

Indicadores globales del clima: contenido calorífico, acidificación, desoxigenación y carbono azul de los océanos

por Kirsten Isensee¹, Katherina Schoo¹, John Kennedy², Karina von Schuckmann³, Omar Baddour⁴ y Maxx Dilley⁴

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha venido publicando informes anuales sobre el estado del clima mundial desde 1993. En 2020 publicó un [informe quinquenal de los años comprendidos entre 2015 y 2019](#) en el que se incorporan datos y análisis del estado del clima mundial en dicho período. El objetivo inicial de la publicación anual era informar a los Miembros acerca de las tendencias climáticas, los fenómenos extremos y los impactos asociados. En 2016 dicho objetivo se amplió para incluir resúmenes de los indicadores climáticos fundamentales, con el fin de informar a los delegados de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Los resúmenes sintetizan los análisis de datos de los últimos años de la atmósfera, la tierra, el océano y la criosfera. Los indicadores climáticos relacionados con los océanos son cuatro: [el contenido calorífico de los océanos](#), [el nivel del mar](#), [la extensión del hielo marino](#) y [la acidificación de los océanos](#).

Este artículo pone el énfasis en el contenido calorífico del resumen del Estado del clima mundial de 2020, y en la acidificación, la desoxigenación y el carbono azul de los océanos de los informes de la OMM sobre el Estado del clima mundial de los años 2018, 2019 y 2020.

Contenido calorífico del océano

En la década de 1940, las medidas de contenido calorífico del océano se basaban sobre todo en técnicas realizadas

- 1 Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la Secretaría de la UNESCO
- 2 Centro Hadley de Predicción e Investigación Climática (Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte)
- 3 Mercator Ocean International (Francia)
- 4 Secretaría de la OMM

a bordo de barcos, lo que limitaba la capacidad de hacer observaciones de temperatura subsuperficial a escala global y en profundidad (Abraham y otros, 2013). Es por esto que, frecuentemente, las estimaciones a escala global del contenido calorífico del océano solo abarcan períodos temporales posteriores a 1960 y únicamente integran datos verticales desde la superficie hasta una profundidad de 700 metros (m). Con el despliegue de la red Argo de flotadores perfiladores autónomos, que alcanzó su objetivo de cobertura en 2006, ahora es posible medir de forma rutinaria los cambios en el contenido calorífico del océano hasta una profundidad de 2 000 m (Roemmich y otros, 2019) (figura 1).

El resumen sobre el contenido calorífico del océano, proporcionado por Mercator Ocean (Francia), afirma que el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero está causando un desequilibrio radiativo positivo en la parte superior de la atmósfera —denominado “desequilibrio energético de la Tierra”— que está impulsando el calentamiento global mediante la acumulación de energía en forma de calor en el sistema Tierra (Hansen y otros, 2011; Rhein y otros, 2013; [von Schuckmann y otros, 2006](#)). Este desequilibrio energético es la parte del forzamiento radiativo al que el sistema climático de la Tierra todavía no ha respondido (James Hansen y otros, 2005), y representa un indicador del calentamiento global que se producirá en ausencia de cambios ulteriores en el forzamiento (Hansen y otros, 2017). El contenido calorífico del océano es una medida de esta acumulación de calor en el sistema Tierra causada por un desequilibrio energético positivo, ya que la mayor parte del mismo (en torno a un 90 %) se almacena en los océanos del mundo; en consecuencia es también un indicador crítico del cambio climático.

