

El oxígeno en el Pacífico mexicano: cambios en los últimos 60 años

Oxygen in the Mexican Pacific:
changes in the last 60 years

Resumen

El oxígeno es un elemento esencial para el desarrollo de la mayoría de las formas de vida que conocemos. A diferencia de los ecosistemas terrestres, en el océano hay extensas áreas en las que el oxígeno es limitado, comúnmente entre 100 y 1000 m de profundidad, las cuales se conocen como zonas de mínimo de oxígeno. Estos ecosistemas no pueden ser habitados por cualquier organismo, ya que se requieren de adaptaciones metabólicas y fisiológicas para sobrevivir en estas condiciones de baja oxigenación. El océano Pacífico frente a México alberga la zona de mínimo de oxígeno más grande del planeta. Investigaciones recientes por científicos mexicanos han encontrado que, además de un calentamiento de los primeros 50 m de profundidad, en los últimos 60 años el oxígeno disuelto ha disminuido entre un 20 y 50% a profundidades, entre los 100 y los 1000 m de

Recursos Naturales y Sociedad, 2023. Vol. 9 (1): 85-92. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.01.0007>

¹Erick Daniel Ruvalcaba-Aroche, ²Elvia Denisse Sánchez-Pérez, ³Laura Sánchez-Velasco

¹Investigador Posdoctoral en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad La Paz

²Investigadora CONACyT-Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas

³Investigadora del Instituto Politécnico Nacional-Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas



profundidad y que el agua con concentraciones de oxígeno cercanas a cero se encuentra cada vez más cerca de la superficie; tan solo en un periodo de 17 años se registró una disminución en su profundidad, de ubicarse cercana a los 200 m a inicios de este siglo a cerca de los 80 m en el 2017. El presente texto aborda los procesos de formación de las zonas de mínimo oxígeno, así como la importancia de su estudio y monitoreo en contextos de cambio climático.

Palabras clave: Zonas de mínimo de oxígeno; Pacífico frente a México; Oceanografía

Introducción

El oxígeno es un elemento vital para la vida de los organismos multicelulares como plantas, animales y hongos. Si bien para los organismos terrestres está disponible en todos los ambientes, debido a que constituye el 21% del volumen de los gases en la atmósfera, no sucede lo mismo en los

océanos, donde en promedio representa 1.13% de la masa de cada kilogramo de agua de mar. Sin embargo, hay grandes zonas en los océanos del mundo donde el contenido de oxígeno es tan bajo, que sólo organismos bien adaptados en condiciones de escaso oxígeno (hipoxia) pueden sobrevivir. Hay incluso zonas en las que la concentración de oxígeno es cercana a cero (anoxia), y sólo algunos organismos unicelulares, como las bacterias marinas, pueden sobrevivir en tales condiciones debido a sus adaptaciones metabólicas. Estas regiones de baja concentración de oxígeno se conocen como *zonas de mínimo de oxígeno*. La zona de mínimo de oxígeno más extensa del planeta se encuentra en el océano Pacífico frente a México, desde la entrada del Golfo de California, entre los estados de Baja California Sur y Jalisco, hasta las inmediaciones de Panamá, en Centroamérica (Figura 1). Su profundidad, abarca desde los 100 m hasta aproximadamente los 1 000 m.

