinos capaces de crear caparazones y esqueletos de carbonato cálcico como los corales, las almejas y los cangrejos. El exceso de dióxido de carbono en los océanos absorbe los elementos necesarios para que estos organismos puedan crear sus conchas y esqueletos. Por eso, les resulta cada vez más difícil fortalecer su estructura y construir una nueva. Si el proceso de acidificación del océano continúa, el propio medio donde viven se volverá tan corrosivo que, directamente, podría disolver sus conchas y esqueletos.

Aunque conocemos y entendemos los procesos químicos que hacen que los océanos sean cada vez más ácidos, nos queda mucho por conocer acerca de los numerosos efectos de la acidificación en la vida marina. Puede que un aumento de la acidez no elimine aquellos organismos que no sean capaces de crear estructuras calcáreas, pero su adaptabilidad y capacidad de supervivencia podría verse afectada. Su tasa de crecimiento podría disminuir, así como su capacidad reproductiva, las funciones de su sistema respiratorio y nervioso podrían alterarse y finalmente ser más susceptibles a los depredadores y las enfermedades, lo cual podría tener un efecto dominó en las cadenas alimenticias y en los propios ecosistemas. Por tanto, los procesos de acidificación podrían transformar de forma definitiva los océanos, mermando su diversidad y su productividad, por lo que la vida y el sustento de aquellos que dependen del mar podrían ser más inciertos.

Según el oceanógrafo de la Universidad de Stanford, Ken Caldeira, y sus compañeros:

*“Los efectos químicos del CO<sub>2</sub> en el medio ambiente marino podrían ser tan preocupantes como los efectos del CO<sub>2</sub> en la atmósfera terrestre”<sup>3</sup>*

“Cuanto más tardemos en actuar,  
más difícil será evitar la catástrofe”

## Llegando al límite

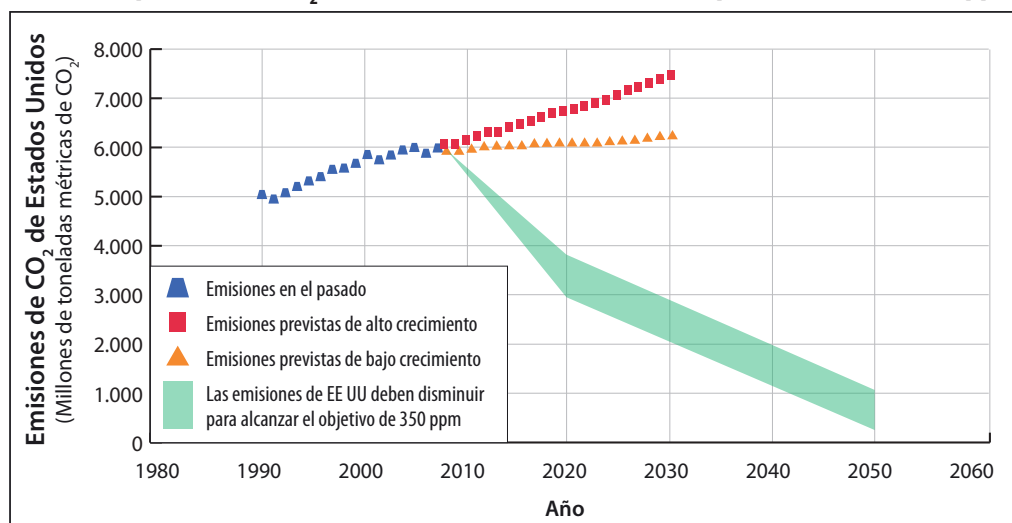
La actual concentración de dióxido de carbono en la atmósfera supera ya los límites de riesgo. Como resultado, se están produciendo importantes cambios en los océanos, desde una disminución en la tasa de crecimiento de la Gran Barrera de Coral hasta el blanqueamiento masivo de corales en los trópicos. Los arrecifes de coral son un importante hábitat para una cuarta parte de las especies marinas, y son vitales para la vida y el sustento de muchas personas. Si permitimos que los arrecifes de coral desaparezcan, se producirán importantes cambios en los océanos y en las vidas de cientos de millones de personas. Lo que les sucede a los arrecifes de coral es un anuncio de otros cambios catastróficos que se pueden producir en todo el mundo debido a la acidificación de los océanos y al cambio climático.

Para evitar la pérdida de los arrecifes de coral, y en última instancia, impedir importantes cambios en el clima, debemos reducir los niveles atmosféricos de dióxido de carbono por debajo de los 350 ppm (partes por millón)<sup>4</sup>. Por desgracia, el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera ya ha superado los 385 ppm y sigue en aumento<sup>5</sup>. Hay que resaltar que los niveles actuales de CO<sub>2</sub> están muy por encima de lo que nunca han estado a lo largo de la historia de la humanidad<sup>6</sup>.

En nuestra sociedad actual, las emisiones de dióxido de carbono están directamente vinculadas a nuestra creciente necesidad de energía. Las cifras publicadas hace poco por la EIA (*Energy and Information Administration*) de EE UU sugieren que, de seguir por este camino, sin una modificación de las leyes y políticas actuales, el consumo energético en 2030 será un 50% superior al de 2005<sup>7</sup>. Esto significaría concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera superiores a 570 ppm<sup>8</sup>.

Si seguimos con el mismo ritmo de emisiones, los arrecifes seguirán degradándose, llegando a sobrepasar el punto crítico, lo que es probable que se produzca si se llega a una concentración de 450 ppm de dióxido de carbono. En este caso, los arrecifes estarían gravemente amenazados. Una vez superado este punto crítico, los arrecifes disminuirán rápidamente<sup>9</sup> y al menos la mitad de los organismos que dependen de una u otra forma de ellos también disminuirán o desaparecerán. A partir de aquí, los arrecifes posiblemente se desmoronarían, quedando tan sólo

## Emisiones previstas de CO<sub>2</sub> de EE UU vs. emisiones necesarias para alcanzar los 350 ppm



Fuente: Oceana, basado en datos de la EIA (2008) y del IPCC (2007)

unos pocos corales calcáreos<sup>10</sup>. Debido a que tardan décadas o incluso siglos en formarse, una vez producido el daño, el impacto será irreversible durante generaciones.

Para salvar a los arrecifes de la acidificación de los océanos debemos estabilizar la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera por debajo de los 350 ppm. De esta forma, también evitaremos otros tipos de catástrofes climáticas. Los niveles actuales de dióxido de carbono ya superan ese nivel de referencia, y se prevé que aumenten durante las próximas décadas. Es crucial que demos los pasos adecuados para que las emisiones de CO<sub>2</sub> descendan en los próximos 10 años.

El IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) decretó que para estabilizar el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera en 350 ppm, las emisiones mundiales deberían reducirse en un 85% por debajo de los niveles de 2000 antes de 2050<sup>11</sup>. Para conseguir esto los países del Anexo I (países industrializados y aquellos con economías en transición, como la Federación Rusa) deberían reducir sus emisiones de dióxido de carbono entre un 25% y un 40% por debajo de los niveles de 1990 antes de 2020, y entre un 80% y un 95% antes de 2050. Debido al poco tiempo y a la dificultad existente en el logro de dichos objetivos, todos los países han de ponerse en acción de forma inminente. Nuestra capacidad para establecer y alcanzar metas a corto plazo en los próximos años determinará nuestro éxito a la hora de estabilizar el clima. Cuanto más tardemos en actuar, más difícil será evitar la catástrofe.



© OCEANA / Juan Carlos Calvin

## Resultados

Este informe pone de relieve recientes resultados que demuestran que la acidificación de los océanos es un hecho real, y que por tanto supone una amenaza. También se señalan las posibles consecuencias en los océanos y ecosistemas marinos si se siguen incrementando las emisiones de dióxido de carbono.

- Los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera son los más altos de los últimos 800.000 años, y probablemente de épocas más lejanas<sup>12</sup>.
- La acidez en la superficie del océano ha aumentado un 30% desde la Revolución Industrial<sup>13</sup>. Si la tendencia actual persiste, podría aumentar un 100% a finales de este siglo<sup>14</sup>, superando los niveles de los últimos 20 millones de años<sup>15</sup>.
- El incremento de la cantidad de dióxido de carbono que absorben los océanos altera el movimiento de nutrientes y los compuestos químicos de los mismos, afectando a los ecosistemas y la vida marina<sup>16</sup>.
- El aumento en la acidez oceánica también afectará a tasas de crecimiento, reproducción, resistencia a la enfermedad y otros procesos biológicos y fisiológicos de muchas especies<sup>21</sup>.
- Muchas especies serán incapaces de adaptarse a los rápidos cambios en las concentraciones de carbonato y a los procesos de acidificación en los océanos, especialmente aquellas que construyen conchas y esqueletos de carbonato cálcico. Esto podría llevar al colapso de muchas especies, como ostras, mejillones, cangrejos y langostas<sup>17,18,19,20</sup>.
- El impacto en especies dependientes del carbonato, como corales y pterópodos, podría tener grandes consecuencias sobre los ecosistemas y las cadenas alimenticias, llegando a afectar incluso a los animales de mayor tamaño de los océanos, así como a muchas pesquerías comerciales<sup>22</sup>.
- Casi un 30% de los corales tropicales del mundo han desaparecido desde 1980, principalmente por el calentamiento global. Siguiendo el ritmo actual de aumento de emisiones, los corales tropicales podrían extinguirse en la segunda mitad de este siglo<sup>23,24</sup>.
- Si la tendencia actual continúa, los corales de aguas profundas se verán gravemente afectados antes del 2040. Dos terceras partes de éstos podrían estar en un medio corrosivo a finales de siglo<sup>25</sup>.
- La desaparición de los arrecifes de coral supondría un coste de miles de millones de dólares anuales, debido a las pérdidas en la pesca, el turismo y los servicios de protección costera<sup>26</sup>.
- Más de 100 millones de personas dependen económicamente de los arrecifes de coral<sup>27</sup> y estas comunidades podrían sufrir consecuencias en la salud y en la alimentación<sup>28</sup>.
- Muchas pesquerías comerciales dependen de los arrecifes, que son lugar de alimentación y refugio para los peces<sup>29,30</sup>. La pérdida de los arrecifes podría desestabilizar aun más a aquellas poblaciones de peces ya de por sí reducidas.
- Para proteger a los arrecifes de coral y los ecosistemas que dependen de ellos, debemos estabilizar el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera en los 350 ppm o incluso por debajo de este punto. Para alcanzar este objetivo, las emisiones globales deberán reducirse en un 85% respecto a los niveles del 2000 antes del 2050. Esto supone que los países industrializados deberán reducir sus emisiones entre un 25% y un 40% por debajo de los niveles de 1990 antes del 2020 y entre un 80% y un 95% antes del 2050<sup>31,32,33</sup>.

## Soluciones

Es necesario tomar una serie de medidas para reducir los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera hasta los 350 ppm. Éstas incluyen: (1) la sustitución de nuestra política energética basada en el carbón por otra basada en energías alternativas como la solar, la eólica y el hidrógeno, reduciendo de forma progresiva el uso de carbón al menos hasta que los procesos de captura del dióxido de carbono no estén plenamente desarrollados y sean más eficientes; (2) aumento de la eficiencia energética en coches, camiones, trenes, aviones y barcos, así como en el hogar, oficinas, en las centrales eléctricas y en el sector industrial; y (3) reducción de la deforestación impulsando la plantación de más árboles para ayudar a reducir los niveles de dióxido de carbono. Si queremos salvar nuestros arrecifes de coral y pesquerías, así como los ecosistemas que dependen de ellos y todos los procesos asociados a los mismos, debemos reducir nuestras emisiones entre un 25 y 40% antes del 2020.

## Recomendaciones

### ***Adoptar una política para estabilizar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera en 350 ppm***

Los gobiernos se han de comprometer a estabilizar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera en 350 ppm o incluso menos. Para ello, se han de dar importantes pasos en los próximos cinco años que lleven a la sociedad a eliminar por completo las emisiones de CO<sub>2</sub> en las próximas décadas.

### ***Promover la eficiencia energética y reducir el uso de combustibles fósiles***

Es necesario ahorrar energía con un uso eficiente de combustibles en coches, camiones, aviones y barcos, utilizar combustibles más limpios, invertir en un transporte público eficiente y tomar acciones a nivel individual, institucional y empresarial para reducir el uso energético.

### ***Utilizar fuentes de energías alternativas***

Se debería prohibir la creación o ampliación de centrales térmicas de carbón, al menos hasta que se desarrollen tecnologías capaces de atrapar y almacenar de forma segura las partículas contaminantes. En su lugar, tanto gobiernos como el sector privado deberían implementar programas para estimular el desarrollo y el uso de energías renovables, como la solar y la eólica, e invertir en mejorar la red eléctrica para que la energía producida a partir de fuentes renovables pueda pasar al mercado de manera rentable. Los gobiernos deberían retirar inmediatamente cualquier subvención que fomente el uso de combustibles fósiles. No deberían extraerse combustibles fósiles que se encuentren en ecosistemas sensibles como el Ártico.

### ***Regular las emisiones de carbono***

Los gobiernos deberían regular de inmediato las emisiones de dióxido de carbono, a través de un sistema que integre los costes de emisiones y que proteja a los océanos. Además las fuentes de emisiones de dióxido de carbono no reguladas, como los barcos y aviones, deberían incluirse en un acuerdo post-Kioto y ser reguladas por los correspondientes organismos internacionales, tales como la *International Maritime Organization* y la *International Civil Aviation Organization*.

### ***Reducción de otros impactos***

De la misma forma, los ecosistemas marinos deberían protegerse reduciendo otras amenazas de origen humano, como la sobrepesca y la contaminación. La acidificación de los océanos y el cambio climático no son amenazas aisladas, sino que actúan de forma conjunta con otros tipos de impactos en ecosistemas y especies. Los ecosistemas marinos tendrán más posibilidades de sobrevivir a la acidificación del océano si al mismo tiempo no tienen que superar otras amenazas.



# INTRODUCCIÓN

La continua quema de combustibles fósiles aumenta los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera, que recae finalmente en los océanos. Los océanos han absorbido grandes cantidades de dióxido de carbono desde los inicios de la Revolución Industrial (aproximadamente en el año 1750). Esta creciente cantidad de dióxido de carbono en los océanos es la causante del proceso de acidificación.

El término acidificación se refiere al proceso por el cual los océanos se vuelven más ácidos. Cuando el dióxido de carbono entra en el océano, reacciona con el agua de mar, aumentando la acidez del agua y bajando por tanto su pH<sup>35</sup>. No obstante, es poco probable que el océano llegue a ser un ácido como tal (es decir, un pH inferior a 7.0).

Una importante consecuencia de esta creciente acidez es la reducción del carbonato disponible y necesario para las especies marinas. Uno de los principales usos del carbonato en los océanos es la formación de carbonato cálcico o estructuras calcáreas como los esqueletos de coral, conchas y perlas, así como los creados por algunos tipos de plancton marino. La acidificación del océano tendrá un gran impacto en la capacidad de estos organismos para crear sus estructuras de carbonato cálcico, y probablemente altere algunas de las funciones químicas y biológicas más importantes de los océanos<sup>36</sup>.



