

El origen del agua terrestre: la ciencia actual desde la visión de Odón de Buen

—
Alfonso Pardo

Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural. Escuela Politécnica Superior, Huesca, Universidad de Zaragoza

Figura 1: El origen, evolución y dinámica del agua terrestre es un tema recurrente que ha venido interesando y ocupando a la Ciencia desde la antigüedad. Fotografía: Javi Ribas

El origen, evolución y dinámica del agua terrestre son temas que han venido interesando y ocupando a los científicos desde la antigüedad. El movimiento del agua en la Tierra se describe mediante el ciclo hidrológico, esencial para el equilibrio ambiental y para la vida, que ha venido sucediendo en nuestro planeta desde hace miles de millones de años. El origen del agua en la Tierra es una cuestión que la ciencia todavía no ha resuelto completamente. Una de las características que hacen de la Tierra un planeta tan especial es la coexistencia de agua en sus tres estados físicos. La existencia de abundante agua líquida en la Tierra está directamente relacionada con la existencia de vida en nuestro planeta.

El origen del agua de nuestro planeta ha intrigado al hombre desde el inicio de su historia. Buena prueba de ello es la descripción que del origen de los mares se hace en los primeros versículos del Génesis, y que tanto ha condicionado el pensamiento en la cultura judeo-cristiana:

1:6 Luego dijo Dios: Haya expansión en medio de las aguas, y separe las aguas de las aguas.

1:7 E hizo Dios la expansión, y separó las aguas que estaban debajo de la expansión, de las aguas que estaban sobre la expansión. Y fue así.

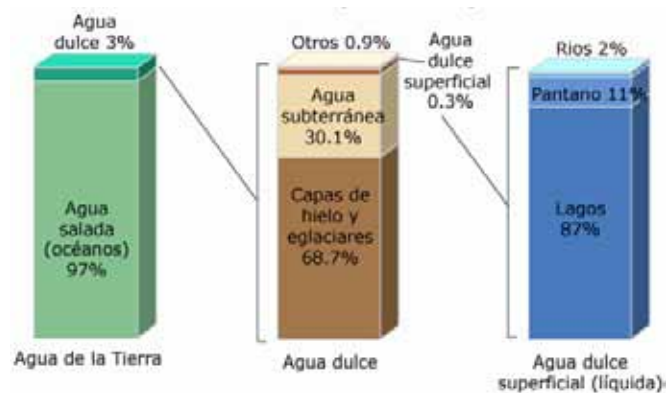
1:8 Y llamó Dios a la expansión Cielos. Y fue la tarde y la mañana el día segundo.

1:9 Dijo también Dios: Júntense las aguas que están debajo de los cielos en un lugar, y descúbrase lo seco. Y fue así.

1:10 Y llamó Dios a lo seco Tierra, y a la reunión de las aguas llamó Mares. Y vio Dios que era bueno.

En septiembre de 1921, el Dr. Odón de Buen impartió en la sede de San Sebastián de la Sociedad de Oceanografía de Guipúzcoa la conferencia "El origen de los mares". Hasta nosotros ha llegado su transcripción, y su lectura nos revela lo avanzada que estaba la visión del Dr. De Buen respecto del conocimiento que la ciencia actual tiene del origen, evolución y dinámi-

Figura 2: Distribución global del agua en la Tierra. Fuente: US Geological Survey



ca del agua terrestre. "Aunque no corresponda exactamente al tema de esta conferencia, ¿Cómo no hablaros del origen de la vida oceánica [...]?" propuso De Buen a su auditorio, enlazando así dos cuestiones que no son tan simples como pudieran parecer a primera vista (Figura 1). Veámoslo.

El volumen total del agua terrestre se denomina hidrosfera. El agua almacenada en las cuencas oceánicas cubre unas dos terceras partes de la superficie terrestre, alcanzando una profundidad máxima de unos 11 km y una profundidad media de unos 3,5 km, lo que representa aproximadamente el 97% del total de agua del planeta (Figura 2, Tabla 1).