Consecuentemente, el océano se está calentando, lo que tiene efectos de gran alcance en el sistema climático de la Tierra. Por ejemplo, el aumento del contenido calorífico

de los océanos contribuye en más de un 30 % a la elevación del nivel medio del mar observada a escala mundial a raíz de la expansión térmica del agua marina (WCRP, 2018). El calentamiento de los océanos está alterando las corrientes oceánicas (Yang y otros, 2016; Voosen, 2020; Yang y otros, 2020; Hoegh-Guldberg y otros, 2018) y, de forma indirecta, las trayectorias de las tormentas (Hoegh-Guldberg y otros, 2018; Trenberth y otros, 2018; Yang y otros, 2016). Las consecuencias del calentamiento de los océanos también se extienden a la criosfera de la Tierra, dado que las plataformas de hielo flotante pierden grosor y las capas de hielo disminuyen (ej. Serreze y Barry, 2011; Shi y otros 2018; Polyakov y otros, 2017; Straneo y otros, 2019; Shepherd y otros, 2018). El calentamiento de los océanos aumenta su

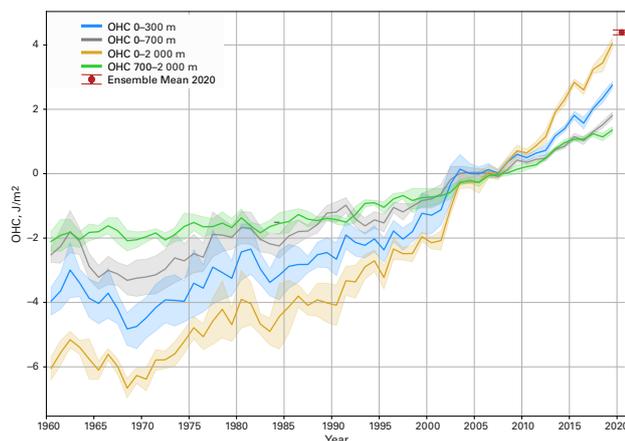


Figura 1. Series temporales medias por conjuntos 1960-2019 y desviación típica por conjuntos (2σ , sombreado) de las anomalías del contenido calorífico oceánico (en la figura, OHC) global con respecto a la climatología del período 2005-2017 para las capas con profundidades entre 0 y 300 m (gris), entre 0 y 700 m (azul), entre 0 y 2 000 m (amarillo) y entre 700 y 2 000 m (verde). La media por conjuntos es resultado del esfuerzo internacional concertado, y todos los productos utilizados aparecen referenciados en la leyenda de la figura 2 (no mostrada). Las tendencias obtenidas a partir de las series temporales aparecen en la tabla 1 (no mostrada). Téngase en cuenta que los valores se refieren al área superficial oceánica comprendida entre 60°S y 60°N, y están respectivamente limitados a la batimetría de 300 m de cada producto.

Fuente: actualizada a partir de von Schuckmann y otros (2020). Se ha añadido la anomalía de la media por conjuntos del contenido calorífico oceánico (entre 0 y 2 000 m) con respecto a la climatología del período 1993-2020, que aparece indicada como un punto rojo junto con su margen de conjunto, y se basa en productos del Servicio de Vigilancia Medioambiental Marina de Copernicus (CORA). (Cheng y otros, 2017; Ishii y otros, 2017).

estratificación (Li y otros, 2020) y, junto con la acidificación y la desoxigenación de sus aguas, puede provocar cambios drásticos en el ensamblaje de los ecosistemas y la biodiversidad, la extinción de poblaciones y la decoloración coralina (ej. Gattuso y otros, 2015, Molinos y otros, 2016, Ramírez y otros, 2017).

Acidificación oceánica

Desde 2017, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), apoyada por la Red Mundial de Observación de la Acidificación de los Océanos (GOA-ON), aporta al informe anual del Estado del clima mundial un resumen de la acidificación oceánica.

