

LOS PELIGROS DE LA ACIDIFICACIÓN OCEÁNICA

Scott C. Doney (*)

En esos años -1950- no se sabía con certeza qué pasaba con el dióxido de carbono (CO_2) expulsado por las chimeneas de las grandes fábricas: si se acumulaba realmente en la atmósfera, o era absorbido por las aguas de los mares y por las plantas en crecimiento de la Tierra.

En 1956 el investigador geoquímico Roger Revelle, acompañado por otro joven científico, Charles D. Keeling, acordaron que, para obtener conclusiones, se imponía hacer mediciones de la concentración del gas en distintos lugares. Instalaron dos equipos para la captación del gas carbónico: uno de ellos en un lugar muy alejado de la actividad industrial, el Polo Sur, para evitar variaciones erráticas en las mediciones; y el segundo, más cercano, en Hawai, en la cima del Monte Mauna.

El monitoreo del Monte Mauna, que ha continuado desde 1958 hasta la fecha, ha permitido comprobar que al final de cada año los niveles de dióxido de carbono eran mayores que los de los años anteriores. Los cálculos de Revelle demostraron que gran parte del gas liberado permanecía en la atmósfera, pero que una parte sustancial era absor-



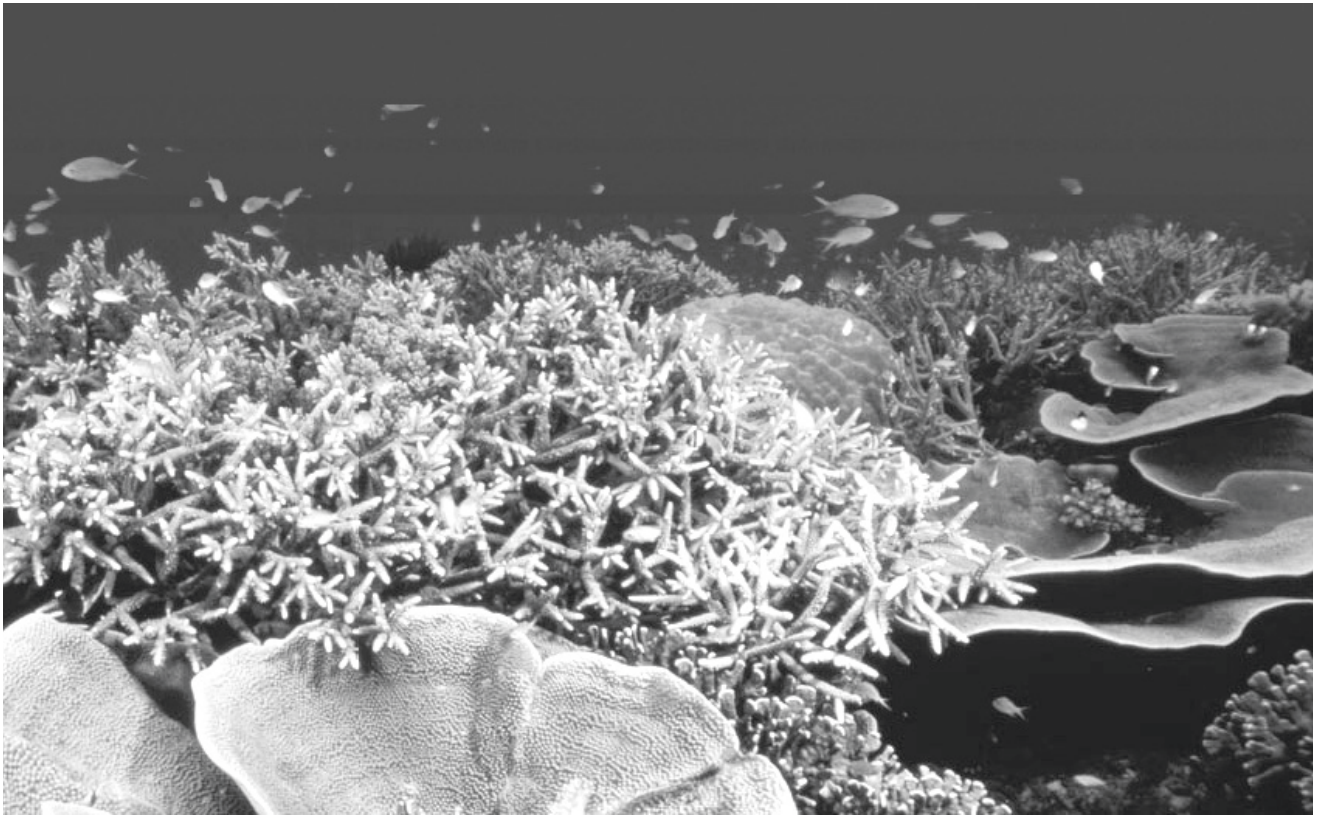
Gran parte del dióxido de carbono liberado por la quema de combustibles fósiles va al océano en donde altera el equilibrio ácido del agua marina. Las repercusiones para la vida marina podrían ser enormes.