© OCEANA / Houssine Kaddachi

## ¿QUÉ ES LA ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO?

La absorción del dióxido de carbono por parte de los océanos posee un efecto regulador en los impactos producidos por el cambio climático en la vida terrestre. Los océanos actúan como “sumideros de carbono”, reduciendo los impactos asociados al cambio climático. Si los océanos no tuvieran este papel, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera sería un 55% superior a la de los últimos 250 años<sup>37</sup>.

Antes de la Revolución Industrial, los océanos mantenían un relativo equilibrio con la atmósfera, absorbiendo aproximadamente la misma cantidad de dióxido de carbono que era emitido (2.150 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>)<sup>38</sup>. Sin embargo, al aumentar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles, también ha aumentado la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbida por los océanos. Este proceso continuará mientras la concentración de dióxido de carbono en las aguas superficiales sea menor que la de la atmósfera<sup>39</sup>.

El pH de la superficie del océano ya ha caído 0,1 unidades, lo que representa un aumento del 30% en la acidez<sup>40</sup>. A finales de este siglo, si las emisiones actuales continúan, el pH podría caer otras 0,3 unidades, lo cual significaría un aumento de acidez de casi el 100%<sup>41</sup>. Los incrementos en el pH deben considerarse con cuidado ya que al ser logarítmicos, pequeños cambios en las unidades implican cambios importantes en el pH. Por ejemplo, lo que parece una pequeña caída de 0,4 unidades del pH representa en realidad un aumento de más del doble (casi el 150%) de la acidez del océano<sup>42</sup>. En los últimos 300 millones de años, el pH del océano nunca ha caído más de 0,6 unidades por debajo del nivel de 1750<sup>43</sup>. Sin embargo, si durante los próximos dos siglos no disminuye el uso de combustibles, el pH del océano podría caer más de 0,7 unidades por debajo de dicho nivel (véase la Tabla 1)<sup>44</sup>.

Los océanos son el mayor almacén, o sumidero, del dióxido de carbono antropogénico de la Tierra<sup>46</sup>. Desde el siglo XVIII, los océanos han absorbido más de 460 mil millones de toneladas métricas de dióxido de carbono<sup>47</sup>, lo que representa casi la mitad de las emisiones de este gas, resultantes de la quema de combustibles fósiles, o aproximadamente el 30% de todas las emisiones de dióxido de carbono producidas por el ser humano<sup>48</sup>. Los océanos absorben diariamente unos 30 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono<sup>49</sup> casi el doble de la cantidad emitida por EE UU cada día<sup>50</sup>.

La concentración actual de dióxido de carbono en la atmósfera es la más alta en la historia de la humanidad; de hecho, hasta donde han podido determinar los científicos



(800.000 años), el nivel no había superado los 300 ppm<sup>51</sup>. Si continuamos con la tendencia actual de emisiones, en el año 2050 el pH del océano será el más bajo de los últimos 20 millones de años<sup>52</sup>.

Pero todavía más significativa es la velocidad a la que está cambiando la composición química de los océanos. La velocidad actual de acidificación es al menos 100 veces superior a la velocidad máxima de los últimos cientos de miles de años<sup>53,54</sup>. El dióxido de carbono se absorbe tan rápido que las aguas superficiales no serán capaces de prevenir y contrarrestar el importante descenso en el pH del océano<sup>55</sup>.

**Tabla 1: pH actual del océano y cambios previstos<sup>45</sup>**

	CAMBIOS EN EL pH DESDE LA ÉPOCA INDUSTRIAL PRE-INDUSTRIAL		NIVELES DE pH NO ALCANZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS
	UNIDADES pH	PORCENTAJES	
Actualmente	-0,1	30	800.000 años
En 2050 siguiendo al ritmo actual	-0,2	60	20 millones de años
En 2250 siguiendo al ritmo actual	-0,7	210	300 millones de años

**Tabla 2: Composición química del agua superficial del mar en el pasado y el futuro si se sigue al ritmo actual de emisiones<sup>56</sup>**

AÑO	CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN LA ATMÓSFERA (ppm)	pH DE LA SUPERFICIE DEL OCEANO
1750	280	8,19
2008	385	8,09
2020	440	8,03
2040	510	7,97
2060	600	7,91
2080	700	7,85
2100	850	7,78

Basándonos en la historia geológica, los “calcificadores” marinos (organismos capaces de producir caparazones y esqueletos de carbonato cálcico) y los ciclos biogeoquímicos naturales del océano podrían verse negativamente afectados por pequeños cambios en la concentración del dióxido de carbono en las aguas superficiales<sup>57,58</sup>. Es posible que la acidificación de los océanos sea la culpable de anteriores extinciones masivas de arrecifes de coral y de los periodos tan largos de tiempo (del orden de millones de años) que dichos arrecifes tardan en recuperarse<sup>59</sup>. Un proceso de acidificación ocurrido hace cincuenta y cinco millones de años en el Máximo térmico del Paleoceno-Eoceno (MTPE, PETM en inglés) provocó la extinción de una importante parte de los calcificadores béticos<sup>60</sup>. Estamos en camino de igualar o superar el MTPE. Si explotamos completamente las reservas de combustibles fósiles, los océanos absorberán una cantidad de dióxido de carbono similar a la del MTPE; sin embargo, en la actualidad las emisiones se producen a una velocidad mayor, en un espacio de tiempo de entre decenas y cientos de años, en lugar de miles de años. Por ello, es posible que las consecuencias de la actual acidificación del océano sean más catastróficas que las ocurridas en el MTPE. Esto significa que podemos estar a las puertas de otra extinción en masa<sup>61,62</sup>.

*“Es posible que si se continúa con la actual tendencia de emisiones de dióxido de carbono, los corales se extingan y esto conlleve a la extinción de otras especies marinas”<sup>34</sup>*

— Dr. Ken Caldeira

## ¿En qué consiste la escala de pH?

El pH es una medida de la acidez o basicidad de una solución, basándose en la concentración de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>). La escala va desde 0 (solución ácida, con una alta concentración de H<sup>+</sup>) hasta 14 (solución muy básica, con una baja concentración de H<sup>+</sup>). El pH del ácido sulfúrico, usado en baterías, por ejemplo, es cercano al 0, mientras que el del hidróxido de sodio (o sosa cáustica) es de casi 14. Una solución neutra tiene un pH de 7, y el agua de mar pura tiene un pH de entre 8 y 8.3. Un cambio de 1 unidad representa que la concentración de iones hidrógeno aumenta diez veces, y por tanto también la acidez. Por ejemplo, un pH 5 es diez veces más ácido que un pH 6 y 100 veces más ácido que un pH 7.

Concentraciones de iones hidrógeno en comparación con agua destilada (pH)	Ejemplos de soluciones y su pH correspondiente
10.000.000	0 Ácido sulfúrico
1.000.000	1 Ácido clorhídrico
100.000	2 Zumo de limón, vinagre
10.000	3 Zumo de naranja, soda
1.000	4 Zumo de tomate
100	5 Café negro, lluvia ácida
10	6 Orina, saliva
1	7 Agua “pura”
1/10	8 Agua de mar
1/100	9 Bicarbonato de sodio, pasta de dientes
1/1.000	10 Sales de magnesio
1/10.000	11 Amoníaco
1/100.000	12 Agua jabonosa
1/1.000.000	13 Lejía, productos para la limpieza del horno
1/10.000.000	14 Sosa cáustica líquida

Fuente: Richmond River County Council  
[www.rcc.nsw.gov.au](http://www.rcc.nsw.gov.au)

# QUÍMICA OCEÁNICA

La composición química del agua del mar amortigua los grandes cambios del pH. Sin embargo, un gran aumento del dióxido de carbono puede reducir la disponibilidad de carbonatos, e incluso hacer que el agua del mar se vuelva corrosiva y comience a eliminar estructuras de carbonato cálcico.

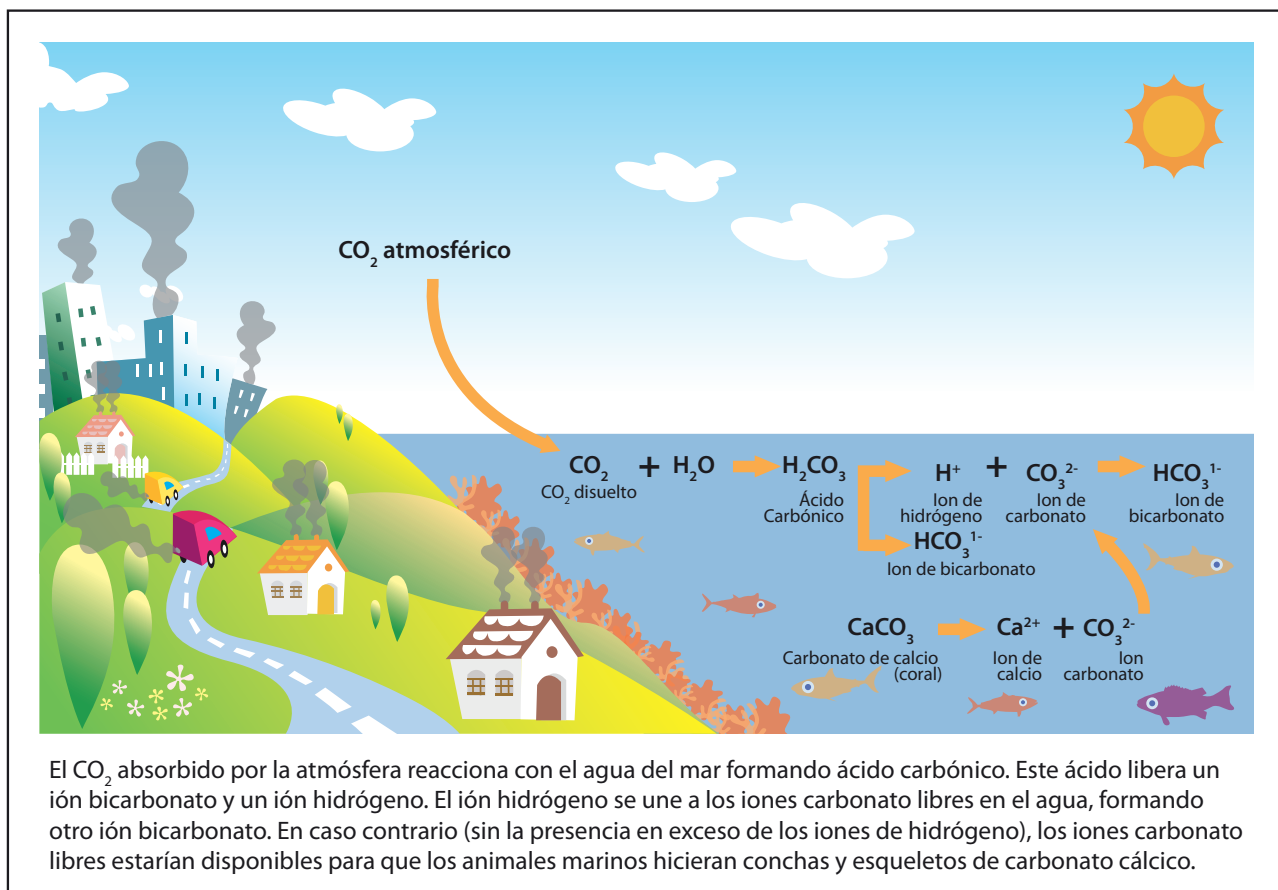
## Grandes cantidades de dióxido de carbono en el agua de mar reducen la disponibilidad de carbonatos

Los animales marinos necesitan el carbonato para fabricar sus conchas y esqueletos de carbonato de calcio. En el océano, las cantidades de carbonato y bicarbonato están en equilibrio, por lo que si aumenta la cantidad de uno, decrecerá la cantidad del otro. Con un nivel de pH normal, la mayoría del carbono inorgánico del océano se almacena en forma de iones bicarbonato, pero queda disponible suficiente carbonato para la formación de carbonato cálcico.

El proceso químico es el siguiente: cuando el dióxido de carbono absorbido por el océano reacciona con el agua, forma un ión bicarbonato y un ión de hidrógeno. Este ión hidrógeno se une a una molécula de carbonato que en otras circunstancias se utilizaría para producir carbonato cálcico (véase la Cuadro 1). Esto inclina la balanza haciendo que haya menos iones carbonato, vitales para la vida marina.

Algunas de las especies que podrían verse afectadas por una disminución en la cantidad de iones carbonatos son: corales, estrellas marinas, ostras, cangrejos, gambas, mejillones, langostas, cocolitóforos (un tipo de fitoplancton), pterópodos (caracoles marinos) y foraminíferas (plancton relacionado con las amebas).

**Cuadro 1: Procesos químicos en la acidificación oceánica**



### El agua del mar se vuelve corrosiva

En aguas acidificadas, la reducción del carbonato es tan importante que las estructuras calcáreas pueden empezar a disolverse. Las estructuras de carbonato cálcico sólo existen en aguas donde hay un nivel suficiente de iones carbonato, por lo que el aumento de iones hidrógeno allí donde hay una escasa concentración de iones carbonato disminuye la cantidad de carbonato disponible e incluso puede hacer que las estructuras calcáreas se disuelvan. Con la acumulación de dióxido de carbono, se incrementarán las zonas de los océanos que ya tenían un pH lo bastante bajo como para corroer las estructuras de carbonato de calcio.

La concentración de iones hidrógeno define el grado de acidez del océano. En una situación normal, la unión de iones hidrógeno con iones carbonato está en equilibrio, no favoreciendo el proceso de acidificación. Sin embargo dicho equilibrio se rompe debido a las grandes cantidades de dióxido de carbono que se están absorbiendo, siendo por tanto el proceso de disolución de las estructuras calcáreas la única manera de que el océano recupere los niveles de acidez anteriores a la época pre-industrial. No obstante, esto es un proceso lento, que llevará miles de años. Mientras tanto, los niveles de dióxido de carbono están aumentando<sup>63</sup> y muchas estructuras de carbonato cálcico de vital importancia, tales como arrecifes de coral y crustáceos podrían empezar a disolverse.



El esqueleto de esta *Oculina patagonica*, un coral que se encuentra en el Mediterráneo, se disolvió tras permanecer 6 meses en aguas acidificadas. Tan sólo quedaron los pólipos blandos similares a los de una anémona.

### El papel de la calcita y el aragonito

La disolución de carbonato cálcico está relacionada con la existencia y disponibilidad de iones carbonato, pero también se ve afectada por otros factores relacionados con su propia estructura química. El carbonato de calcio se encuentra normalmente en dos formas: calcita y aragonito. Generalmente, los organismos crean una u otra forma, aunque algunos también introducen magnesio en sus estructuras calcáreas. El aragonito y la calcita de magnesio son al menos un 50% más solubles que la calcita, y por tanto más vulnerables a los efectos del aumento de acidez<sup>64</sup>. Los organismos de especial sensibilidad a la acidificación, como los corales y pterópodos que construyen sus esqueletos y conchas con el aragonito, y las algas coralinas que producen calcita de magnesio, se ven especialmente amenazados por los procesos de acidificación del océano<sup>65</sup>.