El agua terrestre está en movimiento y cambiando frecuentemente su estado, de líquido a vapor, a hielo, y viceversa. La presencia y el movimiento del agua en la Tierra se describe mediante un esquema cíclico, ciertamente complejo, pero que recoge todos los caminos, procesos, fuentes, sumideros y reservorios en un bucle sin fin que ha venido sucediendo en nuestro planeta desde hace miles de millones de años, y que resulta esencial para su equilibrio ambiental y para la vida (Figura 3). La Tierra sería un sitio inhóspito si el ciclo del agua no tuviese lugar.

El ciclo del agua no se inicia en un lugar específico, pero conecta los distintos reservorios de agua del planeta entre sí (Figura 3, Tabla 1). Existen tres grandes dominios: los océanos, la atmósfera y los continentes. Los océanos son el gran reservorio del agua planetaria, y de ellos el agua sólo puede escapar por dos vías: evaporándose hacia la atmósfera, o por subducción hacia el interior de la litosfera.

El agua que se infiltra hacia el interior es un lubricante esencial para la tectónica de placas, y favorece el movimiento de las placas litosféricas,



Figura 3: Esquema sintético del ciclo del agua. Fuente: US Geological Survey

ricas, los terremotos, y el volcanismo. Finalmente sale de regreso a la atmósfera a través de los gases y fluidos que se producen en los episodios volcánicos.

En su recorrido por la superficie y el subsuelo de los continentes, el agua disuelve una gran cantidad de sales y otros compuestos químicos. Cuanto más tiempo esté circulando por el entorno continental mayor será la carga de sustancias en disolución. Finalmente, el agua regresa al océano portando su carga de sales disueltas, y de nuevo inicia el ciclo al evaporarse. La iteración de este ciclo a lo largo del tiempo geológico, ha ido aumentando la salinidad de los océanos. Sólo cuando ésta supera ciertos umbrales se produce la precipitación del exceso de sales en el lecho marino produciendo rocas de precipitación química. De no ser así, los océanos habrían alcanzado niveles de salinidad incompatibles con la vida hace ya muchos millones de años.

La ciencia actual ha descrito y cuantificado con notable precisión el ciclo y los reservorios del agua terrestre. Sin embargo, su origen, así como la razón por la que existe más agua en la Tierra que en los demás planetas del Sistema Solar, es un asunto que la ciencia todavía no ha resuelto, y ha habido que esperar hasta la segunda mitad del siglo XX para que los científicos comenzasen a explicar satisfactoriamente los mecanismos que dieron lugar al nacimiento y posterior evolución de los océanos.

Durante la formación del planeta, la energía liberada por el choque de los planetesimales, y su

posterior contracción por efecto de la fuerza gravitatoria, provocó el calentamiento y fusión de los materiales. El proceso de acreción y diferenciación hizo que los diferentes elementos se reestructurasen en función de su densidad. Este mecanismo originó las distintas esferas en las que está compartimentada la materia en el planeta: un núcleo que concentra los elementos más densos y en su mayor parte formado por hierro y níquel, y algunos compuestos de estos metales con oxígeno, silicio y azufre; el manto formado en su parte superior por minerales como el olivino o el piroxeno, y rocas como la peridotita y la eclogita; y la corteza cuya composición media en el caso de la oceánica es similar al basalto, mientras que la continental es de composición granítica.

Uno de los resultados de la diferenciación planetaria fue la desgasificación del magma y la liberación de una enorme cantidad de elementos volátiles a las zonas más externas, originando la protoatmósfera terrestre, que posteriormente evolucionaría hasta formar dos nuevas esferas: la hidrosfera y la atmósfera. Los elementos más ligeros, como el hidrógeno molecular y el helio, escaparon al espacio exterior. El único hidrogeno que permaneció ligado a la gravedad terrestre fue el que se encontraba químicamente ligado al oxígeno, formando moléculas de agua, junto con otros gases más pesados que también fueron retenidos por la atracción gravitatoria.