Scott C. Doney 1950.

bida por las aguas de los océanos, lo que podría alterar en forma fundamental la composición química del agua marina.

La información de Keeling basada en los registros obtenidos durante cincuenta años fue considerada muy valiosa por el mundo científico, pero se argumentó que el lapso de cincuenta años era demasiado corto como para obtener conclusiones definitivas.

Pero pronto se pudo resolver este problema de una perspectiva a mayor plazo, mediante la medición de las burbujas de aire atrapadas en



ha permitido obtener estas conclusiones: que la concentración de dióxido de carbono se mantuvo aproximadamente constante durante miles de años y empezó a crecer rápidamente hacia 1800, con el comienzo de la industrialización; que actualmente la concentración de este gas es un 30% mayor de lo que era unos cientos de años atrás, y se espera que su nivel se duplique para fines de este siglo.

La fuente principal de emisión de gas carbónico, proviene de la quema de combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural, y una parte, muy reducida, de la producción de cemento que utiliza caliza –carbonato de calcio– como materia prima, y de la quema de selvas tropicales, afirmación que se puede comprobar por ser distintos los átomos de carbono provenientes de los combustibles fósiles, a los de la combustión de los organismos vivos. Así, el dióxido de carbono originado por la combustión de fósiles contiene, a diferencia de los constituyentes de los organismos vivos, poco o nada

de la forma radiactiva del carbono (el carbono 14).

En cuanto a las tasas de absorción del dióxido de carbono derivado del combustible fósil, se acepta que un 40% permanece en la atmósfera, y el resto es absorbido en partes iguales por la vegetación terrestre y por los océanos.

Aun cuando la cantidad de dióxido de carbono absorbido por los océanos es muy grande, su concentración, dado el inmenso volumen ocupado por las aguas, es muy pequeña. Por lo tanto su medición requiere la aplicación de métodos muy precisos que permitan determinar una parte del gas absorbido en mil partes de agua.

Además, como estas cantidades varían sustancialmente de un lugar a otro, se impone su determinación en las diversas partes del mundo para obtener un promedio de las mismas. Eso es lo que llevaron a cabo algunos oceanógrafos: una evaluación global entre 1980 y 1990.

Sin embargo, estos estudios realizados no permitían identificar qué

parte del carbono correspondía al absorbido por las aguas y qué parte era natural. Recién en 1996 el científico Nicolás Gouber, de la Universidad de California, y sus colaboradores desarrollaron una técnica que permitió resolver el problema. Esta técnica, aplicada a los datos obtenidos entre 1980 y 1990, permitió llegar, en 2004, a esta conclusión: el océano ha absorbido completamente la mitad de todo el dióxido de carbono, liberado a la atmósfera desde el comienzo de la Revolución Industrial.

Para una mayor documentación de este proceso se han repetido mediciones en una misma porción de océano –espaciadas una década una de otra– que permiten revelar la tendencia global por la quema de combustible.

Un barco de investigación, integrado por 31 científicos, técnicos y estudiantes estuvo obteniendo muestras, durante dos meses, y analizando las propiedades físicas y químicas de las aguas del Atlántico sudoccidental, desde la superficie

Un estudio más riguroso –químico y matemático– sobre la acidificación de las aguas oceánicas

El Departamento de Química Analítica de la Facultad de Ciencias Exactas de nuestra Universidad, a nuestra solicitud, realizó un estudio riguroso –desde el punto de vista químico y matemático– de todos los fenómenos que se producen cuando el dióxido de carbono atmosférico se disuelve en aguas del océano.

La conclusión final obtenida fue la siguiente: el dióxido de carbono, al disolverse en el agua, produce un aumento de su grado de acidez (disminución del pH), lo que provoca la disolución del carbonato de calcio que se encuentra en los sedimentos marinos.

A continuación, en forma resumida y accesible, explicaremos el camino seguido para obtener esta conclusión.

En primer lugar, se consideraron todas las reacciones que pueden originarse cuando las aguas oceánicas absorben gas carbónico de la atmósfera. Además, para su estudio cuantitativo, se tomaron en cuenta los valores de sus constantes de equilibrio. En forma sencilla, así se puede explicar este concepto.

