

El oxígeno

en el agua lo cambia todo

Patricia M. Valdespino, Jorge A. Ramírez-Zierold, Oscar Gerardo-Nieto y Martín Merino-Ibarra

Nuestra sangre normalmente está saturada de oxígeno (96% en promedio) y cuando baja del 80% necesitamos atención médica urgente, dato que aprendimos bien a causa de la pandemia por covid-19 y sus repercusiones directas en la salud pulmonar de las personas. Pero no somos los únicos seres expuestos a dramáticos riesgos si el oxígeno falta; con los organismos acuáticos es claro que sin ese vital elemento hay pérdida de biodiversidad, reducción del crecimiento de algunas especies o efectos en su reproducción, deterioro de la calidad del agua y también resulta más propicia la invasión de especies oportunistas.

Palabras clave: eutrofización, seguridad hídrica, hipoxia, anoxia, procesos biogeoquímicos.

Maayat'aan (maya): Le oxígeno yaan ich ja'e' ku jeelbesik tuláakal

Suuk yaan ya'ab oxígeno ichil k k'í'ik'el (tak 96% u ya'abil) ts'o'okole' le kéen éemek tu 80%e' k'a'ana'an k seeb bisa'al iknal ajts'aak, le je'ela' ma'alob úuch k kanik yo'olal le k'ak'aas k'oja'anil tu taasaj covid-19 yéetel le loobilaj tu meentaj tu xsak óol wáaj pulmono'ob wiinik. Ba'ale' a' chéen ti' to'on máaxo'on kuxa'ano'on ku béeytal u téek úuchul loob wáaj k k'oja'anta'al wáaj mina'an oxígeno; ichil u yik'elo'ob ja'e' wa mina'ane' ku xu'ulul xan u kuxtal jejeláas ch'í'ibalilo'ob, ku p'áatal mun ch'í'ijil wajaytúul ch'í'ibalil yik'el ja' wáaj ma'atáan u yantal u mejenilo'ob, ku k'aastal le ja'o' bey xan ku meetik chéen ch'a'abil u k'uchul wáaj u yok'ol ch'í'ibal ku loobilo'ob.

Áantaj t'aano'ob: eutrofización, ma' xu'upul ja', ku yéemel oxígeno, ku xu'upul oxígeno, procesos biogeoquímicos.

Bats'i k'op (tsotsil): Chjel o skotol k'alaluk oy ik' ta yutil vo'e

Vu'utike kuxulutik ja' ti ta xki'chtik ik'e, jech oy 96% ik' ta jch'ich'eltik, k'alaluk xyale xk'ot ta 80%, mi jech k'ot taje sk'an xka'kbatik ta ilel ta ora no'ox ta jpoxtavanej, smelolal li'e laj yich' chanel k'alaluk i-ech' chamel korona virus sbie covid-19 ti ja' ipaj yu'un sputsutsil yu'un li jch'iel jk'opojeletike. Pe ma'uk no'ox vu'utik xu' chijcham ti mi mu'yuk xki'chtik ik'e; xu' ta xlaj ek li bik'tal ja'al chonetik kuxajtik ta vo'e ja' ti ta xich'ik ik' ta yutil vo' eke, ti mi mu'yuk ik' ta yutil vo'e, jech ta xcham talel ti k'uyepal jaychop kuxajtik tey, jech mu'yuk xa bu ta xp'ol talel sts'unobal, ta sok ek li vo'e, xchi'uk tey ta x-och talel yantik chopol bik'tal ja'al chonetik.

Jbel cha'bel k'opetik oy ta vun li'e: eutrofización, seguridad hídrica, hipoxia, anoxia, procesos biogeoquímicos.