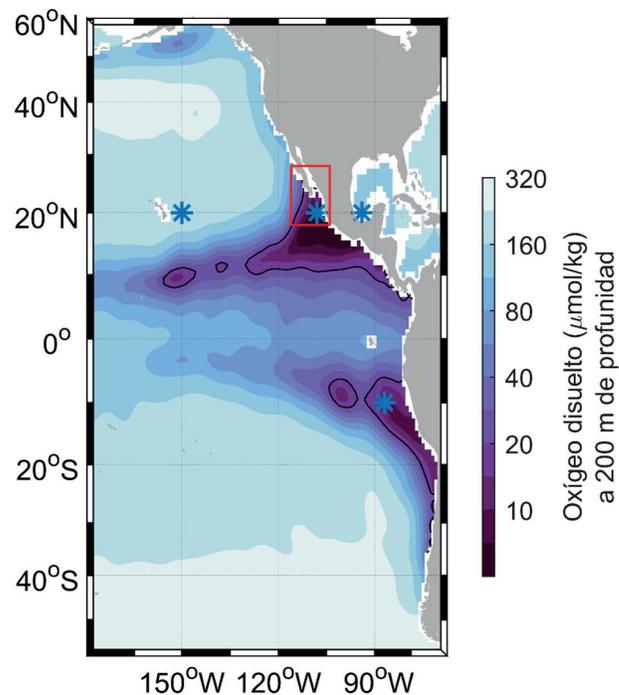


Figura 1. Distribución del oxígeno disuelto en el océano Pacífico a 200 m de profundidad. La línea negra delimita el límite fisiológico para la mayoría de los organismos marinos (20 $\mu\text{mol/kg}$). Los asteriscos azules son las áreas seleccionadas en los perfiles de la figura 2. El cuadrado rojo es el área en que se han realizado las investigaciones recientes por parte de científicos mexicanos^{a,b}.

¿Cómo se forman las zonas de mínimo oxígeno?

Procesos biológicos

Las zonas de mínimo de oxígeno tienen lugar naturalmente por dos razones principales, la respiración y la degradación de materia orgánica. El oxígeno molecular (O_2), que utilizamos los organismos aerobios en nuestros procesos metabólicos, se sintetiza como subproducto en la fotosíntesis. Por lo que todo el oxígeno que respiramos fue sintetizado por organismos fotosintéticos como micro (fitoplancton) y macroalgas, árboles y algunas bacterias. La fotosíntesis requiere de la luz solar, que en el océano está disponible únicamente en los primeros 100 m de profundidad en condiciones de alta transparencia, aunque en promedio la zona iluminada, o capa fótica, suele ser menos profunda. Considerando que el océano tiene una profundidad promedio de 4 000 m, la capa donde ocurre la fotosíntesis y se sintetiza el oxígeno de manera continua representa cerca del 2% del océano.

Durante la respiración los organismos consumen oxígeno y pueden llegar a agotarlo, tal como lo harían los peces en un acuario sin alimentador de oxígeno. Sin embargo, en el océano no son los peces quienes consumen más oxígeno, ¡son las bacterias marinas!. Pese a ser microscópicas y demasiado pequeñas como para verlas a simple vista, son los organismos más abundantes del planeta y los encargados de degradar y reintegrar al ecosistema la mayor parte de la materia orgánica marina. Las bacterias marinas son cruciales en la descomposición de materia orgánica oceánica y en el reciclaje de nutrientes en el océano, ya que degradan las moléculas complejas que existen en otros organismos marinos que de otra manera no son aprovechables para reintegrarse en los niveles superiores de la red trófica (red alimenticia). Esta materia orgánica proviene de excreciones, desechos y de los cuerpos de algas y otros organismos que mueren.

Al degradarse la materia orgánica se consume el oxígeno del agua y se transforma en dióxido de carbono (CO_2). Esto no representa un problema en aguas cercanas a la superficie, ya que ahí hay condiciones adecuadas de iluminación para que los organismos fotosintéticos conviertan ese CO_2 en materia orgánica y liberen oxígeno durante el proceso. Sin embargo, en aguas profundas¹ por debajo de la capa iluminada, a profundidades mayores a los 100 m, la vida animal y microbiana sigue siendo abundante, por lo que hay una gran cantidad de materia orgánica que eventualmente puede ser degradada por las bacterias marinas, consumiendo el oxígeno del agua. De aquí podemos concluir que, entre

¹ En el texto se hablará de *aguas profundas* para generalizar a todas las aguas en profundidad superior a los 100 m, haciendo distinción de la clasificación aplicada en oceanografía, en la que ese nombran las aguas dependiendo de su profundidad. Las *aguas superficiales* se encuentran entre superficie y 100-200 m. Debajo de ellas se encuentran las *aguas subsuperficiales* entre los 100-200 y 400-500 m. El agua entre 400-500 y 1 000 m se conoce como *agua intermedia*. Desde los 1 000 y hasta los 4 000 m se conoce como *agua profunda*, y en profundidades superiores a los 4 000 m se les conoce como *aguas de fondo*.



mayor sea la cantidad de vida marina que se encuentre en una determinada región, mayor será el consumo de oxígeno en las aguas profundas y mayor será el riesgo de que se formen zonas deficientes de oxígeno. Tal es el caso de muchas zonas costeras — como lagunas y desembocaduras de ríos de valles agrícolas—, que comúnmente presentan bajo contenido de oxígeno disuelto.

