

Sobre el agua y sus misterios (1)

Manuel Bautista Aranda

La importancia del agua en la vida es algo tan evidente, que no necesita muchas explicaciones. Además de ser el líquido más abundante en la Tierra, es como el elixir mágico para la vida. Sin agua no hay vida. En el caso concreto del ser humano, la cantidad de agua que hay en su cuerpo viene a representar alrededor de un 90 % de su peso total al nacer, y se va reduciendo con la edad, para quedar en torno a un 60 % en la vejez. Un joven que pese, por ejemplo, 70 kg tiene en su cuerpo unos 50 kg de agua. Y en algunos animales el porcentaje anterior llega a alcanzar hasta el 95 % de su peso.

Pero es que además, el agua, ese líquido tan abundante, inodoro, incoloro, insípido, de constitución química tan sencilla (H_2O) y aparentemente tan "vulgar", tiene propiedades muy especiales y, aunque parezca mentira, sigue siendo un líquido que se comporta a veces de forma un tanto misteriosa y científicamente inexplicable.

Como el tema es largo, vamos a desarrollarlo en varias entregas. En esta primera nos vamos a centrar en la estructura de la molécula del agua y en algunos de los comportamientos extraños de este líquido. En entregas posteriores iremos examinando temas tan curiosos e interesantes como son las influencias de origen extraterrestre en el agua, sobre cómo nosotros influimos en el agua que nos rodea, sobre si el agua tiene o no tiene memoria y sobre el efecto de los campos magnéticos en el agua.

Sobre la molécula del agua

Para empezar, puede que sorprenda al lector si decimos que a estas alturas todavía no se sabe cómo es exactamente la molécula del agua. Todavía no se ha encontrado un modelo, una configuración de esta molécula, que permita explicar **todos** los comportamientos anómalos del agua. Esto no quiere decir, evidentemente, que no existan modelos que expliquen la mayor parte de estos comportamientos. El problema está en que ninguno de ellos puede explicar **todos**. Lo que significa que estos modelos, aunque sean buenos y útiles en la práctica, todavía no reproducen exactamente la estructura real de la molécula del agua.

Como los extraños comportamiento del agua y la enorme importancia biológica de los mismos se deben en gran parte a la estructura de su molécula, vamos a tratar de explicarla de acuerdo con un modelo comúnmente aceptado, que a los efectos de este artículo es perfectamente adecuado. La explicación es un poco compleja, pero dada su importancia, vamos a tratar de hacerlo, aunque sea de forma simplificada.

El aspecto de la molécula de agua se representa de forma aproximada en la figura 1. En rojo se muestra el átomo de oxígeno y a él están unidos los dos átomos de hidrógeno. La zona coloreada es el espacio por donde circulan los electrones y representa el tamaño de la molécula. Una forma simplificada, y bastante utilizada, es representar la molécula de agua como un tetraedro, con el átomo de oxígeno en el centro y los dos átomos de hidrógeno en dos de los vértices del tetraedro (Figura 2).

Vista de lejos, la molécula de agua es eléctricamente neutra; pero en sus proximidades la situación cambia. Cada átomo de hidrógeno, al unirse con el átomo de oxígeno, lo hace compartiendo su electrón. Pero en esta unión, el reparto del electrón aportado por el hidrógeno no es equitativo, se pasa bastante más tiempo en torno al núcleo del oxígeno que en torno al del hidrógeno, ya que la masa del primero es 16 veces mayor que la del segundo. La consecuencia es que, durante la mayor parte del tiempo, la carga positiva del protón del átomo de hidrógeno no está compensada por la carga negativa de su electrón, y la molécula de agua resulta ligeramente positiva en esa