La calcificación depende en gran medida del “estado de saturación” del agua del entorno. Esta saturación depende de muchos factores, como la temperatura del agua y la presión<sup>66</sup>. En la actualidad, el agua del mar cercana a la superficie está “sobresaturada” con respecto a cualquier forma de carbonato cálcico (es decir, la concentración de iones carbonato es tan alta que se crea fácilmente carbonato cálcico). Por este motivo, las aguas superficiales son las de mayor concentración de carbonato cálcico<sup>67</sup>. Las aguas frías y profundas albergan una mayor cantidad de dióxido de carbono y poseen una menor presencia de carbonato cálcico, siendo por tanto más ácidas que las aguas cálidas.

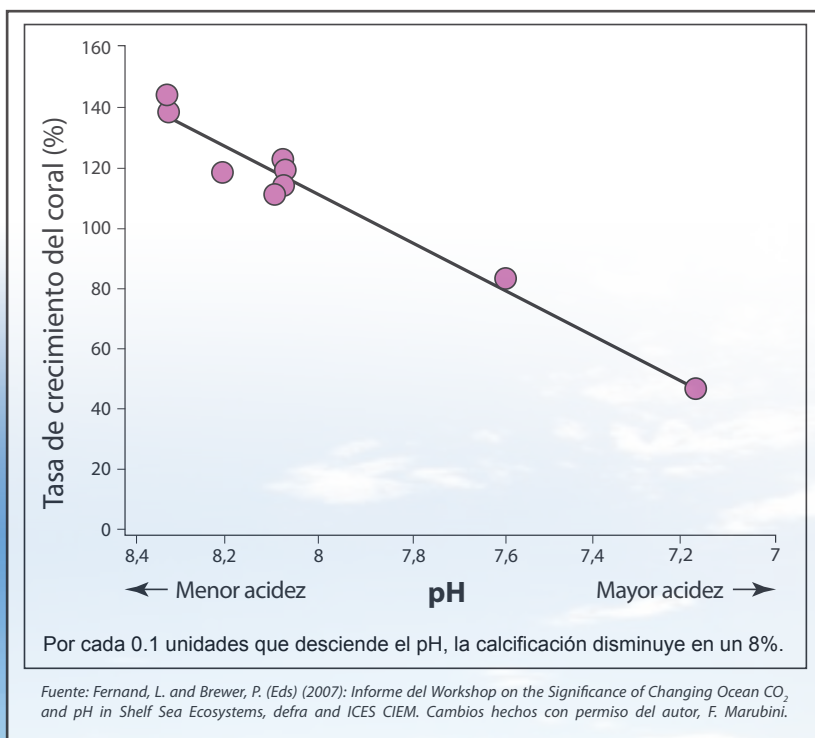
La capacidad de calcificación, que es una medida de la capacidad de un animal para construir su estructura de carbonato de calcio, es mayor cuando el pH es superior y el agua está “saturada” de iones carbonato. Si el nivel de saturación desciende, como ocurre en aguas más profundas, el crecimiento de estas especies también disminuye (véase el Cuadro 2)<sup>68</sup>. Una vez se alcance el nivel de “infra-saturación”, el carbonato cálcico comenzará a disolverse. Sin embargo, debido a la rapidez a la que se producen dichos cambios la capacidad de calcificación puede disminuir mucho antes de que se alcance la infra-saturación, así que muchos calcificadores pueden morir antes de llegar a alcanzar el punto de infra-saturación<sup>69</sup>.

Al aumentar la cantidad de dióxido de carbono en el océano, el límite de saturación (límite entre aguas saturadas e infra-saturadas) tanto para el aragonito como para la calcita disminuye en profundidad acercándose a la superficie, reduciendo por tanto el área en el que se puede producir la calcificación<sup>70</sup>. La cantidad de dióxido de carbono absorbido por los océanos ha hecho que los límites de saturación suban entre 50 y 200 metros hacia la superficie por encima del nivel anterior a la Revolución Industrial<sup>71</sup>.

Debido a sus frías aguas, el Océano Antártico tiene las concentraciones más bajas de carbonato de todo el planeta, y es el que menos estructuras de carbonato cálcico posee, incluso cerca de la superficie<sup>72</sup>. Por ello, los calcificadores presentes en estas aguas son los más amenazados por el aumento del nivel de dióxido de carbono.

Si continuamos quemando combustibles fósiles al ritmo actual, el Océano Antártico se infra-saturará respecto al aragonito a mediados de este siglo<sup>73</sup>. Con una concentración atmosférica de dióxido de carbono de 450 ppm, el 7% del Océano Antártico, por debajo de los 60°S, estaría infra-saturado respecto al aragonito<sup>74</sup>. Con una concentración de dióxido de carbono de 560 ppm, la infra-saturación se extendería por los océanos polares<sup>75</sup> haciendo casi imposible la existencia de estructuras de aragonito en estas zonas. Esto tendría consecuencias devastadoras para los corales de aguas profundas, los pterópodos y otros organismos que crean sus conchas y esqueletos a partir del aragonito o la calcita de magnesio.

**Cuadro 2: La calcificación del coral tropical (tasa de crecimiento) disminuye al aumentar la acidez**



# EFFECTOS DE LA ACIDIFICACIÓN DE LOS OCÉANOS

Los procesos biológicos y fisiológicos de muchos organismos se verían afectados por un aumento de la acidez<sup>76</sup>, lo que provocaría además grandes cambios en muchos ecosistemas marinos. Según un informe de *The Royal Society* acerca de la acidificación del océano, los efectos en los ecosistemas serían graves y duraderos.

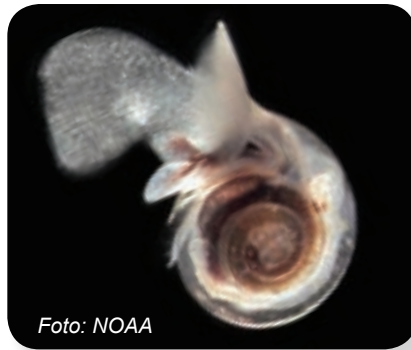


Foto: NOAA

**Un pterópodo nadador  
(*Limacina helicina*)**

## Calcificación

Los organismos calcificadores se encuentran tanto en ecosistemas de aguas profundas como en aguas poco profundas. La calcificación es el proceso fisiológico por el cual los organismos crean estructuras como conchas y esqueletos a partir de carbonato cálcico. Algunos calcificadores construyen grandes estructuras, como los arrecifes de coral, mientras que otros son minúsculos, como las capas de los cocolitóforos, que sólo se pueden ver con un microscopio. Entre los organismos calcificadores se encuentran algunas de las especies más abundantes e importantes de los océanos, como los corales, las almejas, los pterópodos y otros moluscos, los crustáceos, como las langostas y los cangrejos, los equinodermos como la estrella de mar y algunos tipos de fitoplancton<sup>77,78</sup>.

Estos organismos crean sus estructuras de carbonato de calcio a partir de iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) existentes en el agua que les rodea. Los iones de calcio abundan en el océano, por lo que no son un factor limitador. Sin embargo, la cantidad de iones carbonato es más variable y escasa, por lo que puede limitar el proceso de calcificación<sup>79</sup>. Tal y como se ha descrito anteriormente, un aumento del dióxido de carbono puede reducir los iones carbonato, lo que ralentizaría o pararía la calcificación<sup>80,81</sup>.

A lo largo de su vida, los organismos marinos producen estructuras de carbonato de calcio por diversas razones. Por ejemplo, los corales crean esqueletos de carbonato cálcico no sólo como ancla y guarida, sino también para elevar sus pólipos hacia la luz y las corrientes. Esto les permite obtener luz con mayor facilidad, así como los nutrientes y minerales que necesitan para crecer<sup>82</sup>. La madurez reproductiva también depende de dicha capacidad de calcificación. La madurez reproductiva en el coral, por ejemplo el *Goniastrea aspera*, se alcanza cuando adquiere un cierto tamaño, que a su vez depende de la capacidad de calcificación<sup>83</sup>. Como resultado, la incapacidad de muchos organismos de crear sus estructuras calcáreas podría afectar a su salud y supervivencia<sup>84</sup>, lo que podría tener importantes efectos secundarios en los ecosistemas marinos y las cadenas alimenticias<sup>85</sup>.



Foto: Blaire Beavers

**Ostra y perla**



Foto: © OCEANA / ZOE

**Langosta pinta (*Panulirus guttatus*)**



Foto: © OCEANA / Juan Cuetos

**Estrella suave (*Ophidiaster ophidianus*)**

### Corales tropicales

Un aumento del 20% de los niveles actuales de dióxido de carbono, que podría producirse en las próximas dos décadas, reduciría de manera significativa la capacidad de los corales para construir sus esqueletos y algunas especies podrían extinguirse en dicho periodo de tiempo<sup>86</sup>. Según el Dr. Ken Caldeira:

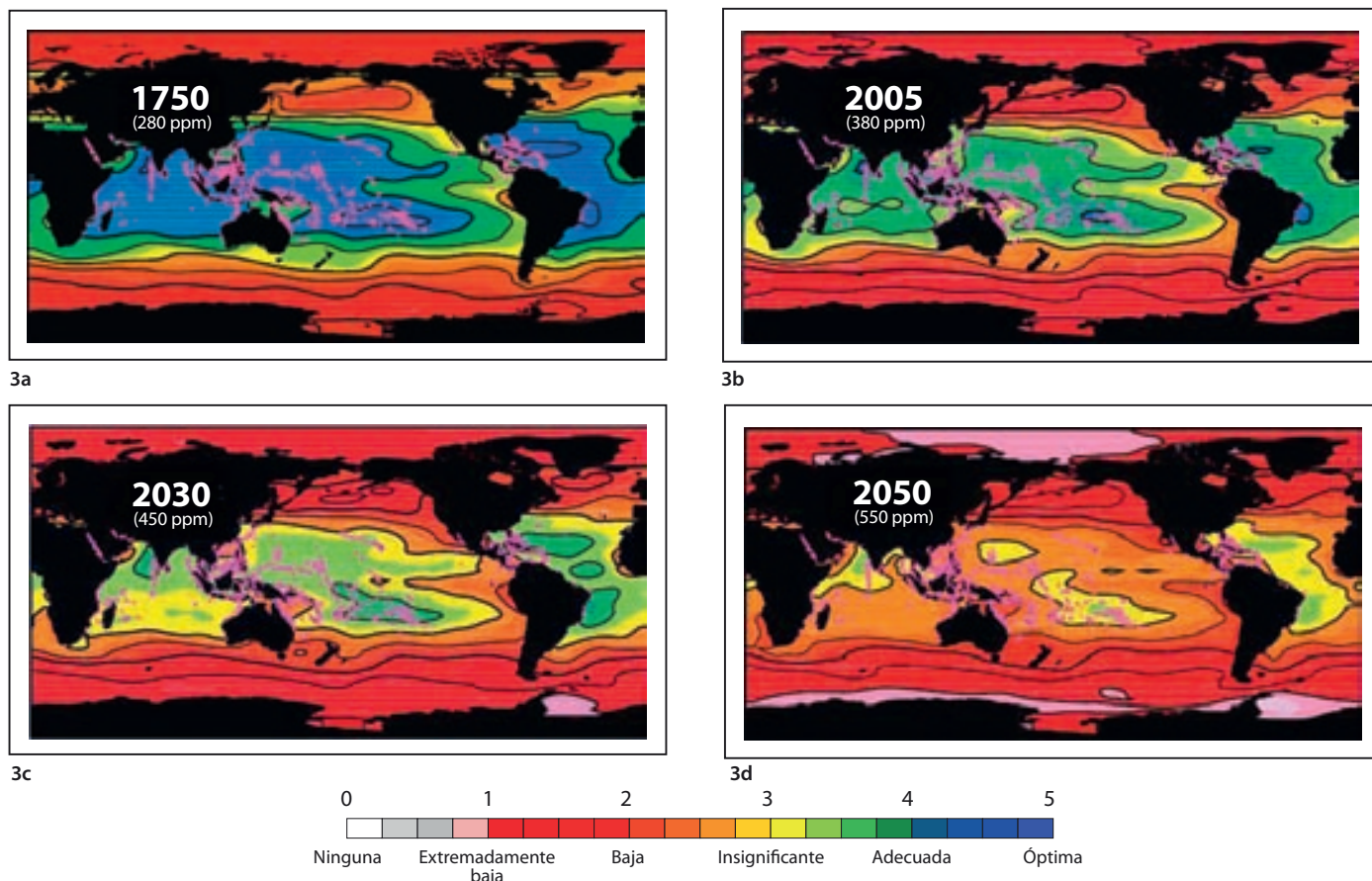
*“Hay bastantes evidencias de que si las actuales emisiones de dióxido de carbono continúan, los corales se extinguirán en este siglo”<sup>87</sup>*

Experimentos con corales de aguas poco profundas han demostrado que una concentración de dióxido de carbono de 560 ppm (el doble de los niveles pre-industriales) reduce la capacidad de calcificación hasta un 66%<sup>88</sup>. Si las actuales emisiones continúan, alcanzaremos dicho nivel de dióxido de carbono en la atmósfera hacia mediados de siglo. Esto NO SÓLO SUPONE que los corales crecerán más despacio, sino que tendrán más dificultades para SOBREVIVIR.

Los arrecifes de coral se encuentran en lucha continua para crecer. Muchas especies rompen parte de los esqueletos de los corales para poder alimentarse o crear sus propios refugios. Este proceso se conoce como bio-erosión. Incluso los arrecifes más sanos luchan constantemente por crecer más rápido que los procesos erosivos<sup>89</sup>. Cuando hay grandes cantidades de dióxido de carbono, no sólo el crecimiento de los corales es más lento, sino que también son menos robustos y los esqueletos que producen son más débiles<sup>90</sup>. Consecuentemente, los arrecifes de coral en condiciones ácidas podrían no superar el ritmo habitual de erosión y podrían comenzar a disminuir mucho antes de lo que se hubiera esperado.

Antes de la Revolución Industrial, cerca del 98% de los arrecifes de coral se encontraban en aguas con un nivel de saturación de aragonito óptimo o adecuado (véase el Cuadro 3a). Sin embargo, esta situación ha cambiado radicalmente al aumentar la acidificación de los océanos. Con la concentración actual de dióxido de carbono, alrededor del 60% de los arrecifes se encuentran en aguas con un nivel de saturación inferior al adecuado (véase el Cuadro 3b). Si la concentración alcanza los 450 ppm, más del 90% de los arrecifes de coral se encontrarán en las mismas condiciones (véase el Cuadro 3c). Si las concentraciones de dióxido de carbono alcanzan los 550 ppm (véase la Figura 3d), todos los corales que existen hoy en día se encontrarán en aguas con un nivel de saturación inferior al adecuado<sup>91</sup>.

**Cuadro 3: Estado de saturación de aragonito de los océanos versus crecimiento de los corales**



Fuente: Adaptado de: Cao L, & Caldeira K, (2008) Atmospheric CO2 stabilization and ocean acidification. *Geophysical Research Letters*, en imprenta, con el permiso de los autores.