A lo largo de la última década, los océanos han absorbido en torno al 23 % de las emisiones antropógenas anuales de CO_2 (Friendlingstein y otros, 2020). El CO_2 absorbido reacciona con el agua del mar y modifica el pH del océano. Este proceso se denomina acidificación de los océanos. Los cambios en el pH están relacionados con variaciones en la química oceánica de los carbonatos que pueden afectar a la capacidad de los organismos marinos, tales como los moluscos y los corales de arrecife, para generar y mantener caparazones y material esquelético. Por esta razón es particularmente importante caracterizar las variaciones en la química de los carbonatos oceánicos de forma completa. Las observaciones realizadas en mar abierto durante los últimos 30 años ponen de manifiesto un descenso evidente del pH (figura 2). Desde el comienzo de la revolución industrial (1750) se ha producido una disminución del pH superficial oceánico de 0,1 unidades, con un decrecimiento de 0,017 a 0,027 unidades de pH por decenio desde finales de la década de 1980 (IPCC 4AR y SROCC). En las aguas costeras, las tendencias son, sin embargo, más difíciles de distinguir debido al carácter altamente dinámico del medioambiente costero, en el que los niveles de CO_2 están sometidos a numerosas e importantes influencias, tales como variaciones de temperatura, escorrentías de agua dulce, afluencia de nutrientes, actividad biológica y grandes oscilaciones oceánicas. Para caracterizar la variabilidad de la acidificación oceánica e identificar tanto los factores que la propician como sus impactos, es crucial disponer de una red de observaciones con una alta resolución temporal y espacial.

En línea con los informes anteriores y sus proyecciones, el informe del Estado del clima mundial de 2020 afirma que la acidificación oceánica sigue avanzando y que los

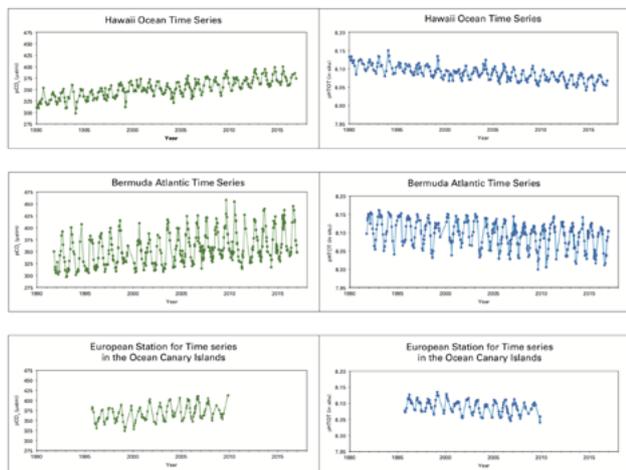


Figura 2. Registros de $p\text{CO}_2$ y pH de tres estaciones de observación oceánica de largo plazo. Arriba, series temporales oceánicas de Hawái en el océano Pacífico; en el centro, series temporales atlánticas de Bermudas; abajo, series temporales oceánicas de la Estación Europea de las islas Canarias en el océano Atlántico. Créditos: Richard Feely (Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA)) y Marine Lebrek (Centro Internacional de Coordinación sobre la Acidificación de los Océanos, Organismo Internacional de Energía Atómica), COI-UNESCO, GOA-ON.

niveles de pH global continúan decreciendo. Otros emplazamientos más recientes de observación en Nueva Zelanda, que completan importantes lagunas de datos en la monitorización de la acidificación oceánica en el hemisferio sur, muestran patrones similares. Actualmente, el acceso a datos operativos está limitado, pero se espera que la metodología para el Indicador 14.3.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (“Acidez media del mar (pH) medida en un conjunto convenido de estaciones de muestreo representativas”) recientemente introducida conllevará una ampliación de la observación de la acidificación oceánica a escala global.

Desoxigenación en alta mar y en aguas costeras

La Red Mundial sobre el Oxígeno Oceánico de la COI-UNESCO (GO2NE) coordina el resumen del informe anual sobre desoxigenación, poniendo especial atención en la comprensión de sus múltiples aspectos e impactos.