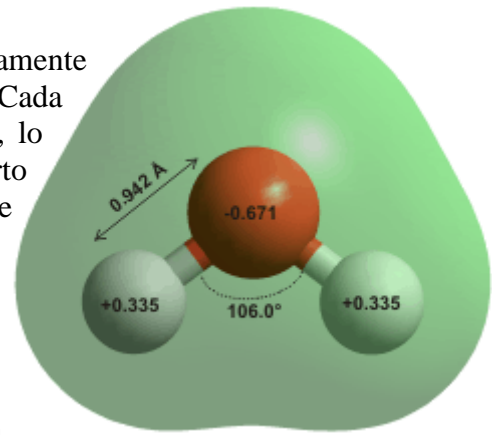


Figura 1. Aspecto de la molécula de agua

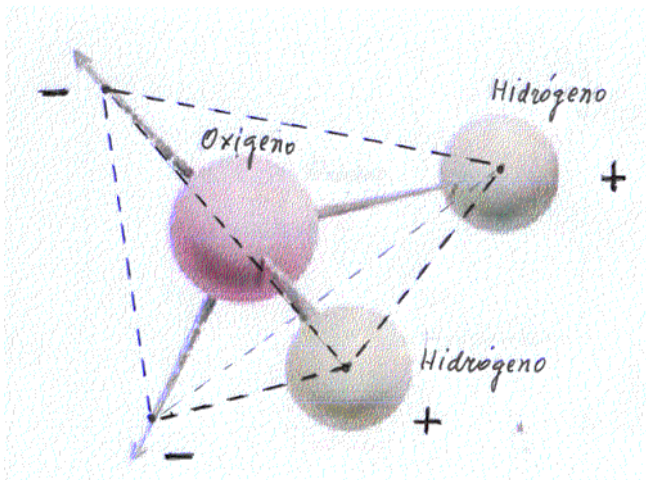


Figura 2. Representación esquemática de la molécula de agua

Esto hace que los dos vértices del tetraedro ocupados por los átomos de hidrógeno muestran una cierta carga positiva, mientras que los otros dos vértices, debido al "exceso" de electrones en el átomo de oxígeno, muestran una cierta carga negativa. Es decir que, según la dirección desde la que se mire, la molécula de agua aparece ligeramente cargada como positiva o como negativa. Por eso se dice que es una molécula polar, que tiene dos polos.

Cuando la molécula de agua está rodeada por otras moléculas de agua, los vértices con carga eléctrica de un cierto signo tienden a unirse con los cargados de signo contrario en las moléculas contiguas, como se muestra en la figura 3. Se crean entre ellas unos enlaces de tipo eléctrico, los llamados puentes de hidrógeno, que son bastante débiles y se puede romper con facilidad. De hecho, las moléculas de agua, por medio de los puentes de hidrógeno, se organizan habitualmente formando complejas agrupaciones, que continuamente se están rompiendo y volviéndose a rehacer. El tamaño y especialmente las formas que pueden tomar estas agrupaciones son prácticamente ilimitadas. Y esto pudiera ser la base de la llamada memoria del agua, de la que trataremos más adelante.

Pero el carácter polar de la molécula del agua y la existencia de los puentes de hidrógeno son importantísimos para explicar la mayor parte de los extraños comportamientos del agua.

Propiedades "anómalas" del agua

Martin Chaplin, catedrático en la London South Bank University, es seguramente una de las personas que más a fondo ha estudiado la estructura y el comportamiento del agua. En

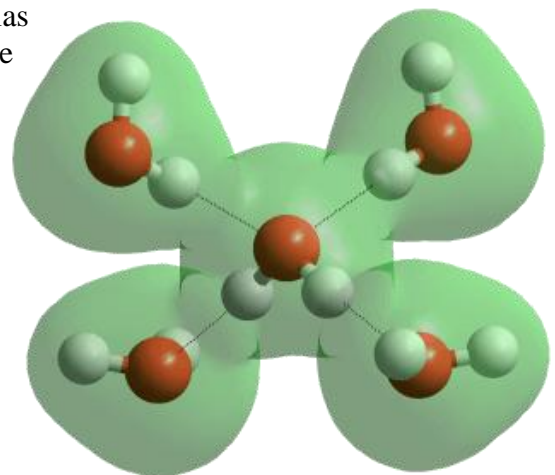


Figura 3. Cinco moléculas de agua unidas por puentes de hidrógeno

sus publicaciones¹ (de las que se han tomado las figuras 1 y 3) identifica, nada menos, que 67 propiedades anómalas del agua, propiedades que no cabría esperar, dada la *aparente* simplicidad de su molécula (H_2O) y la forma tan distinta con que se comportan otras sustancias de peso molecular parecido al del agua. En las líneas que siguen vamos a examinar algunas de estas propiedades anómalas, limitándonos únicamente a las más importantes.