De hecho, con una concentración atmosférica de dióxido de carbono de 560 ppm los océanos se volverían tan inhóspitos para los corales que casi todos los puntos donde hoy crecen se encontrarían en aguas infra-saturadas de aragonito, provocando la disolución de los corales<sup>92</sup>. Sin embargo, la capacidad de calcificación del coral podría finalizar incluso antes de alcanzar los 560 ppm. Las estructuras de aragonito se podrían erosionar por la acidez cuando la concentración de dióxido carbónico alcance los 480 ppm (véase Cuadro 3)<sup>93</sup>. Es posible que, siguiendo al ritmo actual, en 2040 tan sólo queden pequeñas zonas donde pueda crecer el coral. A finales de este siglo no quedaría ya ninguna<sup>94</sup>. Por esta razón los científicos han recomendado estabilizar las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera en un límite igual o inferior a los 350 ppm, para mantener los ecosistemas de coral tal y como hoy los conocemos<sup>95</sup>.

**Tabla 3: La destrucción de los arrecifes ha comenzado y empeorará si aumentan las concentraciones de CO<sub>2</sub><sup>96</sup>**

CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> (ppm)	SITUACIÓN DE LOS ARRECIFES DE CORAL
380	Los arrecifes cambiarán debido a la acidificación del océano, pero seguirán estando presentes.
450	La densidad y diversidad del coral en los arrecifes disminuirá, por lo que desaparecerán muchas especies de peces e invertebrados asociados a los corales.
450-500	Probablemente aumenten rápidamente los procesos de erosión. Éste podría ser el punto crítico para los corales, más allá del cual los arrecifes, tal y como los conocemos, podrían ser extremadamente raros o inexistentes. Podrían pasar millones de años antes de que los arrecifes recuperasen su diversidad y densidad.

La pérdida de los arrecifes supondría la pérdida del hábitat de millones de especies. Los arrecifes son guaridas, zonas de cría, alimentación y lugar de puesta para muchas especies, sin que exista otro sistema parecido en la Tierra. Por desgracia, debido a las amenazas de la acidificación de los océanos y el cambio climático, los arrecifes serán cada vez menos abundantes<sup>97</sup>. Sin los arrecifes, nueve millones de especies (incluidos cuatro mil especies de peces) sufrirían graves consecuencias, ya que dependen de ellos como cobijo y alimentación.<sup>98</sup>

La química oceánica cambia tan rápido que es poco probable que los corales puedan adaptarse a las nuevas condiciones<sup>99</sup>. Casi un 30% de los corales tropicales del mundo ha desaparecido desde 1980, especialmente debido al calentamiento global<sup>100</sup>. Si los arrecifes continúan desapareciendo a este ritmo, a mediados de siglo no quedará ningún coral de aguas templadas<sup>101</sup>.

### Corales de aguas profundas

Aunque los corales tropicales son tal vez los calcificadores más conocidos y apreciados de los océanos, no son los únicos tipos de corales a los que afectará la acidificación. Los corales de aguas profundas son tal vez los ecosistemas marinos más sensibles ante las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono<sup>102</sup>.

Aunque se sabe de la existencia de los corales de aguas profundas desde hace más de doscientos años, la mayor parte de la información se ha obtenido en las últimas dos décadas<sup>103</sup>. Los corales de aguas profundas, formadores de arrecifes, cuentan con una gran biodiversidad y son el hábitat y zona de cría para muchos organismos que viven en esas profundidades, incluidas muchas especies de peces de gran importancia comercial<sup>104</sup>. Todavía hay mucho que desconocemos acerca de ellos. Sin embargo, si los océanos se acidifican al ritmo actual, haremos que desaparezcan antes de conocer a fondo su verdadera belleza e importancia<sup>105</sup>.

Se sabe que los corales de aguas profundas, las esponjas y los ecosistemas donde éstos viven son importantes fuentes para tratamientos médicos contra enfermedades tan variadas como el cáncer, la artritis, el Alzheimer y patologías de la piel<sup>106</sup>. Por ejemplo, los corales bambú, un tipo de abanicos de mar, se emplean para crear huesos humanos sintéticos utilizados en injertos, y pueden ser un modelo de síntesis artificial para el colágeno<sup>107</sup>.

Hay seis especies de corales de aguas profundas formadores de arrecifes que crean esqueletos de carbonato de calcio a partir del aragonito<sup>108</sup>. Puesto que son unos de los corales de crecimiento más lento del planeta, la acidificación supone para ellos una amenaza real e inmediata<sup>109</sup>.



Foto: Jan Helge Fossa

**Los corales de aguas profundas, como los corales del género *Lophelia*, dependen de sus duros esqueletos como apoyo para sus pólipos, con los que capturan comida y nutrientes del agua.**



Foto: NOAA/MBARI

**Las esponjas de aguas profundas son, junto con los corales, un importante hábitat para los cangrejos y otras especies.**

Los corales de aguas profundas se encuentran en los océanos de todo el mundo, algunos a profundidades de más de cinco kilómetros y medio. Viven en zonas frías y profundas, que suelen ser menos favorables para la calcificación<sup>110</sup>. La profundidad máxima en la que estos corales pueden crear esqueletos de aragonito parece coincidir con la profundidad a la que se da el límite de saturación de este mineral<sup>111</sup>. En el Pacífico Norte, algunas especies no son capaces de formar arrecifes, lo que puede ser debido a la poca profundidad del límite de saturación del aragonito en esa zona<sup>112</sup>. La continua reducción del estado de saturación del aragonito posiblemente afecte antes a los corales de aguas profundas que a los arrecifes de aguas menos profundas<sup>113,114</sup>. Los corales de aguas profundas probablemente tengan esos ritmos de crecimiento y calcificación tan bajos debido a las bajas disponibilidades de aragonito en las zonas en las que viven<sup>115</sup>.

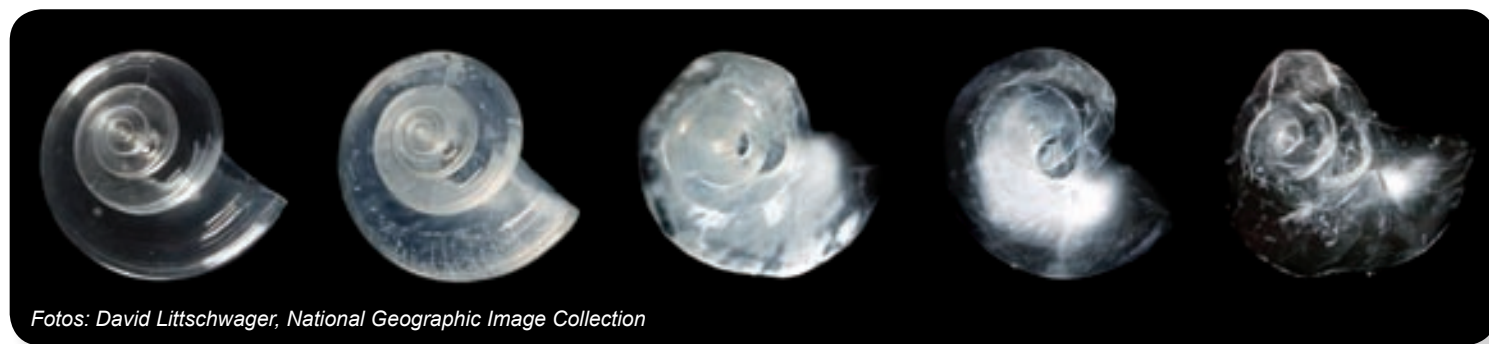
En menos de una década, la saturación del aragonito podría descender hasta llegar a ser insuficiente para los corales de aguas más profundas<sup>116,117</sup>. Si asumimos que reaccionan a un descenso del nivel de pH de la misma forma que los corales de aguas menos profundas, los corales de aguas profundas sufrirían un gran descenso en su ritmo de crecimiento mucho antes de 2020<sup>118</sup>. Antes de 2040 todos los corales de aguas profundas que hoy conocemos se encontrarían en condiciones extremas para desarrollar su capacidad de crecimiento<sup>119</sup>, y a finales de siglo al menos dos tercios de todos ellos estarían en aguas corrosivas para el aragonito<sup>120</sup>. Si seguimos emitiendo dióxido de carbono al mismo ritmo, es posible que la mayoría de los océanos sean “totalmente inhóspitos” para estos corales<sup>121,122</sup> antes de que acabe el siglo.

#### Otros calcificadores importantes

La acidificación de los océanos no sólo afectará a los corales de manera importante, posiblemente hasta llegar a la extinción. Por ejemplo, también moluscos, ostras, algas coralinas y un gran número de tipos de plancton crean esqueletos, conchas y láminas con carbonato de calcio. Aunque algunos de estos organismos son minúsculos, tienen un papel muy importante en el océano y en las cadenas alimenticias marinas<sup>123</sup>.

#### Algas coralinas

Las algas coralinas son los principales calcificadores de los arrecifes y juegan un papel importante en el crecimiento y estabilización de éstos, contribuyen de manera significativa en los procesos de sedimentación, y sirven de alimento para el erizo de mar, el pez loro y muchas especies de moluscos<sup>124,125</sup>. Un estudio reciente reveló una reducción del 86% en el crecimiento de algas coralinas en aguas acidificadas<sup>126</sup>. Estas algas construyen su esqueleto con calcita de magnesio y por ello serán uno de los primeros organismos que se vean afectados por la acidificación<sup>127</sup>. Una disminución en su capacidad de crear calcita y en su capacidad de crecimiento tendría un gran impacto en la estabilidad y la diversidad de los arrecifes de coral.



Fotos: David Littschwager, National Geographic Image Collection

#### Disolución de la concha de un pterópodo en agua acidificada

#### Pterópodos

Los pterópodos son parte de la base de la cadena alimenticia polar y sub-polar y sirven de alimento a gran parte del ecosistema, incluidas las ballenas y los grandes depredadores.<sup>128</sup> Por ejemplo, representan el 45% de la dieta del salmón rosa de Alaska<sup>129</sup>. Algunos estudios preliminares sugieren que una reducción del 10% en los pterópodos provocaría una reducción del 20% en el peso de un salmón rosa maduro<sup>130</sup>. Puesto que sus conchas están hechas con aragonito y se encuentran en las zonas más frías de las altas latitudes, que a su vez serían las primeras zonas en volverse infra-saturadas, los pterópodos podrían ser uno de los primeros calcificadores amenazados por la acidificación<sup>131</sup>. En una serie de experimentos, se expuso a pterópodos vivos al nivel de infra-saturación de aragonito que se prevé en el Océano Antártico para el 2100. En 48 horas sus conchas empezaron a disolverse, a pesar de que el propio animal estaba vivo<sup>132</sup>. Un aumento en la acidez traería consigo una menor tasa de calcificación en los pterópodos, lo que, a su vez, provocaría una interrupción en la base de la cadena alimenticia de los océanos, desencadenando grandes cambios en los ecosistemas y una ruptura en las interacciones depredador-presa. Esto a la larga afectaría a los grandes depredadores de los océanos, así como a muchas especies comerciales<sup>133</sup>.



### **Cocolitóforos**

Los cocolitóforos son algas unicelulares cubiertas con capas de calcita. Los estudios revelan que, cuando se les expone a aguas acidificadas, algunas especies sufren una disminución en la capacidad de producir calcita, pero otras no. De hecho, una especie aumentó su cubierta calcárea al incrementar la cantidad de dióxido de carbono<sup>134</sup>. Sin embargo, un descenso en la capacidad calcárea de tan sólo algunas especies de cocolitóforos podría intensificar el proceso de cambio climático. Los cocolitóforos crean gigantescos afloramientos de color más claro que el agua donde se encuentran, debido a sus cocolitos de calcita. Esto aumenta la cantidad de luz solar reflejada a la atmósfera y que por tanto no es absorbida por los océanos. Sin estas láminas más claras que pueden reflejar la luz solar, el albedo (tendencia de una superficie a reflejar la radiación incidente) de la Tierra podría reducirse en un 0,13%<sup>135</sup>. Así, una reducción en la calcificación producida por los cocolitóforos podría acelerar los procesos de cambio climático.

Los cocolitóforos también producen dimetil sulfuro (DMS), que reacciona en la atmósfera estimulando el desarrollo de nubes. Es posible que la producción de DMS de los cocolitóforos se vea afectada por la acidificación. Ésta podría reducir en gran manera la concentración atmosférica de DMS, disminuyendo la capa de nubes que cubren los océanos, que a su vez actúan como una capa protectora reflejando radiación solar a la atmósfera y provocando así un mayor calentamiento del planeta<sup>136,137</sup>. Una reducción del DMS también tendría muchos efectos en los ecosistemas, ya que este compuesto es un importante indicador utilizado por varios organismos como las aves marinas<sup>138</sup>, los peces que viven en los arrecifes<sup>139</sup> y las focas<sup>140</sup> para buscar alimento. Una reducción en el DMS rompería sus patrones de alimentación y su capacidad para buscar fuentes de alimentación.

### **Plancton como calcificador**

Muchas especies producen carbonato de calcio durante su fase larvaria, por lo que una mayor acidificación podría también afectar a especies que no es probable se vean afectadas de adultos. Por ejemplo, las larvas de dos tipos de erizos de mar tuvieron un menor proceso de calcificación y una menor tasa de crecimiento al ser expuestas a una mayor concentración de dióxido de carbono<sup>141</sup>. Especies, como mejillones, ostras, estrellas marinas, ofiuras y crustáceos, mostraron un menor índice de calcificación durante la fase larval en condiciones de incremento de dióxido de carbono.<sup>142,143</sup> Una alteración en las etapas de crecimiento de los organismos marinos podría mermar su adaptabilidad y supervivencia, con importantes consecuencias para los ecosistemas marinos.



Foto: Jeremy Young

**Los cocolitóforos se cubren de pequeñas láminas de carbonato cálcico llamadas cocolitos o placas.**



Foto: Steve Groom, Plymouth Marine Laboratories

**Los gigantescos afloramientos de color claro reflejan la radiación solar de nuevo al espacio, por lo que tienen un efecto de enfriamiento.**



Foto: Dave Burdick

**Las ofiuras mostraron una menor capacidad de calcificación en la fase larval en condiciones de mayor CO<sub>2</sub>.**

## EFECTOS FISIOLÓGICOS EN LA VIDA MARINA



**Erizo de mar**  
(*Heliocidaris erythrogramma*)



**Calamar**  
(*Sepioteuthis* sp.)

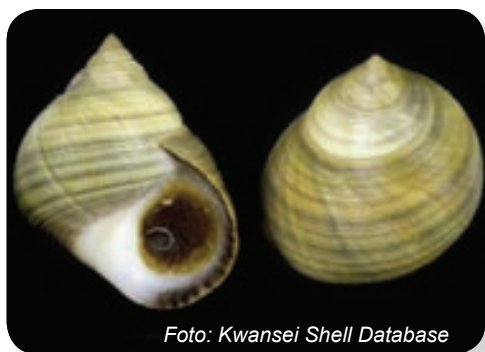


Foto: Kwansei Shell Database

**Bígaro**  
(*Littorina littorea*)

La acidificación de los mares disminuye no sólo la capacidad de calcificar, sino que afecta también a otros procesos biológicos y fisiológicos<sup>144</sup>. Estos impactos podrían incluir descensos en la tasa de crecimiento<sup>145</sup>, disminución de la capacidad reproductiva<sup>146</sup> y una mayor vulnerabilidad a la enfermedad<sup>147,148</sup>, lo cual tendría un efecto dominó en las cadenas alimenticias y los ecosistemas<sup>149</sup>. Funciones fisiológicas vitales, como la respiración y funciones del sistema nervioso también podrían verse afectadas por la acidificación<sup>150</sup>. Además, ésta también provocaría cambios en el comportamiento de algunas especies<sup>151</sup>.