Así, una cantidad considerable de agua se encontraría en el material original que formó la Tierra. En las primeras fases de formación, cuando la

masa terrestre era menor, las moléculas de vapor de agua se habrían escapado con mayor facilidad de la gravedad terrestre al espacio exterior, junto con el hidrógeno y el helio. Este proceso fue disminuyendo conforme el planeta se aproximaba a su masa crítica durante el proceso de acreción. Cuando la temperatura terrestre disminuyó lo suficiente, el vapor de agua, que es un gas menos volátil que el CO₂ o el N₂, comenzó a condensarse formando nubes, y posteriormente precipitando a la superficie en forma de lluvia.

De este modo, las cuencas comenzaron a llenarse con la precipitación de grandes cantidades de lluvia ácida y caliente, entre 30°C y 60 °C. El volumen del agua liberada a la atmósfera por este proceso y que precipitó a la superficie fue aproximadamente de 1,37 x 10⁹ km³. Esta agua ácida era un eficaz disolvente que comenzó a arrancar iones solubles de las rocas de la superficie, por lo que la tasa de meteorización química de las primeras rocas ígneas que afloraron en la superficie formando las primeras masas continentales sería superior a la actual. El resultado fue que, conforme circulaba por la superficie, el agua comenzó poco a poco a aumentar su salinidad.

Con todo, hay científicos que sostienen que parte del agua del planeta proviene del choque de cometas contra la prototierra en las últimas fases del proceso de acreción. En este sentido hay cálculos que parecen indicar que si únicamente el 10% de los cuerpos que chocaron contra la Tierra durante la acreción final hubiesen sido cometas, toda el agua planetaria podría ser de origen cometario, aunque estas ideas son especulativas y objeto de debate entre los especialistas.

La hipótesis de que toda el agua de la Tierra provenga exclusivamente de los cometas parece

inverosímil, si se observan las mediciones de las proporciones de isótopos de hidrógeno de los cometas Halley, Hyakutake y Hale-Bopp. La proporción deuterio/hidrógeno (D/H) de estos cometas es aproximadamente el doble que la del agua oceánica. No obstante, tampoco está claro si estos cometas son representativos de los del Cinturón de Kuiper. Por otra parte, el agua contenida en las condritas carbonáceas –un tipo de meteoritos que datan del proceso de formación del sistema solar– presentan una a una proporción D/H similar a la del agua oceánica (Figura 4).

Distintos estudios sugieren que la presencia de agua líquida en la superficie terrestre se dio ya en fases muy tempranas, hace entre 4,4 y 4,0 x 10⁹ años, muy poco tiempo después de la formación del planeta. Esto se ha podido inferir gracias a la datación radiométrica en cristales de zircón –un nesosilicato que es quizá el mineral más antiguo conocido de la Tierra y que se puede datar gracias a las impurezas de uranio– contenidos no en rocas ígneas sino en rocas sedimentarias, que requieren para su formación la acción erosiva y sedimentaria del ciclo del agua.

Una de las características que hacen de la Tierra un planeta tan especial en el sistema solar es que su temperatura media anual permite la coexistencia de agua en sus tres estados físicos, y además que la mayor parte del agua que existe se encuentre en estado líquido. En otras palabras, es el agua líquida la que hace de nuestro planeta un lugar único. Es más, parece que no es casual que el hecho de que el agua líquida sea tan abundante en la Tierra tenga una estrecha relación con el hecho de que en nuestro planeta exista la única vida que hasta el momento conocemos. Por eso, los exobiólogos buscan en otros planetas lugares similares a aquellos en los que se pudo originar la vida en la Tierra.

