

Cuando la hipoxia nos alcance: El problema de la desoxigenación en los océanos

María Luisa Leal Acosta¹*, Cecilia Chapa-Balcorta¹,
Antonio López Serrano² & Ragi Alfonso Guerra-Mendoza¹

Resumen

La desoxigenación en los océanos es un problema global que se presenta como consecuencia de diversos cambios asociados a las actividades antropogénicas y el cambio climático. El oxígeno disuelto en el agua del mar sostiene la vida del ambiente acuático, gracias a la presencia de microorganismos capaces de realizar la fotosíntesis. Este proceso contribuye en gran medida al oxígeno disponible tanto en el océano como en la atmósfera. Sin embargo, la producción de oxígeno está delimitada por el consumo de este gas debido a la respiración de organismos marinos y la degradación de material orgánico por medio de bacterias. El aumento de zonas muertas y la expansión de las zonas de mínimo oxígeno (ZMO) ha tenido implicaciones ecológicas de gran escala, llegando incluso a afectar las pesquerías. La ZMO más intensa del mundo se presenta en el Pacífico tropical mexicano, por lo tanto, el monitoreo de las condiciones de oxigenación resulta indispensable. La presencia de hipoxia/anoxia en las costas mexicanas muy probablemente generará un alto estrés ambiental y puede tener varias implicaciones; desde la modificación de las áreas de distribución de especies comerciales y cambio en los patrones de movimiento vertical de peces y zooplancton, hasta la presencia de organismos marinos más resistentes. De ahí la importancia del constante monitoreo, así como la divulgación de esta información a los usuarios directos, tales como las comunidades pesqueras y las instancias gubernamentales que regulan la pesca en México.

Palabras clave: Oxígeno disuelto, Zona de mínimo oxígeno, Pacífico Tropical Mexicano.

Recibido: 02 de mayo de 2022.

Abstract

The deoxygenation in the ocean is a global problem that is present as consequences of diverse changes associated to anthropogenic activities and the climate change. The dissolved oxygen in the seawater supports the life in the aquatic environment, due to the presence of photosynthetic microorganisms. These processes contribute to the oxygen available, both in the ocean and the atmosphere. However, the oxygen production is delimited using this gas on the respiration of marine organisms and the organic matter degradation by bacteria. The increase in dead zones and the expansion of the Oxygen Minimum Zones (OMZ) have had large-scale ecological implications, even affecting fisheries. The most intense OMZ in the world occurs in the Mexican tropical Pacific, therefore, monitoring of oxygenation conditions is essential. The presence of hypoxia/anoxia in the Mexican coasts will most likely generate high environmental stress and may have several implications; from the modification of the distribution areas of commercial species and changes in the vertical movement patterns of fish and zooplankton, to the presence of more resistant marine organisms. Hence the importance of constant monitoring, as well as the disclosure of this information to direct users, such as fishing communities and government agencies that regulate fishing in Mexico.

Key words: Dissolved oxygen, Oxygen minimum zone, Mexican Tropical Pacific.

Aceptado: 21 de agosto de 2022.

^{1,2} Instituto de Industrias/Instituto de Recursos. Universidad del Mar. Ciudad Universitaria, Puerto Ángel 70902, Distrito de San Pedro Pochutla, Oaxaca, México.

* **Autor de correspondencia:** maluleal@angel.umar.mx (MLLA)

Introducción

Aunque no lo parezca, el océano y la atmósfera, tienen muchas cosas en común. Una de ellas es la presencia de diferentes tipos de gases que logran disolverse en la superficie, algunos de los cuales, como el oxígeno y el nitrógeno, son fundamentales para la vida en el mar. El oxígeno en el océano se forma diversas moléculas con otros elementos como el H_2O , CO_2 , entre otros. El oxígeno en estado gaseoso es capaz de disolverse en el agua del mar dependiendo de ciertas condiciones como la temperatura y salinidad (Riley & Chester 2016). A esta forma química del oxígeno se le llama oxígeno disuelto y los niveles de este gas en el océano se miden en unidades de concentración, generalmente en micromoles por kilogramo ($\mu\text{mol}/\text{kg}$). El oxígeno tiene, además de una fuente atmosférica, un origen biológico debido a un proceso llamado fotosíntesis, que se lleva a cabo en la porción superficial del océano (0-200m, ya que necesita de la luz del sol) por un grupo de organismos microscópicos, que llamaremos fitoplancton (Sigman & Hain 2012). Este proceso es muy importante, ya que, si se considera que la superficie del océano abarca casi el 70% del área total de nuestro planeta, es una superficie muy grande para obtener energía y, por lo tanto, contribuye en gran medida al oxígeno disponible tanto en el océano, como en la atmósfera (Figura 1).