Para empezar, podemos citar el hecho bien conocido hecho de que al enfriar el agua su densidad va aumentando y alcanza su valor máximo a $4\text{ }^\circ\text{C}$. Si se sigue enfriando, aparece un comportamiento extraño: su densidad, a diferencia de casi todos los demás líquidos², empieza a disminuir, con el resultado de que el hielo que se forma es un 8,3 % menos denso que el agua líquida y flota en ella. Este hecho tiene muchas implicaciones. De entrada, tiene una enorme importancia en la vida marina, pues las aguas profundas siempre permanecen líquidas, aunque las temperaturas bajen mucho y las capas superficiales se hielen.

Otra circunstancia extraña es que el agua sea líquida en condiciones normales de presión y temperatura. Otras sustancias con moléculas parecidas a la del agua, como el metano (CH_4), el ácido sulfhídrico (H_2S), el dióxido de carbono (CO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el hidruro de telurio (H_2Te) o el hidruro de selenio (H_2Se), son gaseosas en estas condiciones, y lo normal es que el agua (H_2O) también lo fuese. La causa de ello hay que atribuirlo en parte al alto valor de su tensión superficial³, a esa especie de piel muy sutil que rodea la superficie del agua, que es producida por los puentes de hidrógeno antes citados.

También resulta anómalo, y atribuible a los puentes de hidrógeno, el hecho de que el agua sea la sustancia que más calor hay que aportarle para que hierva y más calor hay que extraerle para que se congele. Su calor específico también es anormalmente grande, es el líquido que más calor necesita (a excepción del amoníaco) para modificar su temperatura. Por ejemplo, para elevar un grado la temperatura de un kilo de agua es necesario aportar 9 veces más calorías que para elevar esa misma temperatura en un kilo de hierro. Esto hace que el agua juegue un importante papel en los seres vivos, como amortiguador de las oscilaciones de la temperatura exterior, desde el citoplasma de la célula, en donde el agua viene a representar un 70 % de su masa, hasta la refrigeración del cuerpo a través de la evaporación del sudor. Y en la Tierra, a nivel planetario, los océanos son los grandes amortiguadores de las oscilaciones de temperatura entre el día y la noche, y entre el invierno y el verano.

El carácter polar de la molécula de agua hace que sea el líquido que más sustancias disuelve. Es el disolvente universal. A las moléculas que se disuelven en el agua se dice que son hidrofílicas y las que no, hidrofóbicas. Las proteínas y el ADN tienen zonas hidrofílicas y zonas hidrofóbicas. Las primeras quedan en el exterior, en contacto con el agua, mientras que las segundas quedan encerradas en el interior, huyendo del contacto con el agua. Se cree que el agua es fundamental para la estabilidad de las largas cadenas del ADN y para que las proteínas se plieguen correctamente, cosa que es indispensable para que puedan cumplir su función.

Las moléculas de agua, por su carácter polar, tienden a orientarse en presencia de un campo eléctrico. Y a oscilar, si este campo es variable. Ello explica el calentamiento que se produce cuando una radiación de microondas actúa sobre el agua, sobre cualquier solución acuosa o sobre cualquier ser vivo. Es la base del funcionamiento de los familiares hornos de microondas.

¹ Water Structure and Behavior (www.lsbu.ac.uk/water/chaplin.html)

² También ocurre esta anomalía en el silicio, en el bismuto y en el cadmio.

³ La más alta de todos los líquidos comunes, con la única excepción del mercurio.

El agua tiene la capacidad de disociarse espontáneamente en iones, por lo que el agua natural es en realidad una mezcla de agua molecular (H_2O), iones hidroxilo (OH^-) e iones hidronio (H_3O^+)⁴. El número de moléculas ionizadas en el agua natural es extremadamente bajo, aproximadamente una por cada diez millones (10^{-7}). Al agua en este estado se le llama agua neutra ($\text{pH} = 7$)⁵, pero basta la adición de pequeñas cantidades de un ácido o de una base para que estos niveles cambien rápidamente (bajen o suban su pH). Aunque el nivel de ionización del agua sea muy pequeño, su valor (su pH) tiene una importancia extraordinaria en los procesos de la vida. Los organismos vivos no soportan variaciones del pH superiores a unas pocas décimas. Por ejemplo, el pH de la sangre de una persona sana es de 7,4, y puede tener problemas graves si queda por encima de 7,7 o por debajo de 7,3. Incluso, una caída del pH hasta 6,8 puede causar la muerte.