El oxígeno es clave para muchos habitantes del planeta, y su ausencia es muy grave para un organismo aerobio (dependiente del aire), como lo son la mayoría de los animales terrestres y acuáticos. En contraste, para otros organismos la presencia del oxígeno no es vital, y hay seres anaerobios a los que les resulta tóxico, como el género de bacterias *Clostridium*. Para nosotros es muy claro que la falta de oxígeno es fatal, bastan apenas unos cuantos minutos sin aire para que nuestro cuerpo deje de funcionar. ¿Qué te ocurriría si fueras un habitante del agua? Para empezar, tendrías sistemas de alerta para moverte en caso de emergencia y tanto tú como tu comunidad estarían muy atentos a la química del oxígeno.



HUMBERTO BAHENA

Mucho oxígeno en el aire, poco en el agua

El oxígeno (O₂) es un elemento que interactúa fácilmente con otras moléculas. Como agente oxidante, cambia el color de una manzana cortada o convierte en polvo materiales tan resistentes como una varilla de acero. Juega un papel fundamental en la química de la atmósfera y de la biósfera, y su presencia o ausencia determina la dirección de muchos procesos biológicos, químicos y geológicos; de hecho, son biogeoquímicos, porque suelen ocurrir todos

juntos. Estos procesos afectan a elementos clave para la vida, como el tránsito del carbono, el azufre y el nitrógeno entre el ambiente y los seres vivos. Por ejemplo, el carbono circula por tres compartimientos muy distintos: en la atmósfera o capa de aire, polvo y material ionizado que rodea al planeta; en la biósfera o capa que contiene a la vida, y en la litósfera o capa de las rocas. El mismo carbono de una molécula inorgánica, como el CO₂ en la atmósfera, forma parte de un organismo como tú, pero también po-

dría quedarse inmovilizado en un carbonato (sales de ácido carbónico) por millones de años.

Una vez establecida la necesidad del oxígeno, puede parecer extraño que algunos metros hacia arriba en la atmósfera el oxígeno casi no cambia, pero hacia abajo en el agua sí. Mucho del aire que respiramos es oxígeno, el 20%; si su concentración fuera menor a 7% nos desmayaríamos. Pero el agua es incapaz de contener más del 0.5% de oxígeno, ¡40 veces menos que en el aire!

Por ello, en los sistemas acuáticos es crucial el equilibrio entre el consumo de oxígeno (respiración) y su producción local o su entrada desde fuera.

Esto último solo ocurre a través de la superficie, y tiene limitantes por el lento proceso de la difusión por la interfase agua-aire. Si bien el viento y las olas aceleran la difusión hasta miles de veces, introducir O_2 en los cuerpos de agua requiere mucha energía. En contraste, en los bosques y otros ecosistemas terrestres penetra sin dificultad pues son zonas en contacto directo con la atmósfera. Entonces, a diferencia de lo que ocurre en los bosques, los cambios en la concentración de oxígeno en lagos, embalses, costas y regiones oceánicas representan un gran riesgo para sus habitantes.

Afortunadamente también se genera oxígeno dentro del agua, gracias a que unos seres diminutos llamados fitoplancton, aparte de las algas y plantas acuáticas (o macrófitas), lo hacen a través de la fotosíntesis. El proceso utiliza carbono inorgánico, como el CO_2 , para producir biomasa orgánica y liberar oxígeno al agua con la energía de la luz solar. La fotosíntesis produce suficiente oxígeno para alcanzar ese 0.5% que pueden contener las aguas superficiales de océanos, mares y lagos. Si se produce más oxígeno, este ya no cabe y se forman burbujas que ascienden a la superficie y escapan a la atmósfera. Si has visto con atención un acuario, seguramente habrás notado estas burbujas que se forman en las hojas de las plantas o algas.