Todas las reacciones químicas son dinámicas y reversibles, es decir que se producen tanto de izquierda a derecha como de derecha a izquierda. Llega el momento en que se alcanza un estado de equilibrio, caracterizado porque las velocidades en ambos sentidos se igualan.

En consecuencia, al igualarse las velocidades de reacción en ambas direcciones ($v_1=v_2$), las concentraciones de los reactivos y de los productos de reacción permanecerán constantes.

Un ejemplo: en la reacción hipotética:

$A + 2B = C + 2D$, su constante de equilibrio quedará expresada así:

$$K_e = \frac{[C][D]^2}{[A][B]^2}$$

[] indica concentración molar

Las constantes de equilibrio de distintas reacciones químicas están tabuladas en condiciones denominadas normales, que son temperatura (25°C); presión (1 atm.) y concentración molar, expresada en gramos por litro. Un valor grande de K_e (positivo) indica que en la reacción prevalece un desplazamiento de izquierda a derecha; un valor bajo, negativo, que el sentido prevaleciente de la reacción es de derecha a izquierda.

Otro aspecto considerado en este estudio es el siguiente: si en el fenómeno analizado se produce una serie de reacciones, su resultado final es el que resulta de la suma de todas las reacciones parciales, en la que se anulan los términos comunes que figuran en ambos miembros. Además, se demuestra en forma matemática,

que la constante de equilibrio de la reacción total, se obtiene multiplicando las constantes de equilibrio de las reacciones parciales.

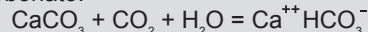
El sistema en estudio, disolución del dióxido de carbono atmosférico en las aguas oceánicas, es bastante complejo porque son muchas las reacciones que se producen.

En primer lugar, el dióxido de carbono de la atmósfera al ser absorbido por las aguas provocará un aumento en la concentración del gas disuelto, una parte del cual reaccionará con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido débil se disocia en iones hidrógeno y anión bicarbonato (HCO_3^-), que a su vez puede disociarse en iones hidrógeno y anión carbonato (CO_3^{2-}).

El análisis químico de las aguas revela que de todas las especies formadas, el anión bicarbonato (HCO_3^-) es el que prevalece; la concentración del dióxido de carbono que permanece disuelto en el agua es muy pequeña, y depende de la temperatura y de la presión. Cuanto menor es la temperatura y mayor la presión de gas, mayor será la concentración del gas disuelto.

En este sistema complejo hay que incluir una sustancia muy poco soluble, el carbonato de calcio, que se encuentra presente en los sedimentos marinos, y, además, en muchos organismos que se desarrollan en las profundidades de los mares, y se cubren, para su desarrollo, de capas de este compuesto.

La reacción final de este sistema complejo indica que el carbonato de calcio, en presencia de dióxido de carbono y agua, puede disolverse originando iones calcio y bicarbonato:



El valor de su constante de equilibrio es de $6,1 \times 10^{-6}$, lo que indica, en condiciones normales, su desplazamiento de la reacción de derecha a izquierda. Pero hay que tener presente que en las aguas profundas, muy frías, se eleva la concentración del gas disuelto, lo que produce, en parte que el desplazamiento de la reacción hacia la derecha sea más intenso.

Hasta ahora –datos de 2005– el aumento de la acidez verificado en las aguas de los océanos está dado por una disminución de 0,1 de su pH neutro (7); para 2100 de mantenerse las mismas condiciones de contaminación, se espera que el pH descienda a 6,7.

Conviene recordar que, por la definición del pH, la disminución en una unidad del mismo significa un aumento en la concentración del ión hidrógeno diez veces mayor.

Agradecimiento:

A la Dra. Liliana Bruzzone y al Dr. Ángel Nardillo por la valiosa y desinteresada colaboración.

hasta el fondo. El recorrido se inició cerca de la Antártida y terminó cerca del Ecuador, abarcando la misma porción de océano medida por primera vez en 1989.

Cuando se compararon los resultados de 1989 con los obtenidos 16 años después –en 2005– pudo

comprobarse que los primeros centenares de metros del nivel superior del Atlántico Sur contenían concentraciones superiores a las determinadas en 1989, lo que prueba que el mar está incorporando dióxido de carbono atmosférico. Otros oceanógrafos han hallado

tendencias similares en los océanos Pacífico e Índico.

Estas comprobaciones han provocado alarma en el mundo científico, y puesto atención en los fenómenos químicos que se producen en las aguas de los mares por la incorporación de dióxido de carbono de la

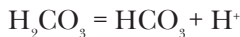
atmósfera, que termina por afectar este hábitat natural.

