

Origen del agua y el oxígeno

molecular en la Tierra:
efecto sobre la biodiversidad

Francisco
Fontúrbel R.
Carlos
Molina A.

Los procesos de generación del agua y del oxígeno molecular en la Tierra son los principales responsables de la amplia variedad de formas en la que se manifiesta la vida hoy en día. Estas dos sustancias son los principales reactivos metabólicos de los organismos vivos en todos sus niveles de organización y complejidad.¹

El agua es necesaria para la formación y combinación de las diferentes moléculas inorgánicas y orgánicas que dieron origen a los coacervados, los cuales posteriormente originaron las primeras células, a partir de las que se desarrollaron todas las demás formas de vida.

La vida se originó en ausencia de oxígeno molecular; en un medio con condiciones extremas de temperatura, radiación y potencial Redox, la atmósfera primitiva era fuertemente reductora² y los organismos eran heterótrofos,¹ pero el aporte de oxígeno molecular, producto de reacciones químicas y metabólicas, dio lugar a uno de los cambios más importantes en el planeta: una atmósfera oxidante rica en O₂. El oxígeno molecular, que es metabólicamente más eficiente como aceptor final de electrones, posibilitó aumentar la cantidad de energía obtenida, lo que posiblemente permitió pasar de las formas unicelulares más simples a formas pluricelulares tan complejas como un vertebrado o una angiosperma, a lo largo de millones de años de evolución orgánica.

Luego de la formación de los elementos químicos por procesos de fusión nuclear, que inicialmente dieron lugar a elementos livianos, y por nuevas fusiones a elementos pesados (los cuales se forman en los astros), fue posible la aparición del agua y del oxígeno molecular en la Tierra.

Las teorías planteadas para ambos casos aún tienen falencias y dejan algunos aspectos sin explicar, pero los últimos avances³ han podido hilvanar una teoría lo suficientemente coherente y clara sobre estos dos fenómenos, que apoya los planteamientos de Oparin⁴ y Haldane⁵ acerca de la influencia de estos elementos sobre el metabolismo y la diversificación evolutiva.

En la presente revisión se pretende dar un enfoque descriptivo-crítico de las teorías de origen del agua y el oxígeno molecular en la Tierra, a fin de relacionar su efecto e influencia sobre la biodiversidad pasada y actual.

TEORÍAS DEL ORIGEN DEL AGUA EN LA TIERRA

En la actualidad se plantean dos teorías sobre el origen del agua en la Tierra: la teoría volcánica^{6,7} y la teoría extraterrestre de los meteoritos transportadores de agua.^{3, 6, 8} Ambas teorías siguen en tela de discusión por las escuelas de científicos que toman una u otra posición, aunque actualmente se ha visto que lo más razonable es aceptar ambas teorías⁶ ya que una complementa en gran medida las falencias y vacíos de la otra y viceversa.

La teoría volcánica^{6,7} plantea que el agua se formó en el centro de la Tierra, por reacciones a altas temperaturas (800 °K) entre átomos de hidrógeno y oxígeno. Las moléculas formadas por esta reacción fueron expelidas a la superficie terrestre en forma de vapor (por la temperatura a la que se encontraban); algo de este vapor de agua pasó a formar parte de la atmósfera primitiva (esta atmósfera primitiva carecía de oxígeno molecular), y otra parte se enfrió y condensó para formar el agua líquida y sólida de la superficie terrestre. Este proceso tomó millones de años, pero las evidencias experimentales que se tienen actualmente plantean que el agua está presente en la Tierra hace unos 3,8 billones de años.⁷

La teoría más reciente atribuye el origen del agua a causas extraterrestres. Numerosos estudios realizados por la NASA³ apoyan los planteamientos de Tobias,⁶ Mojzsis⁹ y *Scientificweek*,⁸ quienes afirman que el agua llegó a la Tierra en forma de hielo, en el interior de numerosos meteoritos, que al impactar sobre la superficie terrestre liberaron este compuesto y llenaron los océanos (o al menos parte de ellos).

Cuando esta teoría fue planteada recibió una gran cantidad de críticas y censuras, pero estudios referidos por Mojzsis⁹ hablan de otros impactos de meteoritos sobre la Tierra, a



los cuales se atribuye el haber contribuido con concentraciones significativas de otros elementos y moléculas químicas a la "sopa" donde se originaron las macromoléculas orgánicas y los coacervados. Posteriormente, científicos de la NASA³ han comunicado algunos descubrimientos que constituyen la primera evidencia sólida para este suceso: análisis del cometa S4 LINEAR han mostrado una similitud muy grande entre la composición y estructura química de éste con el agua que actualmente existe en los océanos de la Tierra, así como estudios de presencia de deuterio (átomos de hidrógeno con un neutrón extra, característicos de este tipo de cometas) inclusive en las profundidades de los mares, siendo que el D₂O se encuentra en toda el agua –independientemente del tipo de cuerpo de agua o la profundidad– en una relación natural aproximada de 99.85% de H y 0.15% de D.

