



## La edad del agua

Velia M. Solís

Departamento de Fisicoquímica. Facultad de Ciencias Químicas.  
Universidad Nacional de Córdoba. Pabellón Argentina. Ciudad Universitaria.  
5000 Córdoba. Email: vsolis@fisquim.fcq.unc.edu.ar

### Resumen

Se presentan algunos comentarios sobre el origen probable del agua en nuestro planeta, en el contexto de la formación del sistema solar a partir de una nebulosa de gases y polvo posiblemente similar a la de la constelación de Orión. Las nebulosas y las nubes moleculares frías contienen, entre otras sustancias, cantidades importantes de agua como hielo y como gas, de modo que el agua del sistema solar habría estado presente en la nebulosa precursora. La degasificación planetaria sería la responsable de la liberación del agua de hidratación de las rocas como vapor, el que una vez condensado habría originado los océanos. Alternativamente, el agua planetaria podría haber sido aportada por el intenso bombardeo de cometas (ricos en hielo) que siguió al periodo acrecional. Independientemente de la teoría que se considere, la existencia de agua en la Galaxia y su presencia en nuestro planeta se discuten en relación con la estabilidad molecular. En sendos apartados se mencionan los estudios sobre hielos antárticos antiguos y se discute someramente aspectos relativos a la estabilidad de las uniones químicas involucradas en la molécula de agua. Se incluyen además notas aclaratorias.

### Abstract

Some comments related to the possible origin of water in our planet are presented in relation to the solar system formation, from a nebula of gas and dust similar to that in Orion constellation. Nebulas and cold molecular clouds contain, among other substances, important amounts of gaseous water and ice, suggesting that water in the solar system would have been present in the precursor nebula. Planet degassing would have been responsible for the liberation of hydration water from rocks as steam, which would have condensed into oceans. As another alternative, planetary water would have been incorporated by the intense rain of comets that took place after the accretion period. Whichever theory is considered, the presence of water in the Galaxy and in our planet is discussed in relation to the stability of the molecule. Studies related to ancient antarctic ice and elemental aspects of the stability of water molecule are discussed in separated items. Explanatory notes are also included.

*A mí se me hace cuento que empezó  
Buenos Aires: la juzgo tan eterna  
como el agua y el aire.*

Jorge Luis Borges  
Fundación Mítica de Buenos Aires.

¿Es el agua eterna como la juzga el poeta? ¿ha existido desde siempre o hizo su aparición en algún momento de la historia de nuestro planeta?

Son hechos sabidos que la biosfera sintetiza y disocia moléculas de agua durante la respiración y la fotosíntesis. En cualquier otro tipo de combustión se forman nuevas moléculas de agua (además de dióxido de carbono y otros compuestos), y muchos otros procesos bioquímicos y no bioquímicos, térmicos o fotoquímicos, las forman y las destruyen. Otras perma-

necen largos periodos atrapadas en reservorios planetarios donde la movilización es muy lenta. Es probable que una misma molécula pueda haber circulado innumerables veces del mar a las nubes y de las nubes al mar después de una breve instancia en la atmósfera como vapor. Entre lluvia y lluvia, podría haber cumplido múltiples y variados destinos, como humedad del suelo, en las capas de agua subterránea, en arroyos y lagos, en las plantas o en la niebla de la selva.

La hidrósfera contiene, estimativamente,  $1,459 \times 10^9 \text{ km}^3$  de agua (Berner, 1996), lo que estimativamente equivale a  $4,9 \times 10^{46}$  moléculas<sup>1</sup>.

1. La cantidad indicada se refiere al agua en sus tres estados, pero el volumen se informa como agua líquida. Si se acepta el

Ya hemos dicho que muchas de ellas pueden haberse formado recientemente, pero ¿qué edad tienen las más viejas?

Desde la década de los 80 los científicos están estudiando los hielos profundos en la Antártida y en otras regiones próximas a los polos, tras la búsqueda de datos sobre las condiciones ambientales del planeta en épocas pasadas, habiendo podido analizar muestras de hielo cuyas edades han sido estimadas en cientos de miles de años (Wolff, 1990), (ver Apartado I). Es lógico pensar que el agua arrojada a la atmósfera por las erupciones volcánicas desde las rocas profundas debe ser aún más antigua. ¿Contamos con otros datos para poder establecer desde cuándo tenemos agua en la Tierra?