Reservorios de agua	Volumen de agua, en km ³	% agua dulce	% total de agua
Océanos, Mares y Bahías	1,338,000,000	--	96.5
Capas de hielo, Glaciares y Nieves Perpetuas	24,064,000	68.7	1.74
Agua subterránea	23,400,000	--	1.7
Dulce	10,530,000	30.1	0.76
Salada	12,870,000	--	0.94
Humedad del suelo	16,500	0.05	0.001
Hielo en el suelo y permafrost	300,000	0.86	0.022
Lagos	176,400	--	0.013
Dulce	91,000	0.26	0.007
Salada	85,400	--	0.006
Atmósfera	12,900	0.04	0.001
Agua de pantano	11,470	0.03	0.0008
Ríos	2,120	0.006	0.0002
Agua biológica	1,120	0.003	0.0001
Total	1,386,000,000	--	100

Tabla 1. Estimación de la distribución del agua en la Tierra. Fuente: Gleick, 1996



Figura 5: Penacho volcánico en la superficie de Io. Fuente: Nasa



Figura 6: Superficie helada de Europa, bajo la cual podría existir un océano que albergara vida. Fuente: Nasa

Aunque no hay un acuerdo acerca de en qué ambiente concreto se produjeron las primeras formas de vida, casi todos parecen coincidir en que la vida en la Tierra se originó en algún lugar de los océanos.

Algunas hipótesis sugieren ambientes tipo *lagoon*, similares a los que existen en *Shark Bay*, en Australia, donde se preservan unas de las formas de vida más primitivas, los estromatolitos. Allí, el agua salina, la atmósfera primitiva, la radiación ultravioleta y las arcillas con su singular capacidad de adsorber iones en solución pudieron ser los detonantes de la vida.

Otras investigaciones sugieren un comienzo de la vida en ambientes con grandes contrastes de temperatura. Algunos ingredientes de la vida requieren temperaturas cercanas a la congelación para su síntesis, mientras que otros precisan temperaturas de ebullición. Ambas se dan en las fumarolas hidrotermales de las dorsales oceánicas, denominadas *black smokers*. Se trata de ecosistemas a miles de metros de profundidad, sin contacto con la luz solar, y cuya fuente de energía es el calor del interior de la Tierra. Por estas fumarolas sale agua a unos 400° C que no hierve debido a la enorme presión ambiental, mientras el agua circundante apenas alcanza 2° C.

Una tercera línea de investigación sugiere que las primeras formas de vida terrestre pudieron originarse en las lagunas hidrotermales formadas por los geiseres en calderas volcánicas de la Tierra primitiva, similares a los que en la actualidad existen en la caldera de Yellowstone en Wyoming, EEUU.

En todos estos ambientes viven los extremófilos, organismos adaptados a condiciones ambientales imposibles para otros. Con su estudio, los biólogos investigan los límites entre los que es posible la vida. Y en todos los casos, el nexo común es el agua.

Por ello, los exobiólogos que tratan de encontrar vida en otros cuerpos del sistema solar han centrado su interés en aquellos que pueden replicar alguna de estas condiciones ambientales. Y, hasta la fecha, los candidatos más destacados son dos satélites de Júpiter: Io y Europa.

Io es el satélite más cercano a Júpiter, y por ello el que experimenta con mayor intensidad la atracción gravitatoria del planeta gigante. Las observaciones astronómicas indican que, tras la Tierra, Io es el cuerpo geológicamente más activo del Sistema Solar, habiéndose identificado más de 400 volcanes activos en su superficie. Algunos de estos volcanes producen penachos gaseosos de azufre y dióxido de azufre, que se elevan hasta los 500 km de altitud (Figura 5).



Figura 4. Meteorito NWA 869 en la que se observan los cóndrulos, las pequeñas esferas milimétricas de material vítreo o parcialmente fundido que dan nombre a las condritas. Fotografía: H. Raab

Esta actividad volcánica extrema es debida a la disipación de energía proveniente de la fricción provocada en el interior del satélite por efecto del tirón gravitatorio que ejercen sobre Io Júpiter y los demás satélites jovianos.