### Efectos en la capacidad reproductiva

Las fases larvaria y juvenil más sensibles a un aumento de acidez. Por ejemplo, la tasa de fecundación de huevos de dos especies de erizo de mar (*Hemicentrotus pulcherrimus* y *Echionetra mathaei*) descendió ante una mayor acidificación. También presentaron esqueletos con malformaciones por un mayor nivel de dióxido de carbono<sup>152</sup>. Otra especie de erizo de mar, el *Heliocidaris erythrogramma*, mostró una reducción del 25% en la capacidad de fecundación cuando fue sometido a los niveles de acidificación previstos para el año 2100 si seguimos al mismo ritmo de emisiones<sup>153</sup>. Altos niveles de dióxido de carbono tuvieron también otros efectos en la capacidad reproductiva, como un descenso en la movilidad del esperma de las ostras del Pacífico, reducción del número de nacimientos en una especie de caracoles de mar (*Babylonia areolata*) y un menor número de huevos de copépodos<sup>154,155,156</sup>. Si la acidificación de los océanos afecta a la capacidad reproductiva, descenderá el tamaño de las poblaciones de diferentes especies<sup>157</sup>.

### Efectos en procesos respiratorios

La acidificación, junto con el cambio climático, puede provocar alteraciones en los niveles de oxígeno necesarios para muchos organismos marinos. Los procesos de calentamiento de los océanos están relacionados con disminuciones en los niveles de oxígeno y esto, junto con el incremento de los niveles de dióxido de carbono, haría que los mecanismos de transporte del oxígeno de algunas especies (como la hemoglobina en el caso de los humanos) se unan más fácilmente al dióxido de carbono que al oxígeno, lo que implicaría dificultades en la respiración<sup>158</sup>. El calamar es especialmente sensible a la falta de oxígeno, ya que debido a su forma intensa y energética de nadar necesita grandes cantidades de éste<sup>159</sup>. Si son incapaces de nadar de manera adecuada, tendrían graves consecuencias en su adaptabilidad y supervivencia. Además, también podrían verse afectadas las funciones metabólicas de muchos organismos en el proceso de adaptación a los nuevos niveles de acidez<sup>160</sup>. Aunque puede que esto no les elimine de forma directa, podría mermar su crecimiento y su tasa de reproducción, lo cual sería dañino para toda la población y para la propia especie<sup>161</sup>.

### Efectos en la conducta

Un aumento del nivel de acidez produciría alteraciones en los procesos fisiológicos y biológicos de muchas especies. Como consecuencia, estos cambios, podrían modificar su comportamiento al intentar compensar las funciones que se han visto mermadas. Por ejemplo, un reciente estudio reveló que el bígaro común (*Littorina littorea*), en presencia de una mayor concentración de dióxido de carbono, evade con mayor intensidad a los cangrejos<sup>162</sup>. En condiciones normales, ante la presencia de cangrejos, esta especie depende de su capacidad para engrosar su concha de carbonato cálcico. Sin embargo, el aumento del nivel de acidez impedía que el bígaro engrosara su concha, por lo que terminaba evadiéndolos<sup>163</sup>. Aunque es difícil predecir los efectos en cambios de comportamiento, probablemente podrían afectar la adaptabilidad de los animales, que se preocuparían más por evitar a los depredadores que por alimentarse o realizar otras funciones importantes. Dichos cambios tendrían finalmente consecuencias tanto en los depredadores como en los propios ecosistemas.

Algunos organismos reducen actividades vitales para poder mantener sus estructuras calcáreas cuando los niveles de carbonato son escasos. Por ejemplo, un tipo de ofiura, la *Amphiura filiformis*, dedica menos tiempo a ventilar su madriguera y alimentarse que a regenerar los brazos perdidos. Las ofiuras, en aguas más ácidas, también presentaban una menor musculación en los brazos, debido a que convierten la masa muscular en energía<sup>164</sup>. En este caso, la acidificación provoca que estos animales aumenten su proceso de calcificación intentando compensar la menor disponibilidad de iones carbonato. Pero estas acciones tienen un coste asociado, pues la adaptabilidad y supervivencia se ven afectadas.

## EFFECTOS EN LOS ECOSISTEMAS

Actualmente no está claro cómo afectará la acidificación a la estructura de la comunidad y al funcionamiento del ecosistema; sin embargo, como dijo *The Royal Society*:

*“Sin una acción importante para reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, en el futuro no habrá espacio en los océanos para muchas de las especies y ecosistemas que hoy conocemos”<sup>165</sup>*

La disminución de plancton provocará cambios en la disposición de las especies dentro de la comunidad, lo que tendrá un efecto dominó en la cadena alimenticia<sup>166</sup>. El plancton tiene un papel importante en la base de la cadena alimenticia de los mares. Si estas especies se alteran de alguna forma, siendo menos nutritivas, o desapareciendo como resultado de la continua acidificación de los océanos, las especies que dependen de ellas, como ballenas, tortugas o especies comerciales, sufrirán la falta de alimento. Esto provocaría cambios importantes en el modo de interactuar de los organismos a través de los océanos.

Incluso si los adultos de algunas especies son más resistentes a los efectos de la acidificación, la sensibilidad a estos cambios en la fase larvaria y juvenil produciría grandes impactos en las poblaciones y en la estructura del ecosistema<sup>167</sup>. Los impactos asociados con la acidificación serán diferentes entre las especies, muchas de las cuales se verán afectadas de forma crónica<sup>168</sup>. Incluso las especies que no estén afectadas directamente a nivel biológico o fisiológico podrían sufrir los efectos negativos debido a los cambios en la cadena alimenticia y en la estructura del ecosistema.





Foto: Dave Burdick

Erizo flor (*Toxopneustes pileolus*)



Foto: © 2005 David Monniaux

Ostra del Pacífico (*Crassostrea gigas*)



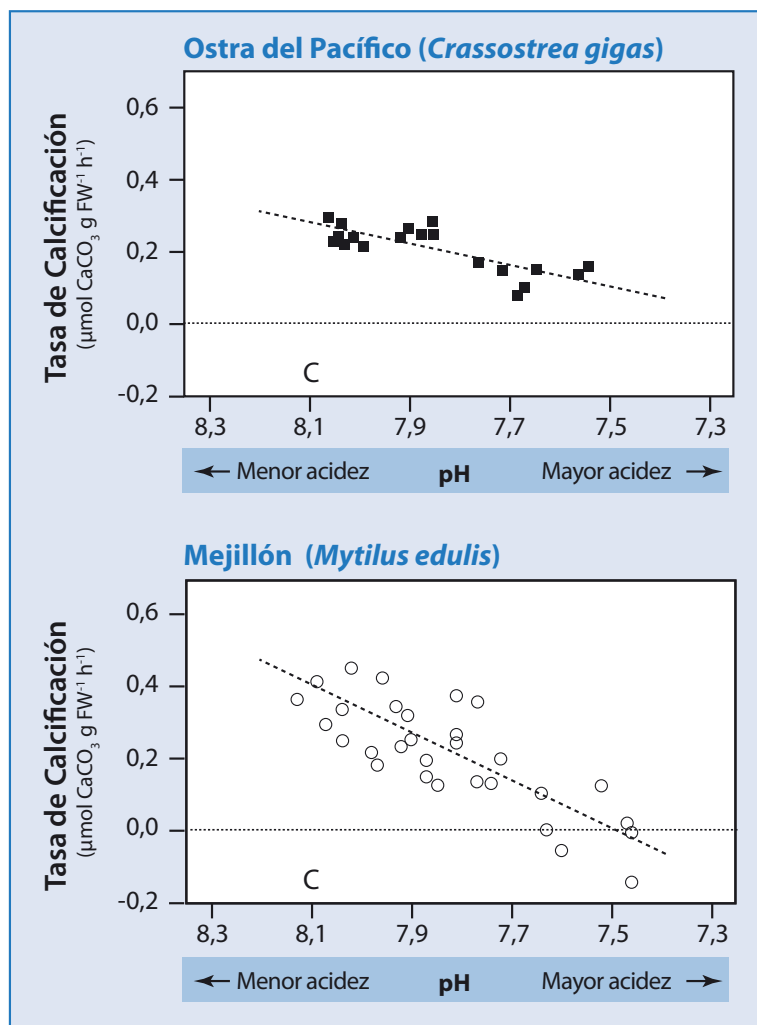
Foto: © Darkone

Mejillón (*Mytilus edulis*)

Muchos calcificadores tienen un papel importante en el ecosistema. Las estrellas de mar son depredadores clave ya que regulan la diversidad de la comunidad al alimentarse de especies que no entran en competencia con otras. Los erizos de mar se alimentan de algas, ostras y mejillones, y son vitales ingenieros del ecosistema creando o modificando los hábitats donde viven.

Al aumentar los niveles de dióxido de carbono, la capacidad de calcificación de la ostra del Pacífico (*Crassostrea gigas*) y el mejillón común (*Mytilus edulis*) disminuyó de forma lineal (véase Cuadro 4)<sup>169</sup>. Si las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera alcanzaran los 740 ppm, lo que podría ocurrir antes del 2100, la capacidad de calcificación de estas especies disminuiría en un 10% y 25% respectivamente<sup>170</sup>. La pérdida de ostras y mejillones podría tener un impacto importante al jugar un papel fundamental en los ecosistemas en los que viven y representar una cantidad importante de la producción mundial de acuicultura<sup>171</sup>.

**Cuadro 4: Una mayor acidez disminuye la tasa de calcificación**



Fuente: Adaptado de Gazeau, Frederic et al. (2007) Impact of Elevated CO<sub>2</sub> on Shellfish Calcification, *Geophysical Research Letters*, 34, con cambios hechos con permiso del autor.

Las ostras son un hábitat importante para otros organismos bénticos y ayudan a gestionar el flujo de nutrientes y la energía de los ecosistemas costeros<sup>172</sup>. Son filtradores, debido a que filtran la comida del agua en donde viven. Esto supone una ventaja, porque filtran el exceso de fitoplancton, así como compuestos químicos y otros contaminantes que de otra forma serían perjudiciales para la calidad del agua. Si el proceso de acidificación implica una reducción de la población de esta especie, la calidad de las aguas se verá afectada, produciéndose grandes cambios en la biodiversidad costera y en el funcionamiento de los ecosistemas.

Los mejillones marinos son el hábitat de pequeños invertebrados, fomentan procesos de sedimentación y son fuente de nutrición para muchas especies, como las aves marinas y el propio ser humano<sup>173</sup>. Se prevé que la acidificación disminuya la capacidad de calcificación de los mejillones<sup>174</sup>, reduzca su actividad metabólica<sup>175</sup> y su tasa de crecimiento<sup>176</sup>, suprimiendo incluso su función inmune<sup>177</sup>. Si estas especies y otras parecidas que ofrecen grandes servicios al ecosistema se ven gravemente afectadas por la creciente acidificación de los océanos, la pérdida de los beneficios que ofrecen podría ser catastrófica tanto para los ecosistemas marinos como para los seres humanos que dependen de ellos.



**Maxima clam**  
(*Tridacna maxima*)

Foto: © Christoph Specjalski

## CONSECUENCIAS DE LA ACIDIFICACIÓN EN LOS SERES HUMANOS

Los océanos no sólo controlan algunos de los ciclos geoquímicos más importantes, sino que también son fuente de alimentación, sustento y diversión para miles de millones de personas. Por desgracia, la acidificación podría cambiar todo esto. Unos mares con menor diversidad y vitalidad tendrían un impacto negativo en nuestra vida.

Por ejemplo, más de 100 millones de personas dependen económicamente de los arrecifes de coral, y muchos más los necesitan como protección, recurso y disfrute<sup>178</sup>. La desaparición de los arrecifes provocaría pérdidas multimillonarias al año, puesto que los arrecifes suponen unos ingresos que rondan los 30 mil millones de dólares anuales en la economía mundial a través de la protección costera, turismo, pesca y otros bienes y servicios<sup>179</sup>. Muchas comunidades pesqueras dependen de las especies marinas que se encuentran en los ecosistemas asociados a los arrecifes<sup>180</sup>, y su pérdida tendría graves consecuencias en la salud y la alimentación de estas comunidades.

### Protección costera

Las comunidades costeras de todo el planeta dependen de la protección que ofrecen los arrecifes contra marejadas, tsunamis y procesos de erosión<sup>181</sup>. En el tsunami que se produjo en diciembre de 2004, las líneas de costa con arrecifes menos robustos sufrieron mayores daños y pérdida de vidas que aquellas donde había arrecifes bien desarrollados<sup>182, 183</sup>. Un modelo científico desarrollado por investigadores de la Universidad de Princeton mostró que las costas con arrecifes sanos tenían el doble de protección contra tsunamis que las costas con arrecifes muertos<sup>184</sup>. La pérdida de los arrecifes por la acidificación aumentaría por tanto las amenazas a la salud, seguridad y bienestar de muchas comunidades costeras.

### Turismo

Las comunidades costeras también sufrirán grandes pérdidas económicas por la degradación de los arrecifes. Si éstos disminuyen y sus ecosistemas se empobrecen, muchos turistas buscarán otras zonas menos afectadas, lo que supondría una reducción de ingresos. Esto podría suponer grandes pérdidas para todas aquellas comunidades costeras que dependen del turismo. Sólo los arrecifes de Hawai se estima que generan de forma neta 364 millones de dólares al año<sup>185</sup>. La pérdida de estos ingresos dañaría de forma rotunda a la economía de la isla.



## Pesquerías

En el año 2004, se pescaron en todo el mundo unos 85,5 millones de toneladas métricas de pescado, con un valor de 76,4 mil millones de dólares<sup>186</sup>. Aunque es difícil estimar el impacto que el proceso de acidificación tendría en el pescado y en el marisco, es muy posible que muchas especies se vean afectadas de forma negativa.

Al desaparecer los arrecifes tropicales por la acidificación, muchas especies comerciales de gran importancia que dependen de estos arrecifes peligrarán, puesto que los arrecifes les sirven de refugio y alimento<sup>187</sup>. De hecho ya se han dado casos de especies de peces que han desaparecido de los arrecifes durante épocas de blanqueamiento. En 1998, tras el blanqueamiento de los arrecifes de Okinawan, el pez lija (*Oxymonacanthus longirostris*) no pudo sobrevivir sin el coral<sup>188</sup>. Aunque este pez lija no era particularmente importante desde el punto de vista comercial, se trataba de un ejemplo de lo que podría pasar con especies importantes si el proceso de acidificación empeorase.

Los arrecifes de aguas frías y profundas, al igual que los de aguas menos profundas, son zonas de gran biodiversidad que ofrecen una importante labor como hábitat para muchas especies, incluidas especies comerciales, como el mero<sup>189,190</sup>. Más de la mitad de las áreas de pesquería de EE UU (un sector de más de 4 mil millones de dólares anuales) se encuentran en aguas de Alaska<sup>191</sup>. Muchas especies de importancia comercial en esta región dependen de los corales de aguas profundas presentes en las Islas Aleutianas<sup>192</sup>. Estos corales se verán fuertemente afectados y pueden incluso empezar a disolverse antes de que se acabe este siglo, lo que sin duda dañaría tanto a los peces como a las pesquerías que dependen de ellos<sup>193</sup>. Los arrecifes de aguas profundas presentes en la costa atlántica de Estados Unidos son también un verdadero oasis de corales, esponjas, cangrejos, langostas, estrellas de mar y peces.