Las evidencias geológicas permiten inferir la presencia de agua líquida en la superficie de nuestro planeta ya en el periodo arcaico. Las rocas sedimentarias más antiguas que se conocen, los metasedimentos de Isua, en Groenlandia, se formaron bajo agua hace aproximadamente 3.800 millones de años. Esto indica que en épocas tan tempranas ya se habían formado cuerpos de agua en superficie, doscientos millones de años antes del desarrollo de las primeras formas de vida (Chang, 1988). ¿Cuál fue el origen de los océanos primitivos?

Las teorías astronómicas suponen que el Sol, los planetas y el resto de los cuerpos del Sistema Solar se formaron casi simultáneamente. Como la edad establecida para los meteoritos más antiguos es de 4.600 millones de años, la misma edad ha sido atribuida al Sistema Solar y por lo tanto a nuestro planeta. No se cuenta con registros geológicos que nos informen sobre el estado de la Tierra durante sus primeros seiscientos millones de años, de modo que nada se puede decir, basado en observaciones directas, respecto del agua durante esa etapa. No obstante, los investigadores han hecho elucidaciones razonables e ingeniosas respecto al origen del agua planetaria, que han dado lugar a varias teorías. Como es normal que ocurra en ciencia, estas teorías evolucionan más o menos

---

valor de  $1 \text{ g cm}^{-3}$  para la densidad, dicho volumen corresponde a una masa de  $1,46 \times 10^{24} \text{ g}$ . Si consideramos que 1 mol de agua, es decir 18 g, contiene  $6,02 \times 10^{23}$  moléculas, puede calcularse fácilmente el número total de moléculas de agua. No debe perderse de vista el carácter aproximado de la estimación.

rápidamente a la luz de nuevas observaciones o cuando herramientas conceptuales más poderosas permiten interpretar los datos ya existentes con mayor rigurosidad o desde una óptica diferente.

La inmensidad del cielo en las noches sin luna y sin nubes, lejos de los centros poblados y sus luces, nos muestra el maravilloso espectáculo de la Vía Láctea. Si observamos a todo lo largo, desde la Cruz del Sur hasta las Tres Marías, veremos manchas oscuras, espacios aparentemente sin estrellas. En realidad se trata de la presencia de nubes de polvo y de gas, interpuestas entre nosotros y las estrellas que ocultan. En noches con cielos particularmente límpidos puede observarse, al lado de la Cruz el Sur, una de tales manchas, "la bolsa de carbón" (Saizar, 2000). Estas nubes opacas contienen en su interior una gran variedad de compuestos químicos moleculares, protegidos de la radiación destructora por las partículas de polvo y de gas de las capas más externas. El análisis espectroscópico de estas nubes<sup>2</sup> indica que si bien la gran mayoría de las moléculas son  $\text{H}_2$ , hay también cantidades importantes de agua, como gas o como hielo condensado sobre las partículas de polvo. Se detectan además compuestos hidrocarbonados, monóxido de carbono (CO), formaldehído, etanol, iones y radicales libres altamente reactivos, intermediarios en la formación de moléculas más complejas. Algunas son nubes moleculares gigantes, como la

---

2. La identificación de los diferentes moléculas, átomos e iones presentes en los cuerpos celestes se logra mediante el análisis de la radiación electromagnética que de ellos nos llega. Las diferentes especies emiten o absorben radiación cuyas frecuencias dependen de su naturaleza química y de la temperatura. Cada especie química tiene un determinado espectro que consiste en una secuencia de bandas de emisión o de absorción de frecuencias definidas en las diferentes regiones del espectro electromagnético, rayos  $\gamma$ , rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas, ondas de radio. Las bandas de absorción en el visible permiten la identificación de átomos mientras que las bandas en el infrarrojo, microondas y ondas de radio son útiles para la identificación de las diferentes moléculas. Las interacciones moleculares también dejan su impronta en los espectros, de modo que es posible diferenciar, observando su estructura fina, el estado de agregación de las sustancias. Por ejemplo, se puede distinguir entre vapor de agua y hielo, y también confirmar la ausencia de agua al estado líquido. La observación del cielo en ondas de radio (radioastronomía) es particularmente útil para estudiar cuerpos fríos y opacos, como las nubes moleculares frías.