Si bien ambas teorías son muy distintas y tienen poco en común, ambas todavía dejan algunas dudas sobre su validez, ya que ninguna de ellas explica del todo el origen del agua en el planeta. La teoría volcánica habla de una hidrogénesis masiva en el centro de la Tierra, proceso que fue desarrollándose paralelamente a la formación de la atmósfera primitiva,⁶ por lo que una parte considerable del agua generada por las reacciones químicas tuvo que evaporarse hacia el espacio o reaccionar con otros compuestos de la atmósfera primitiva.

Por otro lado, si bien la presencia de hielo en algunos planetas, la luna y algunos cometas apoya la teoría extraterrestre, los niveles de xenón presentes en la atmósfera terrestre son diez veces mayores que los presentes en los cometas, aunque se debe considerar que esta variación puede de estar influenciada por las condiciones de gravedad en la Tierra que son diferentes a las de los cometas, y que el xenón –como gas noble– no sufre reacciones químicas y no puede ser fijado como compuesto. En este caso la interpretación de la cantidad de xenón puede ser usada como prueba tanto para aceptar como para refutar la teoría extraterrestre, de acuerdo a cómo se interpretan estos hallazgos.

Las consideraciones anteriores sugieren, según Tobias,⁶ que el agua en la Tierra no fue originada por una sola causa, sino que más bien debería pensarse en un hipotético origen mixto, ya que de esta manera se complementan ambas teorías bajo un postulado lógico y coherente: parte del agua se originó en la Tierra por reacciones a elevadas temperaturas y erupciones volcánicas, y la otra parte provino de los come-



© Lorena Campbell, Bogotá, 2002.

tas. Esta idea concuerda también con el planteamiento de que la atmósfera y los océanos se desarrollaron juntos.

Sin embargo, tampoco existen pruebas contundentes para aceptar plenamente el origen mixto, y quedan abiertas las puertas al planteamiento de otras nuevas teorías.

TEORÍA SOBRE EL ORIGEN DEL OXÍGENO

MOLECULAR EN LA TIERRA

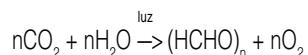
Para este caso, existe una sola teoría general aceptada –aunque todavía bajo discusión– entre los científicos, la cual plantea que el oxígeno molecular en la Tierra se originó a partir de la fotosíntesis de las cianobacterias ancestrales.^{9, 10}

Antes de desarrollar esta teoría es importante repasar el origen del elemento oxígeno en la Tierra. Lazcano-Araujo¹ habla de la evolución química en la Tierra y plantea la fusión de los átomos de hidrógeno a elevadas temperaturas para formar nuevos átomos: inicialmente dos átomos de hidrógeno más dos neutrones dieron lugar a un átomo de helio, y luego el carbono se originó a partir de helio y berilio (formado por dos átomos de helio), y posteriormente el oxígeno se forma a partir de átomos de helio y carbono (Tabla 1).

El átomo de oxígeno fue uno de los primeros en formarse en el proceso de evolución química, sin embargo la forma diatómica (molecular: O₂) tardaría en aparecer porque la mayor parte del oxígeno se encontraba asociado a otros elementos (H, C, N, metales, etc.), y en este estado no era reactivo ni podía ser usado como acceptor final de electrones en las cadenas metabólicas.

Para describir el modelo de las cianobacterias, es necesario situarse en un planeta Tierra que ya posee grandes cantidades de agua, donde habitan microorganismos heterótrofos y fotosintéticos¹ distribuidos en diferentes profundidades, y por lo tanto con diferentes características ecológicas. En este planeta primitivo ya existía una atmósfera de carácter fuertemente reductor (totalmente reductor), debido a la heterogeneidad de la mezcla gaseosa que la componía,² en la cual los procesos metabólicos eran simples, anaerobios y de baja eficiencia energética.¹

Las cianobacterias son un grupo de microorganismos procariotas fotosintéticos, cercano a las algas (bajo algunas clasificaciones se encuentran clasificadas como algas verde-azules) por la presencia de pigmentos fotosintéticos clorofílicos que, mediante la acción de la luz, catalizan la siguiente reacción:



Esta reacción muestra el origen del oxígeno molecular a partir de la ruptura de las moléculas de agua, y de esta forma se fue aportando –durante millones de años– el O₂ a la atmósfera, incrementando su concentración hasta cambiar su carácter de reductora a oxidante.²

REACTIVOS	PRODUCTOS
H + H + 2n ⁰	He ⁴ + energía
He ⁴ + He ⁴	Be ⁸
He ⁴ + Be ⁸	C ¹² + energía
He ⁴ + C ¹²	O ¹⁶ + energía

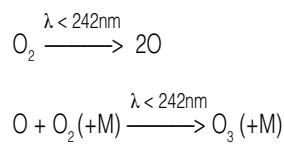
TABLA 1: Algunas reacciones de condensación nuclear a partir de átomos de hidrógeno, que dieron lugar al elemento oxígeno (según referencia 1).



© Lorena Campbell, Bogotá, 2002.

Si bien la teoría de las cianobacterias plantea que este mecanismo fue el responsable de la presencia del O₂ en la atmósfera, evidencias experimentales han mostrado que puede no ser el único: la incidencia de la radiación ultravioleta produce la fotodegradación de la molécula de agua, que genera una cierta porción de oxígeno molecular,² sin embargo ésta no debió ser muy significativa porque la longitud de onda necesaria para la fotodegradación del agua ($\lambda < 210$ nm) es la misma que absorbe el oxígeno, y por lo tanto la reacción se detiene en poco tiempo.

La capa de ozono en la Tierra se formó como consecuencia de la aparición del oxígeno molecular atmosférico, puesto que las moléculas de oxígeno que se encontraban a mayor altura fueron alcanzadas por la radiación ultravioleta produciendo una molécula triatómica de oxígeno (O₃), denominada ozono, según la siguiente reacción:



Donde M es cualquier molécula que acepte el exceso de energía.

La acumulación del ozono sería otro de los factores que marcó el rumbo de la evolución orgánica en la Tierra, ya que esta capa actúa como un filtro muy eficiente de la radiación uv,¹ dañina para los organismos vivos a nivel del DNA.

IMPLICACIONES DEL AGUA Y EL OXÍGENO MOLECULAR EN LA EVOLUCIÓN Y DIVERSIFICACIÓN DE LOS SERES VIVOS

El agua es la condición esencial que propició la vida en el planeta debido a que en ella se dieron las reacciones de formación de los nuevos compuestos inorgánicos y orgánicos a partir de los átomos, moléculas y radicales libres que se encontraban en ella, con la intervención de descargas eléctricas y radiaciones lumínicas.

De no haber agua en la Tierra, no hubiese sido posible la formación de los coacervados, ya que ni siquiera hubiese ocurrido la condensación de átomos de carbono e hidrógeno en cadenas poliméricas, y menos aún la aparición de un metabolismo primario de flujo semipermeable de líquidos entre la parte interna y externa de las protomembranas poliméricas formadas por esa condensación de átomos. El agua fue, es y seguirá siendo el solvente universal de todas las sustancias inorgánicas y orgánicas, y esta solubilización de los componentes produjo nuevas combinaciones entre ellos, que poco a poco dieron origen a las moléculas biológicas que se conocen hoy en día.

Los organismos vivos dependen del agua para todas sus funciones vitales, incluso después de varios millones de años de evolución. No se conoce hasta la fecha organismo vivo alguno que no necesite de agua, ya que ésta forma entre el 5 y 95% del peso total de los seres vivos; es el reactivo y producto fundamental de todas las vías metabólicas conocidas actualmente. Incluso el oxígeno molecular se generó a partir del agua, ya que éste provino de la ruptura de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, por la acción metabólica de las cianobacterias.¹



© Lorena Campbell, Bogotá, 2002.

Si bien el agua fue la condición esencial para la vida, la aparición del oxígeno molecular atmosférico en grandes cantidades fue posiblemente la responsable de la biodiversidad tal como se la conoce hoy en día.⁴ La presencia de oxígeno molecular en cantidades razonables hizo que la atmósfera primitiva de la Tierra cambiase de predominantemente reduc-tora a predominantemente oxidante,² y que la molécula de O₂ estuviese disponible como aceptor final de electrones. Los microorganismos que primero dominaron la Tierra eran netamente heterótrofos, anaerobios, y algunos fotosintéticos, y su metabolismo era pobre en términos energéticos.¹ La aparición del oxígeno molecular hizo que éste pudiera ser usado como aceptor final de electrones de las vías metabólicas de algunos microorganismos, los cuales tuvieron una rápida radiación adaptativa por la gran ventaja energética que estas nuevas rutas metabólicas les proveían, y pasaron a ser la forma de vida dominante en el planeta,³ pero sin desplazar completamente a las formas heterotróficas y anaerobias (algunas de ellas siguen existiendo actualmente), ya que la distribución de O₂ no es homogénea en los ambientes naturales.