Tanto las observaciones como los modelos numéricos indican que el oxígeno está disminuyendo actualmente en alta mar y en las zonas oceánicas costeras, incluidos los estuarios y los mares semicerrados. Desde mediados

del siglo pasado, se estima que ha habido una disminución de entre el 1 % y el 2 % (es decir, de 2,4 Pmol a 4,8 Pmol o de 77 000 a 145 000 millones de toneladas) en el inventario de oxígeno oceánico mundial (Bopp y otros, 2013; Schmidtko y otros, 2017). Se sabe que muchos centenares de lugares costeros han llegado a tener concentraciones de oxígeno capaces de deteriorar los procesos biológicos o que son letales para numerosos organismos. Las regiones con concentraciones históricamente bajas de oxígeno se están expandiendo, y nuevas regiones muestran actualmente condiciones de baja oxigenación. Aunque no se conoce con precisión la importancia relativa de los distintos mecanismos responsables de la disminución del contenido global de oxígeno oceánico, se cree que el calentamiento global contribuye a este decrecimiento de forma directa debido a que la solubilidad del oxígeno disminuye con la temperatura del agua, e indirectamente, a través de cambios en la dinámica oceánica que reducen la ventilación del agua, que es la manera en que el oxígeno se introduce en el interior del océano. Las proyecciones simuladas por los modelos, tanto en escenarios de bajas como de altas emisiones, predicen un decrecimiento del oxígeno en alta mar (figura 3).

Desde la década de 1950, en áreas costeras, el incremento del transporte fluvial de nitrógeno y fósforo ha generado una eutrofización de las masas de agua a nivel mundial que conlleva mayores niveles de producción primaria y de descomposición de estos materiales, incrementa el consumo de oxígeno y, cuando se combina con una baja ventilación, da lugar a deficiencias de oxígeno en aguas subsuperficiales. Se cree que el cambio climático amplificará todavía más la desoxigenación en las áreas costeras afectadas por factores como las descargas de nutrientes antropógenos, la disminución de la solubilidad del oxígeno, la reducción de la ventilación ocasionada por el reforzamiento y la extensión de los períodos de estratificación estacional de la columna de agua, y en algunos casos en los que se prevé un aumento de la precipitación, por el incremento del transporte de nutrientes.

Desde 1960, el volumen de las regiones anóxicas de las zonas oceánicas con valores mínimos de oxígeno ha aumentado (Schmidtko y otros, 2017), alterando las secuencias biogeoquímicas al permitir procesos que consumen nitrógeno fijo y liberar fosfato, hierro, ácido sulfhídrico (H_2S) y, posiblemente, óxido nítrico (N_2O). Dado que los inventarios de elementos esenciales, como el nitrógeno y el fósforo, son relativamente limitados, esas alteraciones son capaces de perturbar el equilibrio de la composición química del océano. Se ignora en qué