Los exobiólogos especulan con la posibilidad de que pueda existir vida primitiva en la superficie o subsuelo de Io, relacionada con los fluidos originados por su intensa actividad volcánica.

El otro candidato para albergar vida extraterrestre en el sistema solar es Europa, el menor de los cuatro satélites galileanos. La composición geológica de Europa es principalmente de rocas silicatadas, envuelto por una capa externa de agua de unos 100 km de espesor formada por una gigantesca banquisa de hielo en la superficie y un océano líquido bajo ella (Figura 6).

Algunos exobiólogos han propuesto la posibilidad de que exista vida en este hipotético océano bajo el hielo, en un entorno similar a aquél existente en las profundidades de los océanos de la Tierra cerca de las fumarolas volcánicas de las dorsales oceánicas (Figura 7).

Estas fumarolas serían el resultado, al igual que en el caso de la actividad volcánica de Io, de la fricción provocada por efecto del tirón gravitatorio de Júpiter y de los demás satélites jovianos, y de la presencia de un núcleo de hierro fundido que indujese un campo magnético por influencia del magnetismo de Júpiter.

Como ya avanzó De Buen en su visionaria conferencia de 1921, en este mínimo recorrido hemos podido ver como la del origen del agua y de la vida en la Tierra son cuestiones fundamentales y enlazadas entre sí, que a día de hoy la ciencia no ha resuelto completamente.



Figura 7. Recreación artística de la futura exploración del océano bajo la banquisa de Europa en busca de vida extremófila. Fuente: NASA

(Este artículo es un extracto modificado de un capítulo del libro "Los ibones" que se encuentra en preparación.)

Bibliografía

- Anguita, F., 2002.. *Biografía de la Tierra*. Ed. Aguilar, Madrid, 350 pp.
- De Buen, O., 1921. *El origen de los mares*. Sociedad de Oceanografía de Guipúzcoa, San Sebastián, 7 p.

Martin Chivelet, J., 1999. *Cambios climáticos. Una aproximación al sistema Tierra*. Ediciones Libertarias, Madrid, 328 p.

Gleick, P.H., 1996. Water resources. In *Encyclopedia of Climate and Weather*, ed. S.H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp. 817-823

Pardo, A., 2009. El agua y el origen de la vida. In Bardají, R. (coord.): *Diálogos del agua*. Oficina de la Agenda 21 Local de Zaragoza, Zaragoza, p. 16.

Resumen

El origen, evolución y dinámica del agua terrestre son temas que han venido interesando y ocupando a los científicos desde la antigüedad. El movimiento del agua en la Tierra se describe mediante el ciclo hidrológico, esencial para el equilibrio ambiental y para la vida, que ha venido sucediendo en nuestro planeta desde hace miles de millones de años. El origen del agua en la Tierra es una cuestión que la ciencia todavía no ha resuelto completamente. Una de las características que hacen de la Tierra un planeta tan especial es la coexistencia de agua en sus tres estados físicos. La existencia de abundante agua líquida en la Tierra está directamente relacionada con la existencia de vida en nuestro planeta.

Palabras Clave

Agua, origen del agua terrestre, ciclo hidrológico, hidrosfera, Odón de Buen

Abstract

The origin, evolution and dynamics of Earth's water are topics that have intrigued scientists since ancient times. The hydrological cycle, which is essential for environmental and life balances, describes the movement of water on our planet that has been occurring for billions of years. Nevertheless, that of Earth's water origin is a question that science has not yet fully resolved. The coexistence of water in its three physical states makes the Earth a unique planet. The existence of abundant liquid water on Earth is directly related to the existence of life on our planet.

Keywords

Water, Earth's water origin, hydrologic cycle, hydrosphere, Odón de Buen.