de la constelación de Orión<sup>3</sup>. La temperatura de estas inmensas masas gaseosas es muy baja en algunas zonas, alrededor de 50 K (-223 °C), mientras que en otras regiones de mayor densidad, donde se están formando nuevas estrellas, se alcanzan temperaturas elevadísimas. Las nubes moleculares frías, mucho más modestas en tamaño, tienen temperaturas muy bajas, próximas a los 5 K, y contienen, además de las clásicas (H<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>O), una amplia variedad de moléculas hidrocarbonadas. (Kroto, 1988). Hay otros lugares propicios para la presencia de moléculas, como las atmósferas exteriores de algunas estrellas más viejas. No debemos perder de vista que la formación de moléculas estables requiere densidades más bien altas, espacios protegidos de las temperaturas elevadas y de las radiaciones ultravioleta, que garanticen la estabilidad de las uniones químicas propias de las moléculas (ver Apartado II).

No hay mejor teoría que suponer que una nebulosa como la de Orión, en la que actualmente se están formando nuevos soles, dio nacimiento a nuestro Sol y a sus planetas. No contamos en realidad con un modelo de aceptación general que describa tal nebulosa solar ni los procesos que en ella ocurrieron, de modo de poder comprender acabadamente la formación de los planetas y su diferente composición. "Nuestra" nebulosa debió estar formada mayoritariamente de gas (principalmente hidrógeno y helio), y polvo finísimo, pequeñas partículas conteniendo hielo, metales, óxidos metálicos, restos carbonosos, etc. hasta dar cuenta de todos los elementos de la Tabla Periódica, siempre en proporciones muy inferiores al hidrógeno y al helio, entonces como ahora, los componentes mayoritarios del universo<sup>4</sup>.

La nebulosa solar debió tener masa y temperatura tales que determinaron el colapso sobre sí misma. La organización de esta nube de polvo

y gas en un cuerpo central masivo (precursor del Sol) y un disco de gas y polvo sobrante orbitando alrededor del centro de masa del sistema, fue consecuencia de una serie muy compleja de procesos dinámicos generados por las múltiples interacciones gravitacionales. Paralelamente, el material del disco estuvo sujeto a una serie de cambios físicos y químicos, dependientes de la temperatura y de la presión. Así, el material interior a la órbita actual de Marte, solo habría podido condensar, por el intenso calor, metales, óxidos metálicos y minerales propios de las rocas, de elevado punto de ebullición (Wanke, 1988). El polvo que orbitaba a distancias mayores habría condensado componentes cada vez más volátiles, con cantidades crecientes de hielo, a medida que aumentaba la distancia al Sol. Paulatinamente, el polvo fue colapsando en pequeños agregados, que al chocar pudieron fusionarse. Según estudios realizados por investigadores del Instituto de Ciencias Planetarias de EE.UU., la débil atracción eléctrica propia de las fuerzas de van der Waals<sup>5</sup> serían suficientes para justificar que las partículas de polvo se hayan adherido progresivamente hasta formar cuerpos de alrededor de un 1 cm de diámetro (Wetherill, 1981). Según Smoluchowski (1986), la coalescencia de los granos de polvo y de las partículas mayores se habría favorecido sobre todo si estaban cubiertas de hielo, aunque esto último no es aceptado por otros investigadores. Estos corpúsculos fueron incorporando más y más material, hasta formar conglomerados de diferente tamaño, que los autores coinciden en llamar planetésimos o planetesimales. Como resultado de los choques sucesivos, los planetésimos fueron rompiéndose o uniéndose entre sí según la energía del impacto, dando lugar, en el último caso, a la formación de protoplanetas cada vez mayores, cuya gravedad creciente debió acelerar el proceso de incorporación de más y más planetésimos. Estos núcleos rocosos atraparon, en la medida de sus masas, atmósferas gaseosas de hidrógeno y helio. En el caso

---

3. La nebulosa de Orión es una gigante masa de gas y polvo, con forma cilíndrica, de aproximadamente 100 años luz de largo y 10 años luz de ancho, que se extiende desde el centro del cinturón de Orión, más conocido entre nosotros como Las tres Marías (ε Ori) hasta el pie de Orión, (κ Ori).