(macrofitoplancton). Cada uno de ellos con capacidades diferentes para fotosintetizar. Estos organismos requieren, además de luz, compuestos químicos llamados nutrientes para sobrevivir (nitrógeno, fósforo, sílice, elementos traza como hierro) (Sigman & Hain 2012). La disponibilidad de nutrientes en el océano depende de factores como el aporte de agua del continente a través de los ríos, el ingreso de aguas profundas a la superficie por algún proceso físico (ej. mezcla) y la entrada de polvo, principalmente de los desiertos (Riley & Chester 2016). Entonces, si hay tanto oxígeno en el mar, ¿por qué decimos que nos estamos quedando sin él? en parte es porque, así como se produce por el fitoplancton y se incorpora desde la atmósfera, es consumido por los organismos marinos, debido a la respiración (Figura 1). En la superficie el fitoplancton produce biomasa (microalgas) que crecen y son consumidas por organismos herbívoros, llamados zooplancton. Las partículas orgánicas son degradadas por las bacterias durante su hundimiento hacia el fondo del océano, consumiendo el oxígeno en este trayecto (Figura 1). Durante la degradación de material orgánico, el oxígeno es consumido y la producción de dióxido de carbono (CO_2) se incrementa debido a la reacción química de combustión (Figura 1). Así, la concentración de oxígeno en la superficie es mayor y va disminuyendo conforme aumenta la profundidad (Sigman & Hain 2012). La alta concentración de oxígeno en la superficie ocurre por su entrada desde la atmósfera y la producción por fotosíntesis. En las profundidades del océano (después de los 200 m), el oxígeno disminuye su concentración debido al gasto por respiración y por degradación de materia orgánica (combustión). En aguas profundas, el oxígeno se incrementa un poco debido al transporte de agua profunda que aún se

Producción y gasto de oxígeno disuelto en el océano

La producción de oxígeno en el océano a través de la fotosíntesis es un proceso complejo. Desde el tipo de fitoplancton que vive en la superficie, el cual puede clasificarse por su tamaño en organismos muy pequeños del orden de micras (nanofitoplancton) hasta células más grandes