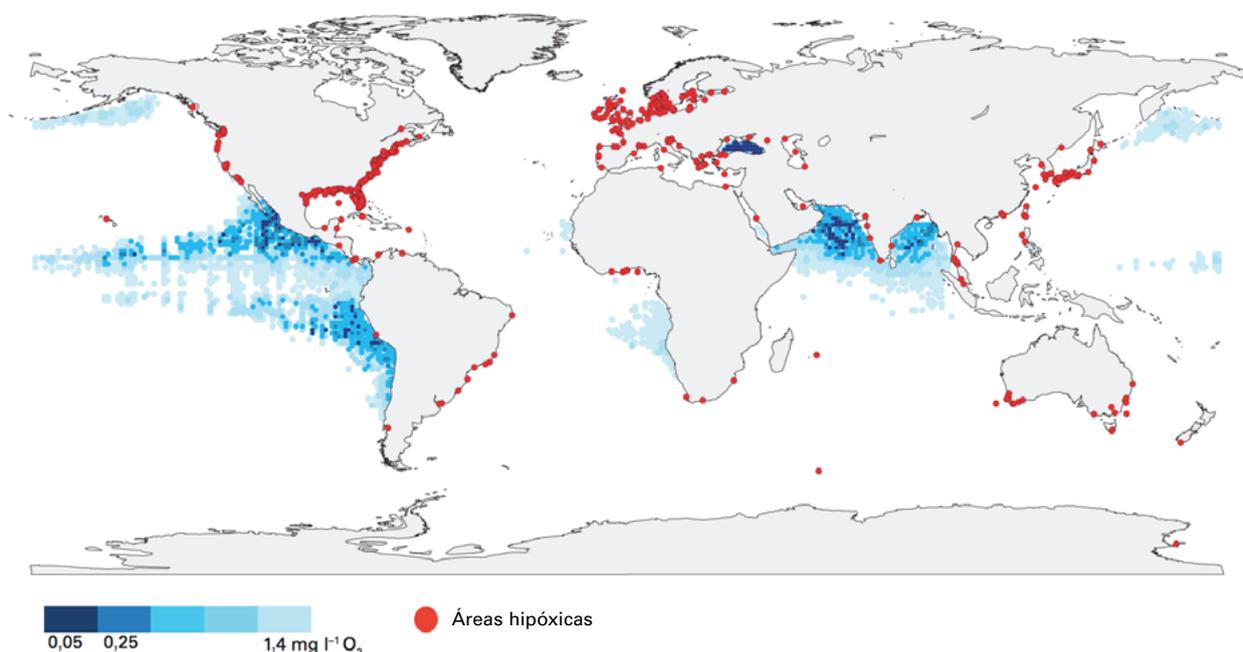


Figura 3. Zonas con valores mínimos de oxígeno (azul) y áreas de hipoxia costera en el océano (rojo; concentración de oxígeno en disolución < 2 mg/L). Los lugares costeros con hipoxia aquí señalados son aquellos en los que los nutrientes antropógenos son una de las principales causas de la disminución del oxígeno (Díaz y Rosenberg, 2008; Díaz, sin publicar). La figura ha sido adaptada a partir de Isensee y otros, 2015, Breitburg y otros, 2018; GO2NE, 2018).

medida los ciclos de retroalimentación positiva (como la movilización del fósforo y el hierro procedentes de partículas sedimentadas) pueden acelerar la pérdida del equilibrio.

La desoxigenación afecta a muchos aspectos de los servicios que el océano y las aguas costeras ofrecen al ecosistema. Por ejemplo, la desoxigenación afecta a la biodiversidad y a las redes tróficas, y puede reducir el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de los organismos marinos. Los cambios relacionados con bajos niveles de oxígeno que afectan a la distribución espacial de especies de consumo humano pueden forzar a las personas a cambiar sus lugares y prácticas de pesca, y pueden reducir la rentabilidad del sector pesquero. La desoxigenación también puede aumentar la dificultad de ofrecer un asesoramiento sólido en la gestión de pesquerías.

Carbono azul costero

La COI-UNESCO junto con la Iniciativa Carbono Azul (organizada conjuntamente por la organización Conservación Internacional, la COI-UNESCO y la Unión

Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN)) da apoyo a científicos, gestores costeros y gobiernos implicados en la medida de los inventarios de carbono en los ecosistemas costeros y marinos. De forma conjunta contribuyen a la elaboración del informe anual sobre el indicador de carbono azul.

En el discurso sobre la mitigación del clima, el carbono azul costero (también denominado “carbono azul de humedales costeros”; Howard y otros, 2017) se define como el carbono almacenado en manglares, marismas y praderas submarinas, en la biomasa viva sobre el suelo (hojas, ramas, tallos), en la biomasa viva bajo el suelo (raíces y rizomas) y en la biomasa no viva (basura y madera muerta). Los ecosistemas de carbono azul costero protegidos o restaurados funcionan como sumideros de carbono (figura 4a). Se encuentran en todos los continentes con la excepción de la Antártida y cubren aproximadamente 49 millones de hectáreas (Mha).