Esta generación biológica de oxígeno únicamente ocurre en la capa hasta donde la luz penetra, la llamada zona eufótica, cuyo espesor máximo es de 120 metros en las aguas más claras del planeta, como en los trópicos, y llega a ser tan delgada como un par de metros en lagos y embalses; en sitios como los canales de Xochimilco, apenas tiene unos centímetros por su alta turbidez y consumo de oxígeno, provocados por el gran número de organismos que se reproducen con rapidez cuando hay exceso de nutrientes. Es decir, cuando el aporte

de nutrientes es excesivo (nitrógeno, fósforo y otros elementos), estos se tornan contaminantes y rompen el balance natural del ecosistema, a este proceso le llamamos eutrofización y la formación de zonas sin oxígeno en el agua es una de sus consecuencias más dramáticas.

Menos oxígeno en un mundo más cálido

El equilibrio del oxígeno entre el agua y el aire depende de varias condiciones. Así, a mayor temperatura del agua, habrá menor solubilidad del O_2 , lo mismo que a menor presión atmosférica (recordemos que en zonas de mayor altitud la presión atmosférica es menor que a nivel del mar), y a mayor salinidad. Mientras más caliente el agua, más salada y a mayor altitud, menos oxígeno le cabe. Piensa en las diferencias entre

una laguna costera y un lago en el cráter de un volcán de 4,000 metros de altitud. Ahora imagina el invierno y verano en esos cuerpos de agua para tener una mejor idea de la variabilidad de los factores.

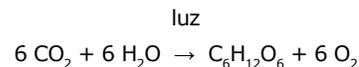
Ante la inminencia del cambio climático, hay que considerar que, con el aumento de la temperatura del océano y de los cuerpos de agua dulce, se reducirá la cantidad de oxígeno que pueden contener, con lo que en un mundo más cálido la situación será más crítica para los organismos acuáticos. Esto se observa en los acuarios: cuando la temperatura se descontrola y sube, los peces mueren asfixiados por la falta de oxígeno antes de que les llegue a afectar la temperatura en sí.

Además, el equilibrio entre el oxígeno que se produce y el que se respira en los

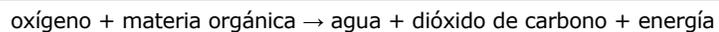
El oxígeno en las reacciones redox y la gran ecuación

Los ciclos biogeoquímicos de la Tierra están dominados por la química redox (reacciones en las que se transfieren electrones). La reacción fotosíntesis-respiración es la que más energía produce en la biósfera e ilustra la influencia de los seres vivos en el oxígeno. Hacia la derecha, la fotosíntesis produce materia orgánica a partir de luz y dióxido de carbono (CO_2), y como subproducto se genera oxígeno molecular (O_2). Si la ecuación ocurre hacia la izquierda, la respiración de la materia orgánica para obtener energía consume oxígeno y libera dióxido de carbono.

► Si ocurre de izquierda a derecha es la fotosíntesis:



► En sentido contrario, y traduciendo las fórmulas químicas, la reacción de respiración queda así:



Solamente las plantas y algunas algas y bacterias poseen la fábrica química para hacer fotosíntesis, es decir, que son capaces de capturar la energía solar, almacenarla químicamente y construir materia orgánica, por eso son considerados "productores primarios". Pero cuando crecen exponencialmente, los cuerpos acuáticos se ponen verdes, el bloqueo de la luz y la respiración de tanta biomasa, literalmente, agotan el oxígeno. Así, los maravillosos cuerpos acuáticos cambian drásticamente en corto tiempo. A veces los peces y crustáceos logran huir, pero si no pueden hacerlo su hábitat natural será letal para ellos. ¿Conoces ejemplos de este tipo cerca de tu localidad?