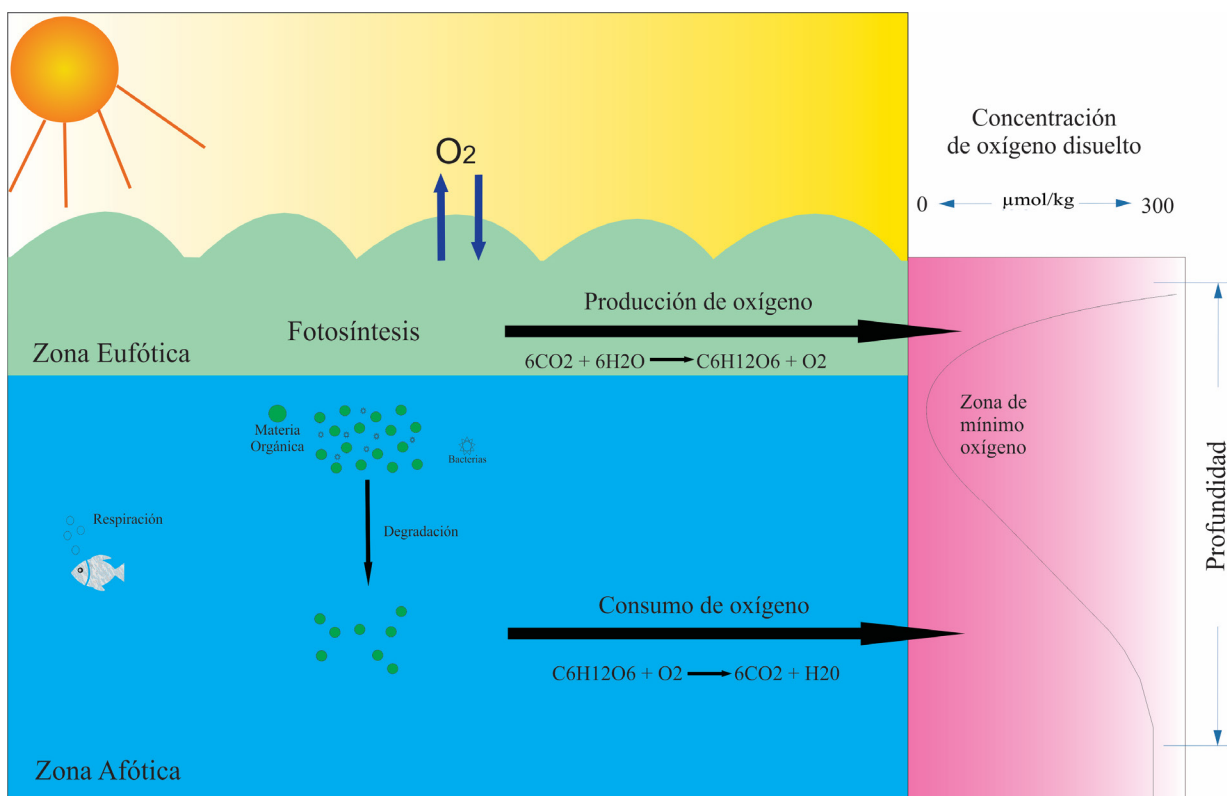


Figura 1. Distribución de oxígeno disuelto en el océano y perfil vertical en la columna de agua (Tomado y modificado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Biological_pump_hg.png)

encuentra oxigenada (Libes 2011). ¿Como puede ser que el agua profunda tenga oxígeno, si no hay fotosíntesis, ni contacto con la atmósfera? se ha documentado que, en el océano hay un cinturón transportador de agua y calor, conocido como circulación termohalina, y se lleva a cabo por el movimiento de grandes volúmenes de agua con propiedades similares de temperatura y salinidad, donde no solo hay un transporte de calor, sino también componentes químicos como los gases (Talley 2012). Debido a la diferencia de densidades de estas masas de agua, en las zonas polares del Atlántico, ocurre un hundimiento hacia las profundidades, llevando oxígeno desde la superficie. Así, la distribución de oxígeno en toda la columna de agua es producto de la interacción de los procesos físicos, químicos y biológicos (Libes 2011). Todos estos cambios en la concentración de oxígeno disuelto en

la columna de agua son influenciados por el transporte que se presenta de forma natural a través de las corrientes oceánicas. Esto se puede representar en un perfil vertical de oxígeno disuelto (Figura 2).

Distribución espacial

La distribución espacial de oxígeno disuelto en el océano varía respecto a la latitud y longitud, ya que además de la temperatura, la mezcla física de la columna de agua y la intensidad de los procesos biológicos influyen en su distribución. Las áreas donde la fotosíntesis es más intensa, generalmente se encuentran en zonas templadas y dependen de la estación del año, ya que el incremento de los vientos en ciertas estaciones promueve la mezcla de la columna de agua y el aporte de nutrientes (Talley 2012). En las zonas tropicales, existe menor presencia

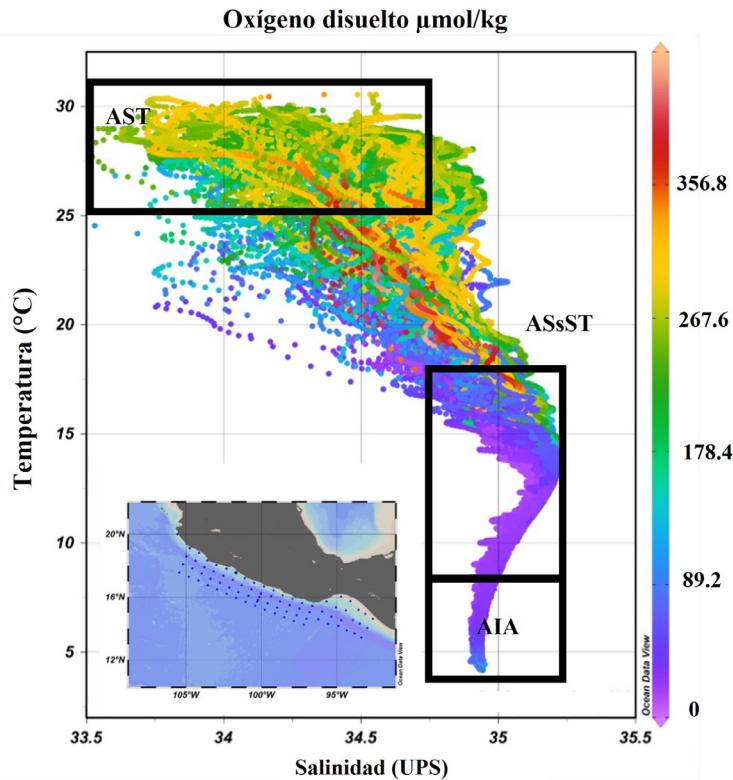


Figura 2. Concentración de oxígeno disuelto en masas de agua del Pacífico Sur Mexicano (Modificada de Martínez Magaña *et al.* 2020).