4. El hidrógeno es el elemento mayoritario en el universo (más del 70%), seguido del helio. Juntos dan cuenta del 98 % del total de los núcleos presentes en la materia visible. El oxígeno llega al 1 %, y el resto está dado por los demás elementos de la Tabla Periódica.

---

5. Las fuerzas de Van der Waals son consecuencia de la naturaleza eléctrica de la materia. Disminuyen rápidamente con la distancia, de modo que ejercen su acción sólo entre partículas muy próximas entre sí. Deben diferenciarse de las atracciones coulombicas que experimentan los cuerpos que poseen una carga eléctrica neta.

de los planetas interiores sus atmósferas primarias fueron engullidas por el intenso campo gravitacional del Sol, o arrastradas por el viento solar de la joven estrella. (Smoluchowsky, 1986). Júpiter y Saturno, pudieron conservarlas.

Concentrémonos en la Tierra durante el periodo del bombardeo intenso de los planetésimos. Estos provenían tanto de las inmediaciones como de regiones distantes, ya que el Sol continuaba atrayendo hacia sí desde todos los puntos del Sistema Solar, cantidades enormes de planetésimos de diferente tamaño, muchos de los cuales eran interceptados por nuestro planeta. De esta forma fue aumentando el tamaño de la Tierra hasta alcanzar, al cabo de los primeros 50 millones a 100 millones de años (periodo acrecional), dimensiones próximas a las actuales. La energía cinética de estos cuerpos acelerados por el campo gravitatorio terrestre debió disiparse como calor al impactar sobre la superficie, alcanzando la Tierra primitiva temperaturas por encima de las necesarias para fundir las rocas. La energía radiante del Sol y el decaimiento de los elementos radiactivos debieron contribuir a las altas temperaturas imperantes. Un magma hirviente y convulsionado debió ser el paisaje habitual en el planeta de aquellos días. Cualquier componente volátil presente en los meteoritos llegados desde las regiones exteriores debió perderse por degasificación, incluida el agua, que en estas condiciones, tuvo que evaporarse y disociarse. Esto explicaría la composición prácticamente carente de agua de los minerales de la corteza terrestre, pero no la existencia de los océanos. ¿De dónde proviene entonces el agua? Aquí las opiniones se dividen.

Una explicación posible pudo obtenerse del análisis de ciertos meteoritos carbonáceos que contienen hasta un 20% de agua, asociada a la estructura de los minerales de arcilla bajo la forma de iones hidroxilo (OH). Similar composición debieron tener muchos de los planetésimos que llegaron a la Tierra durante el periodo acrecional. La temperatura fue lo suficientemente elevada como para vaporizar el agua

incorporada a las arcillas y al retículo cristalino de muchos silicatos como agua de hidratación<sup>6</sup>.

Pasados los primeros doscientos millones de años, el bombardeo meteórico fue cesando. Probablemente la superficie planetaria continuaba en estado fluido, dejando escapar gases y vapor proveniente del agua de hidratación de los diferentes minerales del interior. Durante los 600 millones de años siguientes, la estructura del planeta fue aumentando en complejidad, a medida que descendía la temperatura. Las capas más profundas, muy calientes, continuaban eliminando gases, con los cuales el planeta reconstruyó su propia atmósfera, ya no como la primitiva de hidrógeno y helio, sino rica y densa en dióxido de carbono y vapor de agua. Una vez que el bombardeo de planetésimos fue menguando, el rápido enfriamiento superficial habría dado lugar a la condensación del vapor y a la formación del océano primitivo. Allí habría quedado el agua de la intimidad de las rocas, más vieja que las rocas mismas.