Un ejemplo reciente es el problema que ocurre en el Caribe mexicano, con el arribo del sargazo que se deposita en playas y lagunas y que, al morir, es degradado por las bacterias que acaban con el oxígeno disponible para los animales que habitan dichos ecosistemas.

Procesos físicos

También hay procesos físicos que intervienen en la oxigenación de las aguas. Empecemos explicando el más sencillo: la oxigenación por intercambio con la atmósfera. Además de la síntesis de oxígeno por la fotosíntesis, el oxígeno disuelto en el océano puede provenir de la atmósfera. Dependiendo de las condiciones de temperatura y salinidad, el agua puede disolver diferentes concentraciones de oxígeno e incluso puede llegar al punto de sobresaturación debido a la acción del viento. Debido a este proceso, y junto con la fotosíntesis, de manera general, las aguas superficiales siempre tienen altas concentraciones de oxígeno disuelto.

Sin embargo, las aguas profundas también presentan un mecanismo físico para la renovación del oxígeno disuelto, que se conoce como *ventilación*. En este proceso el agua nueva y con alto contenido de oxígeno sustituye al agua vieja y con poco oxígeno.

Para comprender el proceso de ventilación, y lo que conlleva, debemos entender antes cómo se distribuye el agua en el océano.

La distribución vertical del agua en el océano está dada por la gravedad terrestre, de tal manera que entre más pesada sea una porción de agua, ésta se distribuirá a mayor profundidad, y el

agua más ligera se posicionará por encima de ella. Pero ¿qué hace que una porción de agua sea más pesada que otra? Dos factores: su contenido de sal y su temperatura. Mientras más salada y fría sea el agua, su densidad será mayor, es decir, será agua más pesada y se mantendrá por debajo del agua ligera, que es más caliente y menos salada.

En los mares tropicales, como el Pacífico frente a las costas de México, el agua superficial es cálida y con baja densidad, y conforme el agua es más profunda, es más fría y densa. Pero entonces, ¿cómo puede haber agua fría ($< 9\text{ }^{\circ}\text{C}$) a los 500 m de profundidad, en lugares como Acapulco, si todo el año hace calor en la playa ($> 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)? La respuesta es sencilla. Esta agua proviene desde regiones cercanas a los polos, donde el viento es intenso y los rayos del sol son débiles la mayor parte del año, por lo cual el agua pierde calor y se enfría. Además, cuando se forma el hielo marino la sal es expulsada de los cristales de

hielo, por lo que el agua que rodea al hielo marino es aún más salada.

A este proceso se le conoce como formación de masas de agua, dónde entendemos una *masa de agua* como un volumen determinado de agua del océano que comparte características de temperatura y salinidad, además de un sitio de formación en común. No es igual el agua que se forma en el hemisferio norte, que la que se forma en el hemisferio sur. Así como no es igual el agua del océano Pacífico que la del océano Atlántico.

Como ya lo mencionamos, el oxígeno que se encuentra en el agua de mar proviene de la atmósfera, por lo que su concentración en las aguas profundas dependerá del intercambio de oxígeno en su sitio de formación. Cuando se forman las masas de agua, el viento intenso ayuda a que el contenido de oxígeno disuelto aumente. Este, sin embargo, disminuirá a medida que el agua se traslade hasta las zonas tropicales debido a los

procesos biológicos y químicos que ocurren en ella. Por lo tanto, entre más lejos encontremos una masa de agua de su sitio de formación, menor será su contenido de oxígeno.