En el contexto actual de la política internacional y nacional, para que un ecosistema de carbono azul obtenga reconocimiento por su valor mitigador del cambio climático debe cumplir las siguientes condiciones:

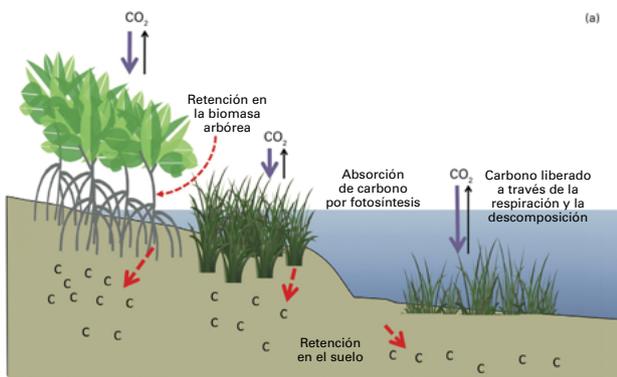


Figura 4 (a). En los humedales costeros intactos (de izquierda a derecha: manglares, marismas y praderas submarinas), el carbono es absorbido vía fotosíntesis (flechas moradas), donde queda retenido de forma prolongada en la biomasa leñosa y el suelo (flechas discontinuas rojas) o es exhalado (flechas negras).

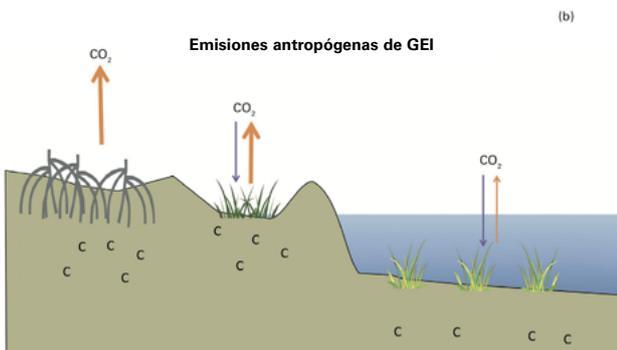


Figura 4 (b): Cuando se drena el suelo de los humedales costeros degradados, el carbono en él acumulado es consumido por microorganismos que liberan CO_2 como un producto de desecho metabólico cuando exhalan. Esto sucede a un ritmo mayor cuando los suelos se drenan y hay más oxígeno disponible, lo que conduce a mayores emisiones de CO_2 . La degradación, el drenaje y la transformación de ecosistemas de carbono azul costero por la actividad humana (es decir, deforestación y drenaje, apropiación de humedales para la agricultura, dragado) reducen las cantidades de CO_2 absorbido debido a la pérdida de vegetación (flechas moradas) y a la liberación de emisiones globalmente considerables de gases de efecto invernadero (GEI) (flechas naranjas).

1. La cantidad de carbono captado y almacenado o de las emisiones de carbono evitadas por el ecosistema tiene una escala suficiente para influir en el clima.
2. Es posible cuantificar los principales depósitos y flujos de gases de efecto invernadero.
3. Existe evidencia de factores antropógenos con capacidad para influir en el almacenamiento o la emisión de carbono.
4. Es posible y factible una gestión del ecosistema capaz de incrementar o mantener la captura o la reducción de emisiones de carbono.
5. Se puede gestionar el ecosistema sin causar daños sociales o medioambientales.

Sin embargo, los servicios que los manglares, las marismas y las praderas submarinas proporcionan al ecosistema no se limitan al almacenamiento y la captura de carbono. También ayudan a mejorar la calidad del agua costera, proporcionan hábitats para especies económicamente importantes o significativas, y protegen las costas frente a crecidas y temporales. Estimaciones recientes revelan que los servicios proporcionados al ecosistema por los manglares tienen un valor de al menos 1 600 millones de dólares estadounidenses al año.

A pesar de su importancia para la salud de los océanos y el bienestar humano, cada año se pierde un 3 % de manglares, marismas y praderas submarinas. Al degradarse o destruirse, estos ecosistemas emiten al mar y a la atmósfera el carbono que habían almacenado durante siglos, convirtiéndose en fuentes de gases de efecto invernadero (figura 4b).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estima que cada año se liberan al menos mil millones de toneladas de CO_2 procedentes de ecosistemas costeros de carbono azul degradados (manglares, marismas y praderas submarinas) lo que equivale al 19 % de las emisiones globales causadas por la deforestación tropical (IPCC, 2006).

Las referencias están disponibles en la versión en línea