Otra teoría asigna a los cometas, mayoritariamente compuestos de hielo y provenientes de regiones del Sistema Solar alejadas del Sol, el papel de proveer el agua superficial de la Tierra. Esta teoría alternativa subestima el agua aportada por la degasificación de las rocas, según dos escenarios posibles. Uno de ellos considera la formación de la Luna como consecuencia del choque de la Tierra con un objeto de tamaño similar al de Marte. De haber sido este el caso, el inmenso calor liberado por semejante impacto habría fundido las rocas superficiales y eliminado el agua en su totalidad en caso de que hubiera existido. El segundo escenario plantea que, independientemente de cual haya sido el proceso que originó a la Luna, los planetésimos que formaron la Tierra se condensaron a una distancia al Sol práctica-

---

6. Los hidratos son compuestos formados por una sal y agua combinados en proporciones definidas. El agua está incorporada a la estructura cristalina, y se denomina agua de hidratación. Un ejemplo típico es el sulfato de cobre pentahidratado,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , de color azul. Cuatro moléculas de agua están combinadas con el ion cobre, y la quinta está asociada al ion sulfato. Los hidratos pierden el agua de hidratación cuando son calentados a temperaturas suficientemente elevadas. En el caso del sulfato de cobre, la sal anhidra es blanca. No debe confundirse el agua de hidratación con la que pueda contener una sal humedecida.

mente igual a la de la actual órbita terrestre, a una temperatura que entonces habría superado los 700 °C, tornando imposible la retención del agua. La intensa lluvia de cometas acaecida con posterioridad a la formación de la Luna, responsable de sus cráteres, habría impactado también sobre la Tierra, aportado agua en cantidad más que suficiente para dar cuenta de la formación de los océanos (McClendon, 1999).

Cualquiera haya sido el origen del agua superficial, ésta dio lugar, con el correr del tiempo, a la formación de las primeras rocas sedimentarias como las de Isua, que los geólogos estudiarían 3.800 millones de años después. Las evidencias geológicas indican que la atmósfera remanente después de la condensación del agua debió ser rica en dióxido de carbono, monóxido de carbono y nitrógeno, careciendo prácticamente de oxígeno. La llegada de meteoritos carbonáceos continuó, aunque atenuada, durante varios millones de años más, aportando cantidades adicionales de agua a la superficie planetaria (Berner y Berner, 1996).

A la pregunta que hacíamos más arriba referente a la edad del agua sobre el planeta, podemos decir entonces que se remonta a épocas muy tempranas, incorporada durante el periodo acrecional como agua de hidratación o bien aportada por los cometas al finalizar dicho periodo. En ambos casos, justo es reconocer que ya había agua en la nebulosa solar, cuya antigüedad nos es desconocida. Tenemos datos objetivos de la existencia de océanos 3.800 millones de años atrás, y desde entonces ha estado operando el ciclo del agua.

Es interesante que de vez en cuando nos detengamos a pensar en el agua que nos rodea. Nada ha cambiado en ella desde los remotos tiempos en que se condensaron los océanos primitivos. La cantidad de agua que circula por los diferentes ambientes planetarios movilizada por la energía del Sol, prácticamente es la misma desde entonces. Es cierto que una pequeña cantidad continúa todavía emergiendo desde las profundidades de la Tierra por degasificación. En la actualidad, es una cantidad estimada en  $0,3 \text{ km}^3 / \text{año}$  (Berner, 1996), despreciable si se la compara con el total. Paradójicamente, esta agua, probablemente tan antigua como el planeta, es llamada por los geólogos "agua juvenil", para recalcar el hecho de que

ingresa por primera vez al ciclo del agua. Hay también algunas pequeñas pérdidas. El vapor de agua no puede escapar de la troposfera (porción inferior de la atmósfera) en virtud de que al llegar a la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera (tropopausa) cesan los movimientos convectivos del aire que favorecen el mezclado vertical rápido de sus componentes, entre ellos el agua. Las temperaturas prevalecientes son muy bajas ( $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Sin embargo, algo de agua puede escapar a través de la trampa fría por lentos procesos de difusión y alcanzar la alta atmósfera. Allí serán disociadas en átomos de hidrógeno y oxígeno por efecto de la luz ultravioleta, con escape de parte del hidrógeno hacia el espacio exterior. Por este mecanismo se pierden aproximadamente  $4,8 \times 10^{-4} \text{ km}^3 / \text{año}$  (Berner, 1996). Si comparamos estos valores con la cantidad movilizada por el ciclo del agua, nos queda claro por qué es generalmente aceptado que la cantidad de agua planetaria permanece constante.