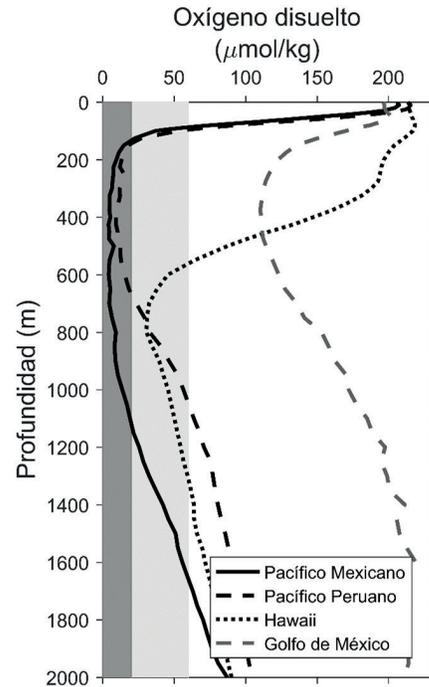


Figura 2. Perfiles de la concentración de oxígeno disuelto (OD) en algunas regiones del océano Pacífico y el Golfo de México. La zona gris claro se conoce como zona de oxígeno limitado ($20 \mu\text{mol/kg} < \text{OD} < 60 \mu\text{mol/kg}$). La zona gris oscuro es la zona hipóxica ($\text{OD} < 20 \mu\text{mol/kg}$), la cual constituye el núcleo de las zonas del mínimo de oxígeno. Si comparamos las cuatro regiones, podemos observar que todas presentan las concentraciones mínimas de oxígeno entre 200 y 800 m de profundidad, pero solo en el Pacífico frente a Perú y México se alcanzan concentraciones hipóxicas. En México esta capa hipóxica es más profunda (~1100 m) que en Perú (~700 m). En Hawaii las concentraciones llegan a ser limitadas, pero no hipóxicas. Mientras que, en el Golfo de México, aunque el oxígeno es menor que en superficie, esto no supone algún tipo de limite fisiológico para la mayoría de los organismos.

El agua que encontramos en el Pacífico frente a las costas de México entre los 100 y 1 000 metros de profundidad se compone de dos masas de agua. La más ligera se posiciona entre los 100 y 400 metros, y su sitio de formación se encuentra en el hemisferio sur, entre Australia y Nueva Zelanda, cercano al paralelo de 40°S .

El agua más pesada, que se posiciona entre los 400 y 1 000m de profundidad, tiene su sitio de formación también en el hemisferio sur en latitudes subpolares, cercanas a los 55°S . Ambas masas de agua poseen un alto contenido de oxígeno en sus sitios de formación, pero en su largo viaje hasta las costas de México (14-30



°N), la actividad biológica disminuye este contenido de oxígeno disuelto hasta valores bajos, cercanos a cero.

¿Cómo afecta el calentamiento global al contenido de oxígeno en el mar profundo?

Como lo hemos mencionado, la ventilación es indispensable para intercambiar el agua vieja con poco oxígeno por agua nueva con más oxígeno, pero este proceso depende fundamentalmente de la cantidad de agua que se pueda enfriar y hundir en las regiones polares y subpolares. Desde la última glaciación (hace unos 12 000 años) hasta nuestros días, la ventilación ha ido disminuyendo, pero el rápido calentamiento observado en las últimas décadas, debido a la actividad humana, está reduciendo esta ventilación de aguas profundas de manera más rápida de lo que ocurriría naturalmente, reduciendo así la exportación de oxígeno hacia zonas que de por sí son pobres en él.

Investigaciones recientes realizadas en el Pacífico frente a México, entre las costas de Baja California Sur y Jalisco, incluyendo el sur del Golfo de California, han encontrado que el contenido de oxígeno entre los años 2002 y 2017 ha disminuido entre un 20 y un 50% (entre 100 y 1000 m de profundidad) respecto a la concentración que había en las décadas de los 1960's y 1970's^a. Además, la capa entre la superficie y los 50 m de profundidad se está calentando, incrementando su temperatura en alrededor de 0.5 °C en el mismo periodo. Esto contribuye también a la pérdida de oxígeno ya que, cuanto mayor es la diferencia de temperatura (densidad) entre las capas del océano, menor será el intercambio de las propiedades que éstas puedan tener. De esta manera, la capa superficial, en contacto con la atmósfera, pierde capacidad de transferir oxígeno a las capas más profundas. Así mismo, se ha observado que además de un menor contenido de oxígeno en el mar profundo, las zonas de mínimo oxígeno están cada vez más cerca de la superficie. Tan sólo en

un periodo de 15 años, entre 2002 y 2017, el agua con concentración de oxígeno cercana a cero pasó de localizarse a profundidades alrededor de los 200 m a tan solo 80 m^b.