Muchas de las pesquerías comerciales del mundo se verán afectadas por la acidificación tanto directamente (cambios biológicos y fisiológicos) o indirectamente (por cambios en el hábitat y en la disponibilidad de alimento). Muchas de las zonas donde se prevé que la acidificación sea más severa en el próximo siglo son zonas altamente productivas y en ellas se localizan algunas de las pesquerías más importantes del planeta<sup>194</sup>.

Los efectos de la acidificación en moluscos (p.ej. almejas, ostras y mejillones) y crustáceos (p.ej. langostas, cangrejos, cigalas y gambas) podrían suponer grandes pérdidas tanto económicas como para los ecosistemas en sí. La cría de crustáceos ha aumentado en un 8% anual en los últimos 30 años, y en el 2004 suponía un mercado de 9.800 millones de dólares<sup>195</sup>. Los crustáceos serán especialmente vulnerables a la acidificación ya que necesitan iones carbonato para endurecer sus conchas tras la muda<sup>196</sup>. Se ha demostrado que la capacidad de calcificación tanto del mejillón común (*Mytilus edulis*) como de la ostra del Pacífico (*Crassostrea gigas*) disminuye al aumentar la acidificación<sup>197</sup>. En el 2005, los pescadores estadounidenses capturaron más de 330 mil toneladas métricas de crustáceos y más de 877 mil toneladas métricas de moluscos<sup>198</sup>. Los ingresos estadounidenses asociados al marisco llegaron casi a los 17 millones de dólares durante el año 2005<sup>199</sup>. Una disminución de estas poblaciones por la acidificación tendría enormes repercusiones económicas.



Foto: © OCEANA / ZOE A

**Jurel ojo de caballo (*Caranx latus*)**



Foto: Scott France

**Jardín de corales de aguas profundas**



Foto: Féron Benjamin

**Berberecho común (*Cerastoderma edule*)**



Foto: © OCEANA / ZOE A

**Centollo (*Mithrax spinosissimus*)**

# LLEGANDO AL LÍMITE

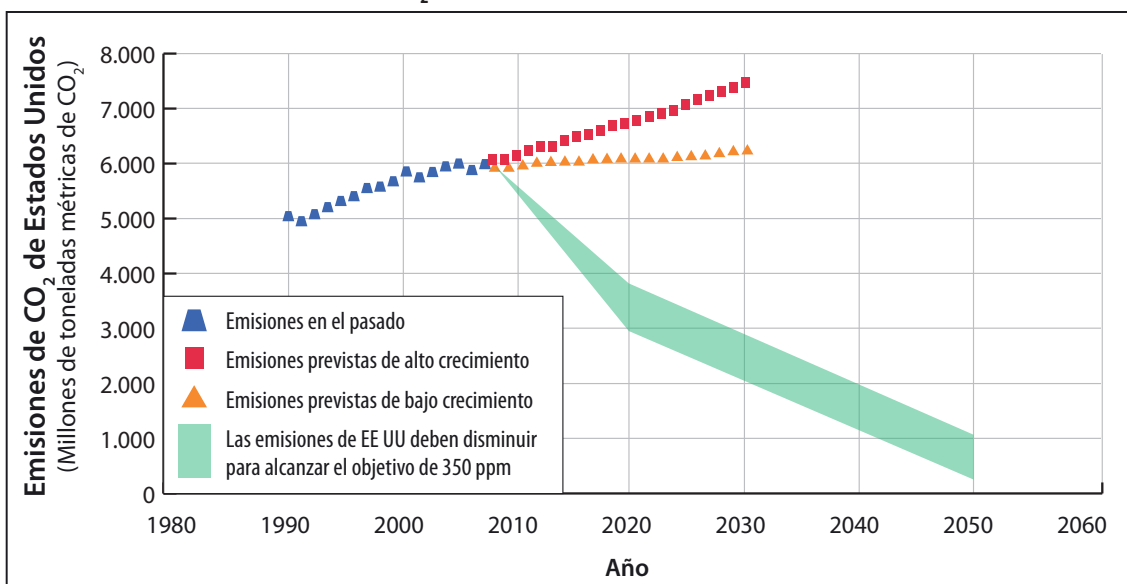
“Si no actuamos antes del 2012, será demasiado tarde. Lo que hagamos en los próximos dos o tres años determinará nuestro futuro. Éste es el momento decisivo”. Dr. Rajendra Pachauri, científico, economista y presidente del IPCC. (2007)

La actual concentración de dióxido de carbono en la atmósfera supera ya los límites de riesgo. Como resultado, se están produciendo importantes cambios en los océanos, desde una disminución en la tasa de crecimiento de la Gran Barrera de Coral hasta el blanqueamiento masivo de corales en los trópicos. Los arrecifes de coral son extremadamente vulnerables a los procesos de acidificación de los océanos y al cambio climático. Son un importante hábitat para una cuarta parte de las especies marinas e igualmente importantes para la vida y sustento de muchas personas. Si permitimos que los arrecifes de coral desaparezcan se producirán cambios drásticos en los océanos y en las vidas de cientos de millones de personas. Lo que les sucede a los arrecifes será un presagio de otros cambios catastróficos que se pueden producir en todo el mundo debido a la acidificación de los océanos y al cambio climático.

Para evitar la pérdida de los arrecifes, y esencialmente impedir una crisis climática, debemos reducir los niveles atmosféricos de dióxido de carbono por debajo de los 350 ppm<sup>200</sup>. Por desgracia, el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera ya ha superado este nivel de riesgo, al rebasar los 385 ppm y continuar en aumento<sup>201</sup>. Dicho nivel además de ser demasiado alto como para proteger los arrecifes del planeta, también está muy por encima de lo que ha estado en toda la historia de la humanidad<sup>202</sup>. De hecho, hasta donde han podido determinar los científicos (800.000 años), el nivel de CO<sub>2</sub> no había superado los 300 ppm<sup>203</sup>.

Si continuamos nuestro ritmo actual de emisiones, superaremos con creces los 350 ppm y no podremos prevenir la extinción de los corales. En la sociedad actual, las emisiones de dióxido de carbono están directamente vinculadas a nuestra creciente necesidad de energía. Datos recientes publicados por U.S. *Energy and Information Administration* (EIA) indican que si

**Cuadro 5: Emisiones previstas de CO<sub>2</sub> de EE UU vs. emisiones necesarias para alcanzar las 350 ppm**



Fuente: Oceana, basado en datos de la EIA (2008) y del IPCC (2007)

seguimos emitiendo CO<sub>2</sub> al mismo ritmo, sin modificar las leyes y políticas actuales, el consumo energético en el 2030 será un 50% superior al registrado en 2005<sup>204</sup>. Esto provocará una subida continua de las emisiones de CO<sub>2</sub> de origen antropogénico, con un 51% más de dióxido de carbono en la atmósfera en el 2030 frente al nivel del 2005, lo cual provocaría concentraciones superiores a los 570 ppm<sup>205</sup>.

Con unos niveles tan altos de CO<sub>2</sub>, la acidificación será extremadamente grave en las próximas décadas. Ya hemos superado la zona de riesgo y los arrecifes comienzan a decaer. Con los actuales niveles de dióxido de carbono, es poco probable que los arrecifes puedan sobrevivir. Sin embargo, si continuamos con las actuales emisiones, los arrecifes podría superar la fase crítica, probablemente cerca de los 450 ppm, pasado el cual los arrecifes, tal y como los conocemos, serían algo excepcional o simplemente inexistentes. Una vez superada dicha fase crítica, los arrecifes disminuirían de forma rápida<sup>206</sup>, al menos la mitad de la vida asociada a los corales será excepcional o se extinguirá y los servicios que los arrecifes proporcionan a millones de personas se pararán. Poco después, los ecosistemas de los arrecifes posiblemente se desmoronarían, quedando tan sólo unos pocos corales calcáreos<sup>207</sup>. Debido a que los arrecifes tardan décadas o incluso siglos en formarse, una vez producido el daño, el impacto será irreversible durante generaciones.



Sin embargo, este escenario no tiene por qué ser el futuro de nuestros océanos. Si tomamos las decisiones correctas podemos salvar de la acidificación y del cambio climático tanto a los arrecifes de coral como a la vida marina asociada a ellos, al igual que a las poblaciones dependientes de los arrecifes, preservaremos la Tierra tal y como la conocemos. Si optamos por un futuro no-dependiente del carbón, las concentraciones de CO<sub>2</sub> se estabilizarán en niveles seguros por debajo de 350 ppm<sup>208</sup>. A este nivel todavía se producirán cambios en los ecosistemas de los arrecifes, pero los corales seguirán estando presentes y seguirán teniendo la capacidad de crear carbonato cálcico<sup>209</sup>.

Para salvar a los arrecifes de la acidificación de los océanos debemos estabilizar la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en los 350 ppm. o por debajo Científicos en busca de otros ecosistemas sensibles han identificado límites similares por encima de los cuales podría haber una recuperación total con la implementación de procesos de realimentación positiva. Al prevenir la acidificación y estabilizar el clima hacia niveles seguros también evitaremos la aparición de otras catástrofes.

No podemos esperar un parón inmediato de las emisiones, pero sí estabilizar los niveles de concentración en 350 ppm<sup>210</sup>. Sin embargo, si continuamos en la zona de riesgo en la que nos encontramos durante más de dos décadas, se producirán cambios insostenibles. Es de vital importancia encontrar el camino adecuado en los próximos años y reducir las emisiones de carbono para que descendan en menos de una década.

El IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) concluyó que para estabilizar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera en 350 ppm, las emisiones mundiales deberían reducirse en un 85% con respecto a los niveles del 2000 antes del 2050<sup>211</sup>, y para ello los países del Anexo I (países industrializados y aquellos con economías en transición, como la Federación Rusa) deberían reducir sus emisiones de carbono entre un 25% y 40% con respecto a los niveles de 1990 antes del 2020, y entre un 80 y 95% antes del 2050. (Véase Cuadro 5). Estos objetivos no son fáciles de alcanzar y por ello Estados Unidos y la comunidad internacional han de comprometerse de inmediato a su consecución.

Nuestra capacidad para establecer y alcanzar metas a corto plazo en los próximos años determinará nuestro éxito para estabilizar el clima. Para conseguir reducciones entre el 25% y el 40% antes de 2020, hemos de actuar de inmediato. Cuanto más tardemos en actuar, más difícil será evitar la catástrofe.

## SOLUCIONES



Muchos de los principales científicos en este campo han demostrado que es posible evitar un cambio climático descontrolado, aunque obviamente no existe ninguna solución milagrosa ni será una tarea fácil. James Hanson, de la NASA, opina que se puede lograr el objetivo de los 350 ppm, necesario para proteger los corales, con el esfuerzo conjunto de individuos, empresas e instituciones de todo el mundo. En su estudio, Pacala y Socolow proponen la combinación de quince soluciones viables, concluyendo:

*“La humanidad ya posee el conocimiento científico, técnico e industrial necesario para resolver el problema del carbono y del clima en los próximos cincuenta años”<sup>212</sup>*

Aunque las reducciones de CO<sub>2</sub> han de ser importantes y han de realizarse a tiempo, hay otras muchas soluciones que abarcan desde la conservación y la eficiencia energética hasta el uso y avance de nuevas tecnologías, fuentes de energía alternativas y uso de combustibles renovables. El abanico de estas posibles soluciones nos permitirá reducir la dependencia del carbón lo que significa la construcción de una economía basada en fuentes de energía renovables como la solar, la eólica y el hidrógeno, y reducir o incluso detener el uso del carbón, a menos que la captura del dióxido de carbono se haga de manera eficiente. Estas soluciones también incluyen un aumento en la eficiencia energética de coches, camiones, trenes, aviones y barcos, así como en el hogar, oficinas, el sector de generación de energía y el industrial, junto con una reducción de la deforestación, a la vez que se plantan más árboles que ayuden a la reducción de los niveles de dióxido de carbono.

En estos momentos en los que el uso de combustibles fósiles es inevitable, las tecnologías capaces de reducir la emisión de contaminantes y aquéllas que son capaces de capturar el dióxido de carbono de la atmósfera tienen un papel importante a la hora de reducir la cantidad de dióxido de carbono. Si se estableciese un impuesto en las emisiones de CO<sub>2</sub>, estas alternativas podrían entrar en el mercado y ser realmente competitivas<sup>213</sup>.

Para evitar la acidificación de los océanos hemos de cambiar la tendencia actual del aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> por la eliminación total de dichas emisiones<sup>214</sup>. Sin embargo, se han sugerido algunas medidas alternativas para tratar la acidificación de los océanos, como es el añadir productos químicos al agua para reducir su acidez. Pero éstas son medidas a corto plazo, provisionales y locales, que no evitarán la acidificación de los océanos a escala mundial<sup>215</sup>.

Además, dichas soluciones podrían causar estragos de consecuencias impredecibles en los ecosistemas más débiles.

Dichas soluciones también han sido propuestas para reducir los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera. Entre ellas aparece la fertilización con hierro y el secuestro de CO<sub>2</sub> en el océano, que no harían sino empeorar el proceso de acidificación<sup>216, 217, 218</sup>. Ambas técnicas deberían ser consideradas con cuidado y utilizadas tan sólo cuando se haya demostrado que son eficientes y que su impacto en el océano es insignificante.

Por desgracia, la acidez de los océanos ya ha aumentado un 30% debido a las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> desde la Revolución Industrial. Pasará un tiempo antes de que las emisiones de carácter antropogénico se reduzcan a niveles adecuados y los niveles de acidificación en los océanos comiencen a disminuir. Por tanto, es de vital importancia que recortemos las emisiones lo antes posible para que las condiciones en los océanos no sean inasumibles para muchos animales marinos. También hemos de hacer lo posible para reducir otras presiones en los ecosistemas marinos, asegurando así su resistencia y supervivencia. Amenazas como la pesca abusiva y técnicas de pesca destructivas, la contaminación y el cambio climático actúan de forma conjunta debilitando los ecosistemas marinos y haciendo que la supervivencia sea cada vez más difícil. Al parar éstas y otras amenazas, podemos dar a los océanos una oportunidad de sobrevivir al inminente proceso de acidificación.

Cualquier decisión que tomemos de ahora en adelante ha de responder a la necesidad de realizar estos cambios. El debate sobre la rentabilidad de los procesos y sobre cómo poner un precio a las emisiones continúa; pero una cosa parece clara: si queremos salvar nuestros arrecifes y pesquerías, así como los ecosistemas que dependen de ellos y todo lo que nos aportan, debemos comenzar de inmediato. Si los países industrializados deben reducir las emisiones entre un 25% y un 40% antes del 2020, no hay tiempo que perder.