Al beber un refrescante vaso de agua, poco nos importa saber la edad de las moléculas en cada sorbo; tampoco habría forma de averiguarlo: antiguas o recientes, son todas iguales. Bástenos saber que estamos bebiendo parte del agua que ha atesorado el planeta desde siempre, que gracias a la energía del Sol, ha circulado innumerables veces, líquida, sólida o gaseosa, entre los diferentes ambientes planetarios, regulando el clima y haciendo posible la vida desde hace miles de millones de años.

A modo de epílogo, digamos que el agua es un compuesto muy peculiar. La alta estabilidad de las uniones químicas y su singular estructura molecular tienen una influencia determinante sobre la distribución del agua en el Sistema Solar y en la Galaxia, y sobre su incorporación a nuestro planeta. Estos son aspectos que por lo general no se tratan en el aula y que pueden ser muy motivadores. En tal sentido, este artículo podría utilizarse como lectura de cierre después de discutir el tema de unión química y estructura molecular, o como lectura introductoria para el estudio del ciclo del agua y el agua en la biosfera. El carácter interdisciplinario del enfoque y el análisis de diferentes teorías podría ser de utilidad para la discusión de la naturaleza del conocimiento científico. En otros artículos intentaremos presentar un análisis más centra-

do en la estructura molecular del agua y en las interacciones intermoleculares, con el objeto de analizar su incidencia sobre las propiedades del agua y las enormes influencias que dichas propiedades ejercen sobre las características del ambiente planetario y regional, de trascendental importancia en el origen y el mantenimiento de la vida.

## Apartado I

### La edad de los hielos antárticos

La tectónica de placas, que lenta pero inexorablemente desplaza los continentes, determinó que varios millones de años atrás, la Antártida alcanzara el polo sur, desatando cambios profundos en el clima. La nieve caída año a año fue formando las inmensas planicies de hielo que cubren el continente, con pocas pérdidas por fusión o por evaporación durante el tímido verano. En las inmensas llanuras de hielo antártico, "más profundo" es sinónimo de "más antiguo", de modo que una perforación cuidadosamente realizada ofrece la posibilidad de analizar muestras de agua depositadas como nieve mucho tiempo atrás.

Intentemos relatar la historia de los copos de nieve de una nevada cualquiera en el continente blanco. La nieve recién depositada tiene una densidad diez o más veces menor que la del agua. Es una esponja de minúsculos cristales de hielo, que no tardarán en ser compactados por la presión creciente de nuevas capas de nieve superpuestas. Transcurrido un año (y muchas nevadas), la densidad de nuestra nieve ha aumentado más de cinco veces, formándose esferas de hielo con aire ocluido que la tornan intensamente blanca y brillante (los glaciólogos llaman "granos" a estas esferas). Cien años después, la profundidad alcanzada oscila entre los 50 y 100 m, la densidad es ahora de  $0,83 \text{ g/cm}^3$  y los granos se han compactado lo suficiente como para fusionarse formando lo que comúnmente llamamos, al igual que los glaciólogos, hielo. El aire ha sido desplazado hacia los bordes de los granos cristalinos, donde queda atrapado en pequeñas burbujas. El proceso de compactación, crecimiento de los granos de hielo y profundización continúa a lo largo de miles de años (Gwynne, 1992).

Las perforaciones realizadas en la estación rusa Vostock, en la Antártida, permitieron estudiar una columna de hielo de 2.521 m, con una antigüedad en las porciones más profundas del orden de los 160.000 años (Wolff, 1990). Estudios más recientes se remontan a hielos de mayor antigüedad aún. Cuando el aire atrapado en las burbujas es liberado en los laboratorios bajo condiciones estrictamente

controladas, constituyen verdaderas muestras de "aire fósil", que guardan intactas la composición de la atmósfera en la época en que se formaron los copos de nieve.

¿Cómo sigue la historia de estos copos? Debido a las propiedades plásticas del hielo, las capas más profundas fluyen hacia el mar. Mucho tiempo habrá pasado desde que las moléculas de agua que llegaron a la Antártida en copos de nieve ingresen nuevamente a la circulación incesante entre las capas oceánicas superiores, la atmósfera, las aguas continentales y los hielos a través del ciclo hidrológico global, para repetir una vez más la historia.