¿Cómo afecta la pérdida de oxígeno a los organismos marinos?

Como lo mencionamos ya, si se apaga la bomba de aire de un acuario, los peces que se encuentren dentro tendrán problemas para conseguir oxígeno y se ahogarán, y morirán. Afortunadamente, para la vida en este planeta los organismos en el océano tienen estrategias para adaptarse y sobrevivir a la pérdida de oxígeno.

Por un lado, estas zonas de mínimo de oxígeno existen desde hace millones de años, por lo que hay organismos que han evolucionado para sobrevivir en condiciones poco oxigenadas.

Sus adaptaciones pueden incluir un metabolismo relativamente lento, siendo

organismos poco activos y poco musculosos con grandes superficies respiratorias para extraer el máximo de oxígeno disuelto del agua, o bien, por el contrario, ser organismos con gran capacidad de desplazamiento que pueden entrar y salir de dichas zonas en periodos suficientemente cortos para resistir la poca disponibilidad de oxígeno.

Paradójicamente, la misma alta productividad que ocasiona bajas concentraciones de oxígeno en aguas profundas, soporta grandes enjambres de pequeños organismos como krill, camarones, calamares y organismos gelatinosos como medusas y sifonóforos. Inclusive algunos peces, como los mictófidios o linternillas, que son los vertebrados más abundantes del planeta. Estas comunidades constituyen el alimento de importantes recursos pesqueros como calamares y atunes. Sin embargo, hay especies con una adaptación más débil que pueden llegar a los límites de lo que pueden tolerar y cuya respuesta para adaptarse será emigrar a otros lugares donde las condiciones sean más favorables.

Desafortunadamente para México y los mexicanos, varias de las especies con mayor importancia pesquera en la región, como los atunes y las sardinias, pueden verse afectadas ante el aumento de las capas con baja concentración de oxígeno, lo que podría verse reflejado en las zonas y volúmenes de pesca, afectando a la industria y a las personas que viven de las actividades económicas asociadas a la pesca.

Monitorear y entender los procesos de las zonas de mínimo oxígeno, así como sus efectos ambientales y ecológicos, es crucial para poder tener un manejo sustentable de nuestras costas y de los recursos que se extraen de ellas. Por ello el gobierno de México debe seguir impulsando la investigación de ciencia básica, aunque sus efectos sociales no sean inmediatos como otros tópicos de la ciencia y las humanidades.

Agradecimientos

A los proyectos SEP-CONACyT (2014-236864) y Fronteras de la Ciencia-CONACyT (2015-2-280), así como los proyectos anuales del Instituto Politécnico Nacional (SIP 2010-2023).

Bibliografía

^aSánchez-Pérez, E.D., Sánchez-Velasco, L., Ruvalcaba-Aroche, E.D., Ornelas-Vargas, A., Beier, E., Barton, D., Peña, A., Godínez, V.M., Contreras-Catala, F. (2021). *Temperature and dissolved oxygen concentration in the Pacific Ocean at the northern region of the oxygen minimum zone off Mexico between the last two PDO cool phases*. *Journal of Marine Systems*, 222, 1-6.



^bSánchez-Velasco, L., V. M. Godínez, E. D. Ruvalcaba-Aroche, A. Márquez-Artavia, E. Beier, E. D. Barton & S. P. A. Jiménez-Rosenberg. (2019). *Larval fish habitats and deoxygenation in the northern limit of the oxygen minimum zone off Mexico*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124, 9690-9705.

Cita:

Ruvalcaba-Aroche, E. D., E.D. Sánchez-Pérez y L. Sánchez Velasco. El oxígeno en el Pacífico mexicano: cambios en los últimos 60 años. Recursos Naturales y Sociedad, 2023. Vol. 9 (1): 85-92. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.01.0007>

Sometido: enero 2023

Aceptado: 13 de marzo de 2023

Editor asociado: Dr. Salvador E. Lluch Cota

Editora Ejecutiva: Dra. Crisalejandra Rivera Pérez

Diseño gráfico editorial: Lic. Gerardo Hernández