Absorción de dióxido de carbono y aumento de la acidez

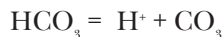
Las reacciones químicas que se producen al incorporarse el gas carbónico al agua, son bastante complejas; su resultado final, un aumento de la acidez, en forma somera puede explicarse así: el dióxido de carbono absorbido (CO_2) reacciona con el agua para dar ácido carbónico (H_2CO_3).



Una pequeña porción de este ácido débil se disocia originando iones bicarbonato (HCO_3^-) e hidrógeno (H^+)



Y una porción aún más pequeña de bicarbonato se disocia produciendo iones carbonato (CO_3^{2-}) e hidrógeno (H^+)



El agua pura es un electrolito muy débil de reacción neutra, ya que al disociarse produce cantidades equivalentes de iones hidrógeno y de iones oxhidrilos. La concentración de estos iones es muy baja (igual a 10^{-7})
 $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$ (en el agua pura)

La variación de la concentración de iones hidrógeno al disolverse en dióxido de carbono en las aguas marinas es muy pequeña; trabajar con valores tan reducidos resulta, además de fatigoso, confuso para apreciar la significación de los nuevos registros.

Por ello, los químicos han adoptado una convención: expresan la concentración de iones hidrógeno en términos de pH, en estas formas:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

por lo que el pH de una solución neutra será 7:

$$\text{pH} = -\log 10^{-7} = 7$$

De acuerdo a esta convención

Una opinión del Dr. Rosendo Pascual

Calentamiento global y acidificación de los océanos; ¿ingredientes conducentes a nueva “era” glacial?

Como lo expone Scott C. Doney en el trabajo nombrado, la sin tregua acidificación de los océanos tiene efectos ocultos a la vista de la gente, pero su acelerada continuidad está produciendo dramáticas alteraciones del medio marino, que en la actualidad parecen inevitables. Aparte de los efectos letales sobre la biota marina, el ciclo del agua en la Naturaleza, ¿se verá alterado de tal manera que nos podamos quedar sin la “gran fuente de agua pura”, que sostiene la vida en la Tierra? Por otro lado, oportuno es recordar que la formación del istmo centroamericano, que por fines del Cuaternario cerró la comunicación de los océanos Atlántico y Pacífico, llevó a que la consecuente cálida Corriente del Golfo calentara el Atlántico Norte; se afirma que el resultante aumento de la precipitación produjo el incremento de la humedad y que ésta intensificó la glaciación en aquel hemisferio. ¿No será posible que de persistir la situación actual los vientos fríos surgidos de los enfriados océanos en su choque con aquellos calientes, surgidos de los continentes afectados por el calentamiento global, a la inversa que en el hemisferio norte, también podrían llevar a intensificar una nueva “era” glacial?

un pH menor de 7 indicará solución ácida; mayor de 7, solución alcalina.

Variaciones registradas del pH

Hasta el momento la disminución del pH registrado en las aguas es aproximadamente 0,1; los científicos predicen que si sigue aumentando la emisión de dióxido de carbono, en el 2100 la acidez de las aguas oceánicas aumentará en forma notable, hasta alcanzar un pH = 6,7.

Con respecto a los valores de absorción del dióxido de carbono por el agua, debe advertirse que su concentración aumenta en las aguas más profundas, ya que la solubilidad del gas se eleva con la disminución de temperatura del agua y con el aumento de la presión que soporta. En consecuencia, el grado de acidez aumenta a mayor nivel de profundidad.

Peligros de la acidificación oceánica

Estos cambios de pH registrados pueden parecer pequeños, pero han provocado alarma; el aumento de acidez resultó muy dañino para

algunas formas de la vida marina, en particular para los organismos en los cuales la construcción de sus valvas de carbonato de calcio dependerá de la concentración de iones carbonato, que disminuye en presencia de iones hidrógeno por formación de carbonato ácido (HCO_3^-).

Entre las formas más expuestas a este peligro se encuentran las que constituyen algunos tipos de plancton –comunidades de vegetales y animales que viven flotando– que se cubren de plaquitas de carbonato de calcio, necesarias para su crecimiento.

Otros ejemplares importantes en peligro son los de los organismos planctónicos llamados foraminíferos y la de los pterópodos, que son pequeños caracoles marinos, que forman esqueletos de aragonita y constituyen una de las principales fuentes de alimentos para los peces y los mamíferos marinos, entre ellos algunas especies de ballenas.

La concentración de iones carbonato, indispensables para la formación de carbonato de calcio en sus dos formas cristalinas –aragonita, cristales rómbicos, y calcita, cristales

triangulares- varía con el nivel de profundidad de las aguas.