cuerpos de agua se altera por las entradas adicionales o "externas" de nutrientes y materia orgánica. La "fertilización" por actividades humanas genera sistemas eutróficos, esto es, en los que crece mucho fitoplancton y las aguas se tornan verdes. Esta materia orgánica adicional es degradada por respiración aerobia, consumiendo oxígeno disuelto en el agua. En la respiración aerobia, las células de los seres aerobios, como nosotros, los peces o muchos microorganismos, utilizan el oxígeno para producir energía (reacción química en el recuadro). Cuando el consumo del oxígeno (respiración) es mayor que su producción (por fotosíntesis) y la entrada por el contacto con el aire, el sistema tendrá un cambio abrupto en poco tiempo. El resultado es la formación de zonas con muy poco oxígeno disuelto (hipoxia) o donde no hay oxígeno disponible (anoxia). Se les conocen también como "zonas muertas", ya que la comunidad que esté allí presente, tanto vertebrados como invertebrados y muchos microorganismos (los que son aerobios), mueren rápidamente en grandes cantidades. Ejemplos de estos eventos se leen en las noticias frecuentemente, por ejemplo, muerte masiva de tilapias en el lago de Chapultepec, o las toneladas de peces popocha y carpas en la laguna Cajititlán.

Habitantes acuáticos en riesgo

La falta de oxígeno ocasiona una gran pérdida de biodiversidad; además de la muerte masiva de organismos, hay otros efectos que no son fáciles de estudiar o medir, como la reducción del crecimiento y de la capacidad de reproducción de los seres vivos; también estrés fisiológico, migración forzada o la interrupción en los ciclos de vida. En este sentido se ha documentado que la baja disponibilidad de oxígeno afecta el comportamiento y el crecimiento de la trucha arcoiris, el pez gato, peces cíclidos y renacuajos. Si has tenido un acuario, seguro que has visto la vulnerabilidad de tu pez favorito.

A nivel ecosistémico, algunas consecuencias de gran impacto son la invasión de



HUMBERTO SAHENA

especies oportunistas preparadas para tolerar menos oxígeno, la afectación de importantes servicios ecosistémicos, como la producción de especies de interés comercial, además del deterioro de la calidad del agua con consecuencias socioeconómicas y de salud pública. De hecho, se estudia con mucho interés los efectos de la baja disponibilidad de oxígeno en las pesquerías del golfo de México, que están basadas en aproximadamente 300 especies de peces y mariscos.

El mínimo aceptable de oxígeno en un sistema acuático es de 2 mg O₂/litro, pero para distintos organismos varía entre 0.28 y 4 mg O₂/litro. Esto equivale a aproximadamente el 20% de saturación. Como punto de comparación, la sangre humana por lo general está saturada de O₂ (96% en promedio), y cuando baja del 80% necesitamos atención médica urgente.

Los estudios científicos han descubierto que la fauna béntica, es decir, la del fondo, puede vivir alejada de la fuente de oxígeno del sistema. Sin embargo, la muerte de peces ocurre en eventos de hipoxia, seguida por la de crustáceos (camarones, langostas, cangrejos), después los poliquetos (gusanos), equinodermos (estrellas de mar, erizos), moluscos (caracoles, pulpos) y finalmente los cnidarios (medusas, anémo-

nas), los cuales parecen ser muy resistentes a la falta de oxígeno.

Desafortunadamente, las zonas anóxicas (con poco oxígeno) en ríos, presas, lagos, zonas costeras, bahías y mares son cada vez más frecuentes, a causa del aporte de nutrientes por descarga de aguas residuales y el arrastre de fertilizantes a los ecosistemas acuáticos.

Nuestro grupo interdisciplinario de biogeoquímica acuática de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (<https://youtu.be/cVVzaz-4mP8>) estudia tanto sistemas oxigenados (ríos y lagos o lagunas de aguas claras) como sistemas eutrofizados. Ejemplos de los primeros son la laguna Nichupté en Quintana Roo o el lago Alchichica en el Eje Neovolcánico Transversal (figura 1). Un ejemplo de los segundos se encuentra en el embalse de Valle de Bravo, en el Estado de México, cuya mitad más profunda permanece anóxica (figura 1). La eutrofización del río Usumacinta también causa hipoxia (menos de 20%) hacia su desembocadura en época de lluvias (<https://bit.ly/3Liw28Q>).