A parte de la notable ventaja energética que confirió el oxígeno molecular al involucrarse en las rutas metabólicas de los microorganismos primitivos, la generación de la capa de ozono tuvo también un papel fundamental en la diversificación de los organismos.² La radiación ultravioleta penetraba por la atmósfera primitiva (en mayor cantidad que por la atmósfera actual, porque el H₂O y el CO₂ atmosféricos actuaban como filtros, aunque menos eficientes que el O₃) provocando diversos efectos sobre las moléculas de la “sopa” original, y fue gracias a ella que se formaron muchas de las sustancias necesarias para la formación de los coacervados y las protocélulas; sin embar-

go, la incidencia de la radiación UV sobre el material genético y estructural de los microorganismos ancestrales era un problema, ya que ésta produce la ionización y ruptura de los enlaces, y mutaciones en el DNA. Al crearse la capa de ozono –por acción de la misma radiación UV– se frenó de gran manera la entrada de las ondas UV a la Tierra, de esta manera se estabilizó la temperatura en la superficie y se redujo considerablemente la presión de selección sobre los microorganismos, dando lugar a una gran diversificación;¹ sin embargo, es conveniente aclarar que las formas de vida que se desarrollaron en las profundidades del mar no enfrentaron este problema porque la radiación UV sólo penetra unos pocos metros en el agua.

Estas dos ventajas permitieron pasar de formas celulares simples a formas más complejas y, lo más importante, permitieron pasar de formas unicelulares a formas pluricelulares. La aparición de nuevas rutas metabólicas y la generación de nuevas formas de las biomoléculas básicas produjeron la formación de los diferentes reinos y sus respectivos subgrupos. De no haberse generado el oxígeno molecular atmosférico en la Tierra, tal vez no hubiese sido posible siquiera pasar a las formas pluricelulares más simples, y en este momento el mundo estaría poblado por microorganismos heterotróficos de estructura y fisiología muy simple, a no ser que la ausencia de competidores aeróbicos hubiese cambiado el rumbo de la evolución hacia otro tipo de formas anaeróbicas.

Las organizaciones pluricelulares fueron desarrollando un metabolismo coordinado con una clara división de labores, ya que el oxígeno generó una “sobrealimentación” (relativa) de las células⁹ y les dio una mayor capacidad de

desarrollo. Los cambios metabólicos que se produjeron tanto en las formas unicelulares como en las pluricelulares fueron muy profundos y generaron una gran diversidad metabólica,⁴ mediante la cual los seres vivos pueden usar una amplia variedad de sustancias como fuente de energía para vivir.

El oxígeno se ha convertido en un elemento esencial para el metabolismo de los organismos vivos, tanto que varios filos de animales han desarrollado pigmentos transportadores de oxígeno⁵ que se encargan de llevarlo desde la superficie de los tejidos a todas las demás células.

Con las condiciones de agua y oxígeno molecular ya dadas, el proceso evolutivo produjo una gran diversidad de todo tipo de organismos vivos (plantas, animales, hongos, microor-



la presencia de la capa de ozono fue de mucha importancia, ya que la incidencia de la radiación UV sobre la superficie terrestre es mayor que en el agua. El proceso de colonización terrestre fue un gran paso para plantas y animales, puesto que precisó de una reformulación del plan estructural, metabólico y fisiológico de los mismos para aprovechar el oxígeno atmosférico y para hacer frente a las condiciones cambiantes de temperatura, la falta de humedad y el no tener una fuente constante de agua. Tampoco se debe desacreditar la extraordinaria adaptación de algunos organismos al medio acuático,



© Lorena Campbell, Bogotá, 2002.

ganismos) en los mares y cuerpos de agua del planeta Tierra. La vida en el medio acuático se desarrollaba con buenas perspectivas por las condiciones de disponibilidad hídrica, humedad, radiación lumínica y temperatura, pero entre los períodos geológicos Devónico y Silúrico¹¹ el oxígeno se convirtió en un recurso escaso en el agua, ya que por efecto de la temperatura y la presencia de otros solutos, la cantidad de oxígeno disuelto disponible para los organismos era cada vez menor.