Así, en las aguas profundas, más frías, aumenta la absorción de dióxido de carbono atmosférico y, en consecuencia, su grado de acidez, alcanzando un nivel suficiente para la disolución de las conchas de carbonato de calcio. Se dice de esta agua que están subsaturadas con respecto a la presencia de carbonato de calcio.

En cambio, las aguas poco profundas, inmediatas a la superficie, son cálidas y disuelven, comparativamente, poco dióxido de carbono. En consecuencia, su nivel de acidez resulta insuficiente para disolver al carbonato de calcio. Estas aguas se califican como sobresaturadas con respecto a la presencia de esta sal, que no muestra tendencia a disolverse allí.

Se admite, pues, que por influjo del dióxido de carbono presente en la atmósfera, los niveles de saturación de carbonato de calcio en las aguas oceánicas se han desplazado más cerca de la superficie -entre 50 y 200 metros- en comparación con las posiciones que tenían en el siglo XIX. Y los estudios recientes indican que habrá más ascenso durante las próximas décadas.

De esta manera, a medida que el océano se hace más ácido, la posición superior de las aguas favorables a la formación de valvas de carbonato de calcio, se hará más delgada. Esto significa que se reducirán cada vez más las partes del mar que favorezcan el desarrollo de los organismos calcificantes. El hecho de que estos pequeños organismos sean un eslabón clave en la cadena alimentaria del Océano Sur, que sostiene grandes poblaciones de peces, ballenas y aves marinas, es causa de una intensa preocupación entre los científicos.

Los biólogos temen también por la suerte de los corales, los cuales a pesar de su apariencia vegetal son

en realidad colonias de pequeños animales, que se alimentan filtrando plancton del agua y segregan esqueletos de carbonato de calcio. Los llamados arrecifes de coral están formados por la acumulación de estos pequeños esqueletos. Las algas coralinas, que también segregan carbonato de calcio y a menudo se parecen a los corales, contribuyen también a la calcificación de muchos arrecifes. Muchas de ellas viven en comunidades muy profundas y frías, que por absorber mucho dióxido de carbono, pueden llegar a tener un grado de acidez suficiente como para disolver los esqueletos de carbonato de calcio.

En resumen: los corales y otros animales marinos calcificantes no sólo podrían ser afectados en su etapa de crecimiento, sino que también sus conchas de carbonato de calcio podrían disolverse. El descenso de la cantidad de pterópodos afectará a otras partes del ecosistema marino por el hecho de que estos pequeños caracoles son un eslabón clave en la cadena alimentaria del Océano Sur, el cual contiene grandes poblaciones de peces, ballenas y aves marinas. Los ecosistemas de mayores latitudes y mayores profundidades serían los primeros en sufrir las consecuencias de la acidificación oceánica, porque en ellos aumenta la absorción del dióxido de carbono atmosférico y, en consecuencia, su grado de acidez.

Para los científicos la perspectiva de los arrecifes coralinos es aún más desoladora. Estos preciosos ecosistemas están no sólo afectados por la acidificación oceánica, sino también por el calentamiento global, la contaminación local y la sobrepesca. Muchos arrecifes de coral que vienen declinando, podrían ser empujados a su desaparición por la acidificación oceánica.

Las investigaciones científicas para determinar mejor la respuesta de los ecosistemas oceánicos ante la

acidificación no reconocen tregua. Algunos científicos han montado estudios de campo en pequeña escala para examinar los efectos agudos que tendrían lugar por la eliminación deliberada de dióxido de carbono atmosférico en los mares profundos. Otra posibilidad contemplada para obtener una evaluación más realista del problema sería la de elevar artificialmente el nivel de gas carbónico sobre un arrecife de coral. Otra forma considerada para la mejor comprensión del problema sería la de estudiar a los organismos marinos que viven en aguas ácidas -de bajo pH- desde hace mucho, como ocurre en las Islas Galápagos, bañadas por aguas que son naturalmente ricas en dióxido de carbono.

La principal preocupación de muchos científicos hoy en día es que el episodio de acidificación actual está ocurriendo mucho más rápidamente de los que tuvieron lugar en el pasado, por lo que no da tiempo a que las especies oceánicas se adapten a estos cambios. Aunque los efectos puedan estar ocultos a la vista de la gente, las dramáticas alteraciones del ambiente marino parecen inevitables.

**Doney, Scott C. 2006. The dangers of ocean acidification. Scientific American 294(3):38-45.*

La nota que se incluye es una reproducción resumida de este artículo.