Al bajo nivel de ionización se debe el hecho de que el agua pura sea muy mal conductor de la electricidad. Otra propiedad curiosa del agua es su elevada constante dieléctrica, que es unas 80 veces la del vacío⁶. Esto significa que dos cargas eléctricas dentro del agua se atraen o repelen con una fuerza 80 veces menor de la que se atraerían o repelerían en el vacío.

Pero hay más. Se sabe que el hidrógeno tiene tres isótopos⁷: H^1 (el hidrógeno común o protio), H^2 o D (deuterio) y H^3 o T (tritio), y el oxígeno a su vez tiene otros tres: O^{16} (el oxígeno común), O^{17} y O^{18} . El resultado es que la molécula H_2O puede estar formada por cualquier combinación de los anteriores isótopos, es decir, que en el agua natural podría haber hasta 18 tipos distintos de moléculas de agua y otros 15 tipos de iones. Cierto que la inmensa mayoría de las moléculas de agua (el 99,732 %) están formadas a partir de H^1 y de O^{16} , pero el resultado es que la composición isotópica del agua depende de su historia pasada y que no hay dos aguas iguales. Y la duda que se presenta es: ¿En qué medida esta pequeña presencia de otros isótopos del agua puede influir en algunas de las extrañas propiedades que se citan más adelante? Se sabe, por ejemplo, que el agua pesada, el agua con deuterio (D_2O) es fisiológicamente inerte, hasta el punto de que si la bebiéramos, en lugar del agua normal, estaríamos muertos en menos de 24 horas.

Y si extrañas son las propiedades del agua líquida, no lo son menos las del agua sólida, las del hielo. Así como el agua líquida es el gran "amigo" de la vida, el agua sólida es su "enemigo". La rígida ordenación de las moléculas de agua en los cristales de hielo expulsa las impurezas y destruye las células⁸. En realidad hay muchas clases de hielo. Dependiendo de las condiciones de presión y temperatura en que se forme, se conocen hasta doce tipos de hielo; pero sólo uno, el hielo exagonal, el hielo con el que estamos familiarizados, ocurre de forma natural dentro del margen de presiones y temperaturas que se encuentran en la superficie de la Tierra.

Y a la lista de las 67 propiedades anómalas del agua que cita M. Chaplin todavía podríamos añadir algunas más. Propiedades que podríamos calificar como "sutiles", que

⁴ Al disociarse una molécula de agua se produce un ion OH^- y otro H^+ ; pero este último reacciona casi instantáneamente con otra molécula de agua y da lugar a dos nuevos iones: un H_3O^+ y un OH^- .

⁵ El pH se define como el logaritmo decimal, cambiado de signo, de la concentración de iones hidronio (H_3O^+). Las disoluciones ácidas tienen un pH inferior a 7, y las básicas superior a 7.

⁶ El valor exacto de la constante dieléctrica depende bastante de la temperatura. Vale 88 a 0°C, 78 a 25 °C, 56 a 100 °C.

⁷ Los isótopos de un elemento químico tienen igual número de protones y electrones, pero difieren en el número de neutrones. Tienen el mismo número atómico, pero diferente peso atómico.

⁸ Es interesante observar los mecanismos de defensa de los microorganismos que viven en las regiones árticas. Uno de los más conocidos es lograr un descenso del punto de congelación, produciendo agentes anticongelantes como glicoproteínas y azúcares.

escapan a cualquier medición o tratamiento físico o químico, que no tienen explicación científica, pero que son detectadas por los seres vivos.

El agua y el origen de la vida

Decíamos al principio que sin agua no hay vida, al menos tal y como la concebimos. Como inciso curioso, diremos que en el estudio de los más de 500 planetas extrasolares que se han descubiertos hasta la fecha, el criterio fundamental que se aplica para ver si alguno de ellos pudiera albergar algún tipo de vida, es que en él se den las condiciones necesarias para que pueda existir agua líquida. Y en principio, esto depende de su distancia a la estrella en torno a la cual gira.

Pero, volviendo a nuestro tema, ¿a qué se debe el hecho de que el agua sea imprescindible para que pueda existir la vida? Es evidente que el agua ofrece el entorno ideal para que en él puedan tener lugar las complejas reacciones químicas propias de los seres vivos, desde la más humilde bacteria hasta el propio ser humano. Pero la función del agua ¿es solo la de crear el ambiente necesario y eventualmente aportar sus propias moléculas para la síntesis de los compuestos orgánicos? ¿Cabe pensar que el agua pudiera tener un papel más importante en el origen de la vida? ¿Podría ser el agua algo así como un catalizador imprescindible para que la vida pueda surgir?