de fitoplancton debido al poco aporte de nutrientes, ya que hay poca mezcla vertical de agua superficial con agua profunda, creando condiciones menos favorables para el crecimiento de organismos. Las zonas tropicales, por lo tanto, son más estables, dado que se presentan baja producción de materia orgánica, pero constante durante todo el año. Sin embargo, hay zonas en estas latitudes donde, en ciertos meses del año, los vientos desplazan la porción superficial de la columna de agua hacia mar afuera, lo que favorece el ascenso de agua más profunda rica en nutrientes, hacia la superficie. A este proceso se le llama surgencia. Por ello, las zonas de surgencia suelen ser ambientes con alta productividad biológica, donde abundan organismos fitoplanctónicos y la fotosíntesis es intensa (Sigman & Hain 2012).

¿Por qué el océano está perdiendo oxígeno?

La principal razón sobre la pérdida de oxígeno en el agua del mar es debido al calentamiento del agua superficial que se ha intensificado debido al efecto invernadero que se desarrolla en la atmósfera. Otra razón es el incremento de zonas costeras con alta descarga de nutrientes, lo cual promueven la alta concentración de fitoplancton, creando un exceso de biomasa. Este exceso de material orgánico es degradado por bacterias, consumiendo así, el oxígeno disuelto en el agua (Sigman & Hain 2012). Por último, en escalas de tiempo mayores, la circulación termohalina se ha vuelto cada vez más lenta disminuyendo la oxigenación de aguas profundas. Estos procesos en conjunto promueven el incremento de la presencia de aguas pobres en oxígeno (hipoxia/anoxia) en ambientes semicerrados y presencia de aguas subsuperficiales pobres en oxígeno, cada

vez más cerca de la superficie (Doney *et al.* 2012). De acuerdo con algunas investigaciones se dice que las aguas pobres en oxígeno están ampliando su distribución tanto hacia la superficie, como hacia las profundidades oceánicas. Además, la pérdida de oxígeno se está intensificando en zonas tropicales y expandiéndose hacia zonas templadas, creando un océano cada vez más desoxigenado (Stramma *et al.* 2008). Estas áreas son llamadas zonas de mínimo oxígeno (ZMO) y se encuentran distribuidas en los diferentes océanos del mundo como el Atlántico, con una ZMO frente a las costas de África y en el Océano Pacífico, localizadas desde el litoral mexicano hasta las costas de Perú y Chile. Cabe destacar que la ZMO más intensa del mundo, se encuentra en el litoral mexicano, principalmente las costas del estado de Guerrero y Oaxaca.

¿Puede la hipoxia afectar a los organismos marinos?

Los organismos marinos requieren diferentes niveles de oxígeno disuelto para sobrevivir; por lo cual, la abundancia de este gas en los océanos define el tipo de ecosistema que se desarrollará; y en consecuencia la riqueza y abundancia de especies (Doney *et al.* 2012). Los niveles de oxígeno disuelto determinan desde los tipos de bacterias hasta la macrofauna, y en muchos casos, especies de interés comercial. La expansión de las ZMO ha tenido diversos efectos ecológicos, como cambios en la cadena trófica, aumentando la presencia de especies más resistentes a la hipoxia. Otros organismos que han sido capaces de migrar se han desplazado a áreas con mejores condiciones para su sobrevivencia. La desoxigenación del océano en especial ha dificultado las actividades pesqueras, donde especies de importancia comercial

que tradicionalmente se encontraban en estas regiones tropicales, se han desplazado, ya sea a zonas más oceánicas o a otras más templadas, dificultando cada vez más las capturas. Los efectos también se han observado en el fondo oceánico, ya que, aunque algunos organismos bentónicos son más resistentes a las condiciones anóxicas, no deja de ser un ambiente vulnerable (Gilly *et al.* 2013).

¿Qué pasa en las costas mexicanas?

Recientes investigaciones en el Pacífico sur de México, realizadas por la Universidad del Mar, en colaboración con el INAPESCA en el 2020, han permitido identificar los niveles de oxígeno en algunas masas de agua de la región, encontrando valores bajos muy cerca de la superficie (Martínez Magaña *et al.* 2020). Una forma de conocer el origen de las masas de agua presentes en las costas mexicanas es a través de los diagramas T-S, los cuales relacionan la temperatura y salinidad en la columna de agua. En este estudio se identificaron 3 masas de agua, el agua superficial tropical (AST), agua subsuperficial subtropical (ASsSt) y agua intermedia de la antártica (AIA) (Fiedler & Talley 2006). Los valores de oxígeno en un agua bien oxigenada sobrepasan los 250 $\mu\text{mol/kg}$, sin embargo, en esta región las menores concentraciones de oxígeno disuelto se encuentran en masas de agua más profundas, como el AIA (valores entre 0 y 50 $\mu\text{mol/kg}$) y estos bajos niveles prevalecen en la parte subsuperficial (ASsSt) (Figura 2). Estos datos nos dan a conocer la profundidad a la que se encuentra la ZMO de oxígeno en el Pacífico Sur Mexicano, ya que el ASsSt puede alcanzar zonas someras. La presencia de estas condiciones en las costas mexicanas definitivamente generará un alto estrés ambiental y puede tener varias implicaciones; desde la modificación