Del mismo modo hemos visto problemas de hipoxia en la laguna de Bacalar, y en las costas del Caribe donde se acumulan toneladas de sargazo, que en la costa son degradadas, o bien, "respiradas" por microorganismos, lo que consume oxígeno. Al pasar de aguas claras, oxigenadas y con pocos nutrientes, hacia aguas turbias y sin oxígeno, las lagunas arrecifales del Caribe, que albergan gran biodiversidad, se tornan en espacios inhabitables para muchos organismos.

Es cada vez más urgente el monitoreo de los cuerpos acuáticos. En Valle de Bravo lo realizamos con la colaboración ciudadana, lo que es de gran importancia para cuidar a los ecosistemas del país. Así que toma un respiro, ponte en los zapatos de tu pez o crustáceo favorito y ayúdanos a saber, ¿cómo están los niveles de oxígeno allí afuera? 

Agradecimientos: Proyecto PAPIIT IN111312 otorgado a MMI y Beca postdoctoral Conacyt otorgada a PMV.

Figura 1. El agua de color verde es signo de exceso de nutrientes o eutrofización, que deriva en el agotamiento del oxígeno por la respiración de la materia orgánica y por la limitada penetración de la luz, la cual permite la producción de oxígeno por fotosíntesis. Arriba, las lagunas Alchichica (Puebla y Veracruz) y Bacalar (Quintana Roo), antes transparentes, han presentado eutrofización, que ya es permanente en Valle de Bravo (Estado de México). También hay zonas del río Usumacinta (Tabasco y Chiapas) que han mostrado “aguas verdes” y periodos de hipoxia.



Lago Alchichica. Laguna de aguas claras con muy pocos nutrientes, en ocasiones se torna verde por florecimientos masivos de cianobacterias.



Laguna Bacalar. Sus aguas claras con muy pocos nutrientes en ocasiones se torna verde por florecimientos masivos de cianobacterias y otros microorganismos.



Río Usumacinta. En varias secciones del río, se aprecian signos de eutrofización como aguas oscuras y mortandad masiva de peces y anfibios.



Embalse Valle de Bravo. Desde los ochenta, este embalse presenta signos de eutrofización: aguas oscuras, florecimientos fitoplanctónicos y capas profundas sin oxígeno.

Bibliografía:

- Calderón-Cendejas, J., Madrid Ramírez, L., Ramírez Zierold, J., et al. (2021). Evaluation of the Impacts of Land Use in Water Quality and the Role of Nature-Based Solutions: A Citizen Science-Based Study. *Sustainability*, 13(19), 10519. <https://doi.org/10.3390/su131910519>
- Guimaraes-Bermejo, M. O., Merino-Ibarra, M., Valdespino-Castillo, P. M., et al. (2018). Metabolism in a deep hypertrophic aquatic ecosystem with high water-level fluctuations: a decade of records confirms sustained net heterotrophy. *PeerJ*, (6), <https://doi.org/10.7717/peerj.5205>
- Merino-Ibarra, M., Ramírez-Zierold, J., Valdespino-Castillo, P. M., et al. (2021). Vertical Boundary Mixing Events during Stratification Govern Heat and Nutrient Dynamics in Windy Tropical Lakes with High Water-Level Fluctuations: A Long-Term (2001-2018) Study. *Water*, 13(21), 3011. <https://doi.org/10.3390/w13213011>

Patricia M. Valdespino es investigadora posdoctoral en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México | pancronica@gmail.com | <http://orcid.org/0000-0002-2998-4627>
 Jorge A. Ramírez-Zierold es egresado del Doctorado en Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México | jramirezzierold@yahoo.com.mx | <http://orcid.org/0000-0001-8094-1852>
 Oscar Gerardo-Nieto es investigador posdoctoral en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México | oagerardon@gmail.com | <http://orcid.org/0000-0003-3299-9456>
 Martín Merino-Ibarra es profesor e investigador titular en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México | mmerino@cmarl.unam.mx | <http://orcid.org/0000-0002-6690-3101>