Al mismo tiempo, no debería entenderse la acidificación como un motivo para tirar la toalla y pensar que es imposible salvar los océanos: es posible. Al contrario, tenemos que percatarnos de lo seria que es esta amenaza y tomar las decisiones oportunas de inmediato para que la sociedad no dependa de los combustibles fósiles y se dirija a un futuro libre de carbón en el cual los arrecifes y otros organismos marinos no se vean amenazados por la acidificación.

# RECOMENDACIONES

## **Adoptar una política de estabilización del nivel de dióxido de carbono en la atmósfera en los 350 ppm**

Los gobiernos tienen que comprometerse a estabilizar los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera en 350 ppm o menos. Para ello, deben dar importantes pasos en los próximos cinco años para que la sociedad logre alcanzar cero emisiones de carbono en las próximas décadas.

## **Promover la eficiencia energética y reducir el uso de combustibles fósiles**

Se debe impulsar una cultura de ahorro energético y aumentar la eficiencia del combustible de coches, camiones, aviones y barcos, utilizar combustibles más limpios, invertir en un transporte público eficiente y actuar a nivel individual, institucional y empresarial para reducir el uso energético.

## **Pasar a fuentes de energía alternativas**

Se debería prohibir la creación o ampliación de plantas energéticas basadas en carbón, al menos hasta que se puedan atrapar y almacenar de forma segura las partículas contaminantes. En su lugar, tanto los gobiernos como el sector privado deberían implementar programas para estimular el desarrollo y uso de energías renovables, como la solar y la eólica, e invertir en mejorar la red eléctrica para que de esta forma la energía producida a partir de fuentes renovables pueda pasar al mercado de manera rentable. Los gobiernos deben retirar inmediatamente cualquier subvención que fomente el uso de combustibles fósiles. No deberían extraerse combustibles fósiles que se encuentren en ecosistemas especialmente sensibles como el Ártico.

## **Regular las emisiones de carbono**

Los gobiernos deberían comenzar a regular de inmediato las emisiones de carbono, a través de un sistema que integre los costes de emisiones y evite las continuas emisiones que dañan los océanos. Emisiones de dióxido de carbono no reguladas, como las de los barcos y aviones, deberían ser incluidas en un acuerdo post-Kioto y ser reguladas por los correspondientes cuerpos internacionales, como la *International Maritime Organization* y la *International Civil Aviation Organization*.

## **Reducción de otros impactos**

Los ecosistemas marinos deberían protegerse de otras amenazas de origen humano, como la sobreexplotación pesquera y la contaminación. La acidificación de los océanos y el cambio climático no son amenazas aisladas, sino que actúan de forma conjunta con otro tipo de impactos que asolan tanto a ecosistemas como a especies. Los ecosistemas marinos tendrán más posibilidades de sobrevivir a la acidificación del océano si al mismo tiempo no están luchando para superar otras amenazas.

# REFERENCIAS

- 1 Sabine, C.L. *et al.* (2004) The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Science* 305:367-371
- 2 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- 3 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2005) Ocean Model Predictions of Chemistry Changes from Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere and Ocean, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110
- 4 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 5 NASA Jet Propulsion Laboratory; Global Climate Change, NASA's Eyes on the Earth, <http://climate.jpl.nasa.gov/>
- 6 Luthi, Dieter *et al.* (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453:379-382
- 7 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, <http://www.eia.doe.gov/oiiaf/ieo/highlights.html>
- 8 Energy Information Administration (EIA) (2008) International Energy Outlook 2008, Highlights, <http://www.eia.doe.gov/oiiaf/ieo/highlights.html>
- 9 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 10 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 11 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- 12 Luthi, Dieter *et al.* (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453:379-382
- 13 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, *Nature*, 437:681-686
- 14 Caldeira, K. and Wickett, M.E. (2005) Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean, *Journal of Geophysical Research*, 10:C09S04
- 15 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26:445-448
- 16 Fabry, Victoria J. *et al.* (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, *ICES Journal of Marine Science*, 65:414-432
- 17 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO<sub>2</sub> World, *Journal of Geophysical Research*, 110:C09S06
- 18 Fabry, Victoria J. *et al.* (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, *ICES Journal of Marine Science*, 65:414-432
- 19 Feely, Richard, *et al.* (2004) Impacts of Anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> System in the Oceans. *Science*, 305:362-366
- 20 Gazeau, Frederic *et al.* (2007) Impact of Elevated CO<sub>2</sub> on Shellfish Calcification, *Geophysical Research Letters*, 34
- 21 Véase: Bibby, R. *et al.* (2008) Effects of Ocean Acidification on the Immune Response of the Blue Mussel *Mytilus edulis*, *Aquatic Biology*, 2:67-74, Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschläger (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, *Journal of Oceanography*, 60:705-718, Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO<sub>2</sub> on Planktonic Copepods and Sea Urchins, *Journal of Oceanography*, 60:743-750, Castro, K. *et al.* (2006) The Conceptual Approach to Lobster Shell Disease Revisited, *Journal of Crustacean Biology*, 26(4):646-660
- 22 Fabry, Victoria J. *et al.* (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, *ICES Journal of Marine Science*, 65:414-432
- 23 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, *Oceanography*, 20(2):188-195
- 24 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 25 Guinotte, J.M. *et al.* (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? *Frontiers Ecol. Env.* 4:141-146
- 26 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO<sub>2</sub> World, *Journal of Geophysical Research*, 110:C09S06
- 27 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO<sub>2</sub> World, *Journal of Geophysical Research*, 110:C09S06
- 28 FAO (Food and Agriculture Organisation) (2004) The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004, FAO, Rome
- 29 Ishimatsu, Atsushi *et al.* (2004) Effects of CO<sub>2</sub> on Marine Fish: Larvae and Adults, *Journal of Oceanography*, 60:731-741
- 30 Roberts, S. and Hirshfield, M. (2004) Deep Sea Corals: Out of Sight, But no Longer out of Mind, *Front. Ecol. Environ.*, 3:123-130
- 31 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- 32 Hansen, J. *et al.* (2008) Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim?
- 33 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 34 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, *Oceanography*, 20(2):188-195
- 35 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2005) Ocean Model Predictions of Chemistry Changes from Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere and Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 110:C09S04
- 36 Fabry, Victoria J. *et al.* (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, *ICES Journal of Marine Science*, 65:414-432
- 37 Sabine, C.L. *et al.* (2004) The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Science*, 305:367-371
- 38 Watson, A.J. and J.C. Orr (2003) "Carbon dioxide fluxes in the global ocean" In M.J.R. Fasham (Ed.) *Ocean Biogeochemistry*. The IGBP Series, Springer, New York
- 39 Schubert, R. *et al.* (2006) The Future Ocean – Warming Up, Rising High, Turning Sour: Special Report, German Advisory Council on Global Change (WBGU)
- 40 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, *Nature*, 437:681-686
- 41 Caldeira, K. and Wickett, M.E. (2003) Anthropogenic Carbon and Ocean pH, *Nature* 425:365
- 42 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, *Nature*, 437:681-686
- 43 Bindoff, N.L., *et al.* (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 44 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2005) Ocean Model Predictions of Chemistry Changes from Carbon Dioxide Emissions to the Atmosphere and Ocean, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110
- 45 Luthi, Dieter *et al.* (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453:379-382 and Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26:445-448 and Bindoff, N.L., *et al.* (2007) Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 46 Sabine, C.L. *et al.* (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>, *Science* 305: 367-371
- 47 Sabine, C.L. and R. Feely (2007) The Oceanic Sink for Carbon Dioxide In *Greenhouse Gas Sinks*, D. Reay *et al.* (Eds.) CABI Publishing, Oxfordshire, UK
- 48 Sabine, C.L. *et al.* (2004) The

- Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>, Science 305:367-371
- 49 Feely, R.A. *et al.* (2008) Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf, Report, Scienceexpress, 10:1126
- 50 Calculated from: EIA (2007) Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2006, DOE/EIA-0573(2006)
- 51 Luthi, Dieter *et al.* (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, Nature, 453:379-382
- 52 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448
- 53 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 54 Siegenthaler, U. *et al.* (2005) Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene, Science, 310:1313-1317
- 55 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 56 Adaptado de: Fernand, L. and Brewer, P. (Eds) (2007) Report of the Workshop on the Significance of Changing Ocean CO<sub>2</sub> and pH in Shelf Sea Ecosystems, defra and ICES CIEM
- 57 Caldeira, K. and Wickett, M.E. (2003) Anthropogenic Carbon and Ocean pH, Nature 425:365
- 58 Feely, R.A *et al.* (2004) Impact of Anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans, Science 305:362-366
- 59 Veron, J.E.N. (2008) A Reef in Time: The Great Barrier Reef from Beginning to End, Harvard University Press, Sydney
- 60 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448
- 61 Zachos, James, *et al.* (2005) Rapid Acidification of the Ocean During the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, Science, 308:1611-1615
- 62 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195
- 63 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 64 Feely, Richard, *et al.* (2004) Impacts of Anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> System in the Oceans. Science, 305:362-366
- 65 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-First Century and its Impacts on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686
- 66 Fabry, Victoria J. *et al.* (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, ICES Journal of Marine Science, 65:414-432
- 67 Doney, Scott C. (2007) The Dangers of Ocean Acidification, Scientific American, 294:58-65
- 68 Gehlen, M. *et al.* (2007) The Fate of Pelagic CaCO<sub>3</sub> Production in a High-CO<sub>2</sub> Ocean: A model study, Biogeosciences, 5:505-419
- 69 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686
- 70 Gehlen, M. *et al.* (2007) The Fate of Pelagic CaCO<sub>3</sub> Production in a high CO<sub>2</sub> Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519
- 71 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-first Century and its Impact on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686
- 72 Schubert, R. *et al.* (2006) The Future Ocean – Warming Up, Rising High, Turning Sour: Special Report, German Advisory Council on Global Change (WBGU)
- 73 Orr, James C. *et al.* (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-First Century and its Impacts on Calcifying Organisms, Nature, 437:681-686
- 74 Cao L., & Caldeira K. (2008) Atmospheric CO<sub>2</sub> stabilization and ocean acidification. Geophysical Research Letters, in press
- 75 Orr, James C. *et al.* (2006) Arctic Ocean Acidification, EOS Transactions of the American Geophysical Union, 87(36), Ocean Sciences Meeting Supplement, Abstract 0S14B-01
- 76 Bibby, R. *et al.* (2008) Effects of Ocean Acidification on the Immune Response of the Blue Mussel *Mytilus edulis*, Aquatic Biology, 2:67-74
- 77 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 78 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195
- 79 Kleypas, Joan and Chris Langdon (2000) Overview of CO<sub>2</sub>-Induced Changes in Seawater Chemistry, Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia, 2:1085-1089
- 80 Feely, Richard A. (2004) Impact of Anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> System in the Oceans, Science, 305:362-266
- 81 Gehlen, M. *et al.* (2007) The Fate of Pelagic CaCO<sub>3</sub> Production in a high CO<sub>2</sub> Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519
- 82 Kleypas, JA *et al.* (2006) Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A guide for future research, Report on a workshop sponsored by NSF, NOAA, USGS
- 83 Sakai, K. (1998) Delayed maturation in the colonial coral *Goniastrea aspera* (Scleractinia): Whole-colony mortality, colony growth and polyp egg production, Res. Popul. Ecol., 40:287-292
- 84 Kleypas, JA *et al.* (2006) Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A guide for future research, Report on a workshop sponsored by NSF, NOAA, USGS
- 85 Gehlen, M. *et al.* (2007) The Fate of Pelagic CaCO<sub>3</sub> Production in a high CO<sub>2</sub> Ocean: A model study, Biogeosciences, 4:505-519
- 86 Personal correspondence with Ove Hoegh-Guldberg, 24 October 2007
- 87 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195
- 88 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448
- 89 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO<sub>2</sub> World, Journal of Geophysical research, 110:C09S06
- 90 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742
- 91 Cao L., & Caldeira K. (2008) Atmospheric CO<sub>2</sub> stabilization and ocean acidification. Geophysical Research Letters, in press; and Personal correspondence with Ken Caldeira
- 92 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742
- 93 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742
- 94 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26:445-448
- 95 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742
- 96 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742
- 97 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO<sub>2</sub> World, Journal of Geophysical Research, 110
- 98 Stone, Richard (2007) A World Without Corals? Science, 316:678-681
- 99 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science, 318:1737-1742
- 100 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 101 Caldeira, Ken. (2007) What Corals are Dying to Tell Us: About CO<sub>2</sub> and Ocean Acidification, Roger Revelle Commemorative Lecture, Oceanography, 20(2):188-195
- 102 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in Deep-Water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? Coral Reefs, 26(3):445-448
- 103 Roberts, S. and Hirshfield, M. (2004) Deep Sea Corals: Out of Sight, But no Longer out of Mind, Front. Ecol. Environ., 3:123-130
- 104 Husebo, A. *et al.* (2002) Distribution and abundance of fish in deep-sea coral habitats, Hydrobiologia, 471:91-99