de las áreas de distribución de especies comerciales y cambio en los patrones de movimiento vertical de peces y zooplancton, hasta la presencia de organismos marinos más resistentes a las condiciones de anoxia. De ahí la importancia del constante monitoreo, así como la divulgación de esta información a los usuarios directos, tales como las comunidades pesqueras y las instancias gubernamentales que regulan la pesca en México.

Conclusión

La desoxigenación de los océanos es un proceso que está adquiriendo gran relevancia para comprender los cambios en las condiciones de hábitat oceánicos y costeros, y que se ha potenciado como resultado de las actividades antropogénicas y el cambio climático. Este proceso tiene repercusiones directas en la viabilidad del hábitat para diferentes especies, muchas de ellas de interés comercial, que pueden tener consecuencias en su adaptación, y distribución geográfica. Aún no se han comprendido muchos de los procesos químicos y ecológicos que ocurren en la columna de agua como consecuencia de la pérdida de oxígeno. En el pacífico sur mexicano, es especialmente importante dada la intensidad con la que se presenta la desoxigenación, provocando cambios a nivel ecológico y pesquero, por lo cual es necesario continuar con este tipo de estudios para comprender la dinámica ambiental de una de las zonas con déficit de oxígeno más intensas del mundo.

Agradecimientos

Se agradece a la tripulación y personal científico del Buque de Investigación Oceanográfica del INAPESCA "Jorge Carranza Fraser". Se agradece el

apoyo económico al proyecto PRODEP "Variación espacio-temporal de los procesos biogeoquímicos de la zona costera del Golfo de Tehuantepec y su relación con el zooplancton" clave 2IR2001 y el proyecto "Dinámica de nutrientes y caracterización hidrográfica de la columna de agua en la zona de mínimo oxígeno en el Golfo de Tehuantepec en la temporada de Tehuanos en 2020. Efectos en el zooplancton asociado a las capas de dispersión profunda" clave 2II2101.

Referencias

- Doney, S.C., M. Ruckelshaus, J. Emmett Duffy, J.P. Barry, F. Chan, C.A. English, H.M. Galindo, J.M. Grebmeier, A.B. Hollowed, N. Knowlton, J. Polovina, N. Rabalais, W.J. Sydeman, & L.D. Talley. 2012. Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual review of marine science* 4: 11-37.
- Fiedler, P.C. & L.D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69(2-4): 143-180.
- Gilly, W. F., J.M. Beman, S.Y. Litvin & B.H. Robison. 2013. Oceanographic and biological effects of shoaling of the oxygen minimum zone. *Annual review of marine science* 5: 393-420.
- Libes, S. 2011. Introduction to marine biogeochemistry. Academic Press, Burlington, 893 pp.
- Martínez Magaña, V. H., L. Huindobro Campos, J.R. Vallarta Zarate, M. Vásquez Ortiz, L. Altamirano López, S. del C. Morales Gutiérrez, D. Hernández Cruz, E. V. Pérez Flores & R. I. Rojas González. 2020. Prospección y evaluación de recursos pesqueros en el Pacífico Centro Sur mexicano. Campaña océano pacífico 2020, B/I Dr. Jorge Carranza Fraser. Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura. Dirección general de Investigación pesquera en el Atlántico, Informe Técnico No. 8., 99 pp.
- Riley, J.P. & R. Chester. 2016. *Chemical Oceanography*. Academic Press, London. 591 pp.
- Sigman, D.M. & M. P. Hain. 2012. The biological productivity of the ocean. *Nature Education Knowledge*, 3(6): 1-16.
- Stramma, L., P. Brandt, J. Schafstall, F. Schott, J. Fischer & A. Körtzinger. 2008. Oxygen minimum zone in the North Atlantic south and east

of the Cape Verde Islands. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113(C4).

Talley, L. D. 2011. *Descriptive physical oceanography: an introduction.* Academic press. Oxford. 557 pp.