Entramos en el campo de la especulación, pero nuestra ignorancia sobre la molécula de agua es tan grande, que no cabe descartar que esta molécula se la fuente que impulse los procesos que conducen a la vida.

Sabemos que la molécula de agua está formada por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, pero ¿sabemos cómo son en realidad el átomo de oxígeno y el de hidrógeno? Limitémonos de momento a este último. El átomo de hidrógeno es el más simple de todos los átomos. Sólo tiene un protón, un electrón y un inmenso espacio vacío entre ellos. Vamos a dar algunas cifras.

El tamaño de este átomo, expresado en milímetros, es de 10^{-7} mm. Es tan pequeño, que harían falta 10 millones de átomos de hidrógeno puestos en fila para cubrir la distancia de un milímetro. El 99,9 % de su masa está concentrada en el protón que constituye el núcleo, cuyo tamaño es tan sólo la cien milésima parte del tamaño del átomo, es decir, unos 10^{-12} mm. Para darnos una idea de lo que representan estas cifras diremos que, si aumentásemos el tamaño al átomo de hidrógeno hasta que llegara a ser como un gran globo de 100 metros de diámetro, su núcleo, a la misma escala, sería tan sólo un diminuto perdigón de 1 milímetro. Y en el resto del espacio, aparte del electrón, ¿qué hay?, ¿el vacío?, ¿no resulta extraño que no haya nada?, ¿podría tal vez estar lleno de esa materia oscura e invisible, que según los astrónomos abunda en el universo bastante más que la materia ordinaria, y ser justamente la causante de las propiedades sutiles del agua? Esto, evidentemente es solo una hipótesis, pero de momento no hay argumentos científicos que la descarten.

¿Y qué pasa con respecto al protón? En 1964 el científico norteamericano Murray Gell-Mann presentó la idea de que los protones y neutrones estaban formados a partir de otras partículas más pequeñas, a las que llamó *quark*. Se han definido seis tipos de *quark*: *arriba*, *abajo*, *encanto*, *extraño*, *cima* y *fondo*. De acuerdo con esta idea, el protón estaría constituido por dos *quark arriba* y un *quark abajo*. A pesar de los muchos esfuerzos realizados, nunca se han podido aislar los quark.

Las ideas que nos ofrece actualmente la cromodinámica cuántica sobre la constitución del protón, son cada vez más complicadas y menos intuitivas. Así por ejemplo, R. Klanner⁹ nos dice: *el protón se asemeja a una sopa espesa y burbujeante de quarks y gluones en la que estos aparecen y desaparecen constantemente*. Por otro lado K. Rith y A. Schäfer¹⁰ explican que los protones *incluyen una danza vacilante y complicada de quarks y antiquarks virtuales, que incluyen quarks extraños, que no suelen formar parte de la materia ordinaria*. Y también nos dicen que *contienen partículas evanescentes en una danza incesante, que las hace oscilar entre la existencia y la nada*.

Resumiendo, el átomo de hidrógeno pudiera ser mucho más complejo de lo que pensamos. La idea puede parecer extraña. Pero quizás les hubiera parecido mucho más extraña a los biólogos de principios del siglo XIX, si alguien les hubiera dicho que esas células, que apenas veían en sus deficientes microscopios, esas células amorfas, casi transparentes y sin ninguna estructura interna aparente, tenían una complejidad, que ni remotamente podían imaginar, y una organización interna, que es una verdadera maravilla. Y su incredulidad hubiera sido total, si además les hubieran dicho que cada una de los billones de células que componen un ser humano tiene en su núcleo, en sus moléculas de ADN, la herencia genética completa de ese ser.

Para terminar, aceptemos nuestra ignorancia sobre la molécula de agua. Aceptemos la posibilidad de que sea mucho más compleja de lo que podemos imaginar. Y aceptemos que el agua, ese líquido tan corriente y tan vulgar, pueda guardar todavía muchos misterios.

⁹ *El interior del protón*. Investigación y Ciencia, junio 2001

¹⁰ *El misterioso espín de los nucleones*, Investigación y Ciencia, septiembre 1999.