- 105 Guinotte, John M. *et al.*. (2006) Will Human-Induced Changes in Seawater Chemistry Alter the Distribution of Deep-Sea Scleractinian Corals? *Frontiers in Ecological Environment*, 4(3):141-146
- 106 Maxwell, S. (2005) An aquatic pharmacy: The biomedical potential of the deep sea. *Current: The Journal of Marine Education* 21(4):31-32
- 107 Erlich, H. *et al.*. (2005) Deep-Sea Bamboo Corals: Living Bone Implants. 3rd International Symposium on Deep-Sea Corals: Science and Management
- 108 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 109 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26:445-448
- 110 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in Deep-Water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26(3):445-448
- 111 Guinotte, J.M. *et al.*. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? *Frontiers Ecol. Env.* 4:141-146
- 112 Guinotte, J.M. *et al.*. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? *Frontiers Ecol. Env.* 4:141-146
- 113 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 114 Roberts, J. Murray, *et al.*. (2006) Reefs of the Deep: The Biology and Geology of Cold-Water Coral Ecosystems, *Science*, 312:543-547
- 115 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 116 ISRS (2007) Coral Reefs and Ocean Acidification Briefing Paper 5, International Society for Reef Studies
- 117 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26:445-448
- 118 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in deep-water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26:445-448
- 119 Guinotte, J.M. *et al.*. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? *Frontiers Ecol. Env.* 4:141-146
- 120 Guinotte, J.M. *et al.*. (2006) Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea corals? *Frontiers Ecol. Env.* 4:141-146
- 121 Raven, John *et al.*. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 122 Caldeira, Ken and Michael E. Wickett (2003) Anthropogenic Carbon and Ocean pH: The coming centuries may see more ocean acidification than the past 300 million years, *Nature*, 425
- 123 Gehlen, M. *et al.*. (2007) The Fate of Pelagic CaCO<sub>3</sub> Production in a high CO<sub>2</sub> Ocean: A model study, *Biogeosciences*, 4:505-519
- 124 Jokiel, P.L. *et al.*. (2008) Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A mesocosm investigation, *Coral Reefs*, 27:473-483
- 125 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 126 Jokiel, P.L. *et al.*. (2008) Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A mesocosm investigation, *Coral Reefs*, 27:473-483
- 127 Jokiel, P.L. *et al.*. (2008) Ocean Acidification and Calcifying Reef Organisms: A mesocosm investigation, *Coral Reefs*, 27:473-483
- 128 Orr, James C. *et al.*. (2005) Anthropogenic Ocean Acidification Over the Twenty-First Century and its Impacts on Calcifying Organisms, *Nature*, 437:681-686
- 129 Aydin, Kerim Y. *et al.*. (2005) Linking ocean food webs to coastal production and growth rates of Pacific Salmon (*Oncorhynchus* spp.), using models on three scales, *Deep Sea Research Part II: tropical Studies in Oceanography*, 52(5-6):757-780
- 130 Fabry, Victoria J. *et al.*. (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, *ICES Journal of Marine Science*, 65:414-432
- 131 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 132 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 133 Gehlen, M. *et al.*. (2007) The Fate of Pelagic CaCO<sub>3</sub> Production in a high CO<sub>2</sub> Ocean: A model study, *Biogeosciences*, 4:505-519
- 134 Iglesias-Rodriguez, M. Debora *et al.*. (2008) Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World, *Science*, 320:336-340
- 135 Tyrell, T *et al.*. (1999) Optical Impacts of Oceanic Coccolithopore Blooms. *Journal of Geophysical Research*, 104(C2):3323-3341
- 136 Vogt, M. *et al.*. (2008) Dynamics of dimethylsulphoniopropionate and dimethylsulphide under different CO<sub>2</sub> concentrations during a mesocosm experiment, *Biogeosciences*, 5:407-419
- 137 Charlson, R., *et al.*. (1987) Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate, *Nature*, 326:655-661
- 138 Nevitt, G. and Haberman, K. (2003) Behavioral attraction of Leach's storm-petrels (*Oceanodroma leucorhoa*) to dimethyl sulfide, *The Journal of Experimental Biology*, 206:1497-1501
- 139 DeBose, J, Lema, S. and Nevitt, G. (2008) Dimethylsulfonylpropionate as a Foraging Cue for Reef Fish, *Science*, 319:1356
- 140 Kowalewsky, S. *et al.*. (2006) High Olfactory Sensitivity for Dimethyl Sulphide in Harbor Seals, *Biology Letters*, 2:106-109
- 141 Shirayama, Y. and H. Thornton (2005) Effect of Increased Atmospheric CO<sub>2</sub> on Shallow Water Marine Benthos, *Journal of Geophysical Research*, 110:C09S08
- 142 Kleypas, JA *et al.*. (2006) Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A guide for future research, Report on a workshop sponsored by NSF, NOAA, USGS
- 143 Raven, John *et al.*. (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, The Royal Society
- 144 Bibby, R. *et al.*. (2008) Effects of Ocean Acidification on the Immune Response of the Blue Mussel *Mytilus edulis*, *Aquatic Biology*, 2:67-74
- 145 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlagler (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, *Journal of Oceanography*, 60:705-718
- 146 Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO<sub>2</sub> on Planktonic Copepods and Sea Urchins, *Journal of Oceanography*, 60:743-750
- 147 Castro, K. *et al.* (2006) The Conceptual Approach to Lobster Shell Disease Revisited, *Journal of Crustacean Biology*, 26(4):646-660
- 148 Personal Communications with Dr. Robert Steneck
- 149 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlagler (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, *Journal of Oceanography*, 60:705-718
- 150 Ishimatsu, Atsushi, *et al.*. (2004) Effects of Carbon Dioxide on Marine Fish: Larvae and Adults, *Journal of Oceanography*, 60: 731-741
- 151 Bibby, R *et al.* (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod *Littorina littorea*, *Biology Letters*, 3:699-701
- 152 Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO<sub>2</sub> on Planktonic Copepods and Sea Urchins, *Journal of Oceanography*, 60:743-750
- 153 Havenhand, Jon. *et al.*. (2008) Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin, *Current Biology*, 18(5):651-652
- 154 Dong, Q.X. *et al.*. (2002) Factors affecting sperm motility of tetraploid Pacific oysters, *Journal of Shellfish Research*, 21:719-723
- 155 Luo, J. *et al.*. (2004) The influence of pH and salinity in hatching rate of egg sac of *Babylonia areolata* and the effect of different diet on the development, survival rate of the larvae, *Marine Sciences/Haiyang Kexue* 28:6:5-9
- 156 Kurinara, H. *et al.*. (2004) Effects of raised CO<sub>2</sub> concentration on the egg production rates and early development of two marine copepods (*Arctia steri* and *Acartia erythraea*), *Marine Pollution Bulletin*, 49:721-727
- 157 Kurihara, Haruko and Atsushi Ishimatsu (2008) Effects of high CO<sub>2</sub> seawater on the copepod (*Acartia tsuensis*) through all life stages and subsequent generations, *Marine Pollution Bulletin*, 56(6):1086-1090
- 158 Testimonio escrito de Ken Caldeira, Climate Change and Acidification are Affecting our Oceans: presentado ante el Subcomité de Pesca, Vida Salvaje y Océanos, del Comité de Recursos Naturales, en la vista "Wildlife and Oceans in a Changing Climate", 17 de abril de 2007
- 159 Portner, Hans O. and S. Zielinski (1998) Environmental Constraints and the Physiology of Performance in Squids, *South African Journal of Marine Science*, 20:207-221

- 160 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlagler (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, *Journal of Oceanography*, 60:705-718
- 161 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlagler (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, *Journal of Oceanography*, 60:705-718
- 162 Bibby, R *et al.* (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod *Littorina littorea*, *Biology Letters*, 3:699-701
- 163 Bibby, R *et al.* (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod *Littorina littorea*, *Biology Letters*, 3:699-701
- 164 Wood, Hannah L. *et al.* (2008) Ocean acidification may increase calcification rates, but at a cost, *Proceedings of the Royal Society B*, 274(1644):1767-1773
- 165 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, *The Royal Society*
- 166 Fabry, Victoria J. *et al.* (2008) Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes, *ICES Journal of Marine Science*, 65:414-432
- 167 Ishimatsu, Atsushi, *et al.* (2004) Effects of Carbon Dioxide on Marine Fish: Larvae and Adults, *Journal of Oceanography*, 60: 731-741
- 168 Kurihara, Haruko, Shinji Shimode and Yoshihisa Shirayama (2004) Sub-Lethal Effects of Elevated Concentration of CO<sub>2</sub> on Planktonic Copepods and Sea Urchins, *Journal of Oceanography*, 60:743-750
- 169 Gazeau, Frederic *et al.* (2007) Impact of Elevated Carbon Dioxide on Shellfish Acidification, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34
- 170 Gazeau, Frederic *et al.* (2007) Impact of Elevated Carbon Dioxide on Shellfish Acidification, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34
- 171 Gazeau, Frederic *et al.* (2007) Impact of Elevated Carbon Dioxide on Shellfish Acidification, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34
- 172 Gazeau, Frederic *et al.* (2007) Impact of Elevated CO<sub>2</sub> on Shellfish Calcification, *Geophysical Research Letters*, 34
- 173 Nagarajan, R., Lea, S., and Goss-Custard, J.D. (2006) Seasonal Variations in Mussel, *Mytilus edulis* L. Shell Thickness and Strength and Their Ecological Implications, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 339:241-250
- 174 Gazeau, F. *et al.* (2007) Impact of Elevated CO<sub>2</sub> on Shellfish Calcification, *Geophysical Research Letters*, 34:L07603
- 175 Michaelidis, B *et al.* (2005) Effects of Long-Term Moderate Hypercapnia on Acid-Base Balance and Growth Rate in Marine Mussels *Mytilus galloprovincialis*, *Marine Ecological Progress*. 293:109-118
- 176 Berge, J.A *et al.* (2006) Effects of Increased Sea Water Concentrations of CO<sub>2</sub> on the Growth of the Bivalve *Mytilus edulis* L., *Chemosphere*, 62:681-687
- 177 Bibby, R *et al.* (2007) Ocean Acidification Disrupts Induced Defences in the Intertidal Gastropod *Littorina littorea*, *Biology Letters*, 3:699-701
- 178 Hoegh-Guldberg, Ove (2005) Low Coral Cover in a High-CO<sub>2</sub> World, *Journal of Geophysical research*, 110:C09S06
- 179 Cesar, H. *et al.* (2003) The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation, *Cesar Environmental Economics Consulting*
- 180 FAO (Food and Agriculture Organisation) (2004) *The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004*, FAO, Rome
- 181 Cesar, H. *et al.* (2003) The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation, *Cesar Environmental Economics Consulting*
- 182 Fernando, H. *et al.* (2005) Coral Poaching Worsens Tsunami Destruction in Sri Lanka, *EOS Trans. AGU*, 86:33
- 183 On Asia's Coasts, Progress destroys natural defenses, *The Wall Street Journal*, Dec 31, 2004, Reported by A. Brown
- 184 Kunkel, C. *et al.* (2006) Coral Reefs Reduce Tsunami Impact in Model Simulations, *Geophysical Research Letters*, 33:L23612
- 185 U.S. EPA; Region 9; Water Program; Oceans, Coasts and Estuaries; Coral Reefs, [www.epa.gov/region09/water/oce/coralreefs.html](http://www.epa.gov/region09/water/oce/coralreefs.html)
- 186 FAO (2007) *The State of World Fisheries and Aquaculture, 2006*, FAO Fisheries and Aquaculture Department
- 187 Ishimatsu, Atsushi *et al.* (2004) Effects of CO<sub>2</sub> on Marine Fish: Larvae and Adults, *Journal of Oceanography*, 60:731-741
- 188 Kokita, T. and A. Nakazono (2001) Rapid response of an obligately corallivorous filefish *Oxymonacanthus longirostris* (Monacanthidae) to a mass coral bleaching event, *Coral Reefs*, 20:155-158
- 189 Turley, C.M., J.M. Roberts and J.M. Guinotte (2007) Corals in Deep-Water: Will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems? *Coral Reefs*, 26(3):445-448
- 190 Roberts, S. and Hirshfield, M. (2004) Deep Sea Corals: Out of Sight, But no Longer out of Mind, *Front. Ecol. Environ.*, 3:123-130
- 191 Pritchard, E. S. (Ed) (2008) *Fisheries of the United States, 2007*, National Marine Fisheries Service, Office of Science and Technology, [http://www.st.nmfs.noaa.gov/st1/fus/fus07/fus\\_2007.pdf](http://www.st.nmfs.noaa.gov/st1/fus/fus07/fus_2007.pdf)
- 192 Portner, Hans O., *et al.* (2004) Biological Impact of Elevated CO<sub>2</sub> Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth history, *Journal of Oceanography*, 60:705-718
- 193 Portner, Hans O., Martina Langenbuch and Anke Reipschlagler (2004) Biological Impact of Elevated Carbon Dioxide Concentrations: Lessons from animal physiology and Earth History, *Journal of Oceanography*, 60:705-718
- 194 Guinotte, John M. and Victoria J. Fabry (2008) Ocean Acidification and Its Potential Effects on Marine Ecosystems, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134:320-342
- 195 FAO (Food and Agriculture Organisation) (2004) *The State of the World Fisheries and Aquaculture 2004*, FAO, Rome
- 196 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, *The Royal Society*
- 197 Gazeau, Frederic *et al.* (2007) Impact of Elevated CO<sub>2</sub> on Shellfish Calcification, *Geophysical Research Letters*, 34
- 198 FIGIS: Global Production Statistics 1950-2005: [www.fao.org/figis](http://www.fao.org/figis)
- 199 NMFS: Annual Commercial Landing Statistics; [www.st.nmfs.noaa.gov/pls/webpls/FT\\_HELP.SPECIES](http://www.st.nmfs.noaa.gov/pls/webpls/FT_HELP.SPECIES)
- 200 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742 and *Pers. Comm.* Ove Hoegh-Guldberg and Hansen, J. *et al.* (2008) Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2:217-231
- 201 NASA Jet Propulsion Laboratory; Global Climate Change, NASA's Eyes on the Earth, <http://climate.jpl.nasa.gov/>
- 202 Luthi, Dieter *et al.* (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453:379-382
- 203 Luthi, Dieter *et al.* (2005) High-resolution in carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present, *Nature*, 453:379-382
- 204 Energy Information Administration (EIA) (2008) *International Energy Outlook 2008, Highlights*, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html>
- 205 Energy Information Administration (EIA) (2008) *International Energy Outlook 2008, Highlights*, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html>
- 206 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 207 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 208 Hansen, J. *et al.* (2008) Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim?
- 209 Hoegh-Guldberg, Ove *et al.* (2007) Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, *Science*, 318:1737-1742
- 210 Hansen, J. *et al.* (2008) Target Atmospheric CO<sub>2</sub>: Where Should Humanity Aim?
- 211 IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- 212 Pacala, S. and R. Socolow (2004) Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, *Science*, 305:968-972
- 213 Energy Information Administration (EIA) (2008) *International Energy Outlook 2008, Highlights*, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html>
- 214 Matthews, H. Damon and Ken Caldeira (2008) Stabilizing climate requires near-zero emissions, *Geophysical Research Letters*, 35:L04705
- 215 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, *The Royal Society*
- 216 Hawkins, D.G. (2004) No Exit: Thinking about leakage from geologic carbon storage sites, *Energy*, 29:1571-1578
- 217 Raven, John *et al.* (2005) Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide, *The Royal Society*
- 218 Busseler, Ken O. *et al.* (2008) Ocean Iron Fertilization – Moving Forward in a Sea of Uncertainty, *Science*, 319:162



**OCEANA**

Protegiendo los  
Océanos del Mundo.

[www.oceana.org/climate](http://www.oceana.org/climate)

**Plaza de España - Leganitos, 47**  
28013 Madrid (España)  
Tel.: + 34 911 440 880  
Fax: + 34 911 440 890  
[europa@oceana.org](mailto:europa@oceana.org)  
[www.oceana.org](http://www.oceana.org)

**Rue Montoyer, 39**  
1000 Bruselas (Bélgica)  
Tel.: + 32 (0) 2 513 22 42  
Fax: + 32 (0) 2 513 22 46  
[europa@oceana.org](mailto:europa@oceana.org)

**1350 Connecticut Ave., NW, 5th Floor**  
Washington D.C., 20036 USA  
Tel.: + 1 (202) 833 3900  
Fax: + 1 (202) 833 2070  
[info@oceana.org](mailto:info@oceana.org)

**175 South Franklin Street - Suite 418**  
Juneau, Alaska 99801 (USA)  
Tel.: + 1 (907) 586 40 50  
Fax: + 1(907) 586 49 44  
[northpacific@oceana.org](mailto:northpacific@oceana.org)

**Avenida General Bustamante, 24, Departamento 2C**  
750-0776 Providencia, Santiago (Chile)  
Tel.: + 56 2 795 7140  
Fax: + 56 2 795 7146  
[americadelsur@oceana.org](mailto:americadelsur@oceana.org)

Oceana trabaja para proteger y recuperar los océanos del mundo. Nuestros equipos de científicos marinos, economistas, abogados y otros colaboradores están consiguiendo cambios específicos y concretos en la legislación para reducir la contaminación y prevenir el colapso irreversible de los stocks pesqueros, proteger a los mamíferos marinos y otras formas de vida marina. Oceana es una organización internacional dedicada a la conservación y cuenta con oficinas en Norteamérica, Europa y Sudamérica. Más de 300.000 colaboradores y ciberactivistas en 150 países se han unido ya a Oceana. Para más información, visite [www.oceana.org](http://www.oceana.org).