Esta escasez de oxígeno en el medio acuático llevó a varios grupos de plantas, animales y microorganismos a migrar hacia el medio terrestre, donde si bien la cantidad de oxígeno es mucho mayor y es más fácilmente asimilable, el resto de las condiciones ambientales son menos favorables que en el agua; es importante aclarar que, para este proceso,

que desarrollaron eficientes mecanismos para capturar el escaso oxígeno que se encuentra disuelto en el agua, tal es el caso de los peces y algunos invertebrados.

Una vez que el medio terrestre fue colonizado con éxito por los distintos grupos de organismos, se propició un nuevo estallido de diversidad, a partir del cual se generaron las miles de especies (vivas y extintas) que se conocen hoy en día.

CONCLUSIONES

Después de revisar las teorías del origen del agua y el oxígeno molecular en la Tierra, se determinó que ambos fenómenos son directamente responsables de la biodiversidad que se conoce hoy en día.

La aparición del agua en el planeta –tanto por causas volcánicas como por causas estelares– fue el requisito esencial



REFERENCIAS

para que se originara la vida, ya que sin este medio y solvente universal no habría sido posible el complejo conjunto de reacciones químicas que formaron las biomoléculas que dieron origen a los coacervados y posteriormente a las primeras células.

El oxígeno fue quizá el factor determinante para la explosión de formas uni y pluricelulares, ya que propició una serie de cambios metabólicos muy complejos que permitieron emplear al oxígeno como acceptor final de electrones y así obtener mayor energía de las sustancias químicas. Esta evolución del metabolismo permitió pasar a formas unicelulares más

¹ Lazcano-Araujo, A., *El origen de la vida. Evolución química y evolución biológica*. 3ra. edición, Editorial Trillas, México DF, 1989, pp. 29-31, 39-41, 69-73.

² Folsome, E., *Origen de la vida*, Editorial Reverté, Barcelona, 1989, pp 35-56.

³ NASA Goddard Space Flight Center. *First evidence that comets filled the oceans: A dying comet's kin may have nourished life of Earth*, 2001. <http://www.gsfc.nasa.gov/gsfc/spacesci/origins/linearwater/linearwater.htm>

⁴ Oparin, A.I., *Origen de la vida sobre la Tierra*, Editorial Tecnos, Madrid, 1970, pp. 299-312.

⁵ Haldane, J.B.S., *The causes of evolution*, Princeton Science Library, New Jersey, 1990, pp. 86-87.

⁶ Tobias, C., *What do we know about the origin of the earth's oceans? Is it more likely that they derive from icy comets that struck the young Earth or from material released from the Earth's interior during volcanic activity?*



complejas y a formas pluricelulares, que en el curso de millones de años de evolución dieron lugar a plantas, animales y hongos, cada grupo con una diversidad extraordinaria.

La colonización terrestre se debió en gran medida a la escasez del factor oxígeno en el agua, si bien muchas de las formas acuáticas se adaptaron para aprovechar los niveles de oxígeno presentes en el agua, muchas otras migraron al medio terrestre donde éste es más abundante, pero tuvieron que pasar un largo proceso de adaptación para hacer frente al resto de las condiciones ambientales del nuevo medio.

Finalmente, de no haberse formado el agua no habría vida en el planeta, y de no haberse formado el oxígeno molecular atmosférico, tal vez no habrían existido formas pluricelulares, sino solamente organismos heterótrofos más simples, de metabolismo anaeróbico.

Scientific American: Ask the Experts: Environment, sf., <http://www.sciam.com/askexpert/environment/environment13.html>

⁷ Wood, C., *I've hear that the water of the oceans came from volcanoes*, sf., Personal communication with Cliff Unger, posted on Internet at http://volcano.und.nodak.edu/vwdocs/frequent_questions/grp13/question1650.html

⁸ Scienceweek, *Science-week focus report: Earth science: Origin of water on Earth*, 1999, <http://scienceweek.com/swr065.htm>

⁹ Mojzsis, S., "El origen de la vida en la Tierra", *National Geographic*, en español, vol. 2 (3) 1998, pp 54-81.

¹⁰ Science a Go Go, *Rocks provide clues to origin of oxygen on Earth*. 2000, http://www.scienceagogo.com/news/20000706041735data_trunc_sys.shtml

¹¹ Achá, D., F. Fontúrbel & D. Mondaca, *Manual de introducción a la botánica*, 2da. edición, La Paz. En preparación.

Francisco Fontúrbel R. y Carlos Molina A., Universidad Mayor de San Andrés, Carrera de Biología, La Paz, Bolivia.
fonturbel@yahoo.es