## Apartado II

### Algunos comentarios sobre la estructura molecular del agua

Recordemos que, independientemente de la complejidad de las etapas químicas involucradas, la obtención de una molécula de agua a partir de los reactivos elementales ( $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$ ) implica la ruptura de las uniones entre los átomos de las moléculas de dichas sustancias elementales y la formación de nuevas uniones químicas entre un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno. Una manera conveniente de describir el proceso (hay otros modelos más rigurosos) es a partir de la formación de dos uniones químicas localizadas O-H. Cada una de ellas involucra dos electrones, uno aportado por el átomo de hidrógeno otro por el de oxígeno, que tiene un total de seis electrones externos o de valencia. Si se suman los seis electrones periféricos del átomo de oxígeno y los dos aportados por los átomos de hidrógeno, se obtiene un total de ocho electrones, correspondiente a la estructura de "capa completa", la cual confiere una alta estabilidad a las especies que la poseen, como es el caso de los gases nobles o los cationes de los elementos alcalinos, como el  $\text{Na}^+$ .

Según modelos simplificados, la energía de cualquier unión química puede estimarse mediante cálculos que consideran los orbitales atómicos involucrados y el grado de solapamiento alcanzado entre ellos. Cuanto mayor es el grado de solapamiento, más estable es la unión formada.

Ya sea que se considere el hecho de que la molécula de agua tiene una estructura isoelectrónica (igual número de electrones) con el gas noble neón, o siendo un poco más rigurosos, el alto grado de solapamiento de los orbitales involucrados en sus dos uniones químicas, queda claro que se trata de una molécula sumamente estable. La energía de enlace o energía de unión O-H es de  $464 \text{ kJ/mol}$ , lo que equivale a  $7,7 \times 10^{-19} \text{ J}$  por cada unión química formada. Obviamente, si quisiéramos romper dichas

uniones, habría que invertir una cantidad de energía equivalente. Por tratarse de una cantidad muy elevada comparada con las energías térmicas y electromagnéticas disponibles en las capas bajas de la atmósfera y en la superficie de nuestro planeta, el agua es para nosotros una sustancia altamente estable. La Termodinámica Estadística nos permite evaluar que son necesarias temperaturas de miles de grados para que la agitación térmica sea lo suficientemente intensa como para que una fracción significativa de los enlaces pueda romperse por choques entre moléculas. Las uniones también podrán disociarse por la absorción de un fotón de frecuencia adecuada, cuya energía deberá ser como mínimo igual a la energía de enlace. Es muy sencillo estimar la frecuencia mínima de dicho fotón, que corresponde a la región ultravioleta del espectro electromagnético conociendo la energía del enlace y la estructura electrónica de la molécula (Atkins, 1985). Condiciones tales que preserven la estabilidad de las uniones químicas solo se dan en los planetas, en las nubes moleculares frías del disco galáctico, en las nebulosas y en la atmósfe-

ra externa de estrellas moribundas. La alta estabilidad de las moléculas de agua garantiza su permanencia por largos periodos de tiempo en ambientes preservados de la radiación UV y de temperaturas demasiado altas, como es el caso de los hielos profundos, las aguas subterráneas, el agua de hidratación asociada a las rocas en el subsuelo, etc. Nuestros comentarios acerca de la "edad" del agua deben encuadrarse en este contexto, sin olvidar que una fracción de las moléculas del agua superficial se descompone por interacción con especies muy reactivas como ciertos radicales libres o por la acción de sofisticados mecanismos catalíticos como ocurre en la fotosíntesis.

Para un análisis de las propiedades de las uniones químicas del agua, con un nivel medio de complejidad, véase el libro de Shriver y col. (1998) o cualquiera de los libros de Química General de edición reciente. Para un tratamiento elemental puede consultarse el excelente libro de Aldabe y col. (1999) para alumnos de nivel medio.

## Bibliografía

- Aldabe, S. Aramendía, P. Lacreu, L. 1999. *Química I. Fundamentos*. Ediciones Colihue.
- Atkins, P. W. 1985. *Fisicoquímica*. Fondo Educativo Interamericano. (Hay ediciones posteriores en inglés).
- Berner, E. K. Berner, R. A. 1996. *Global Environment*. Prentice Hall.
- Chang, S. 1988. Planetary environments and the conditions of life. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 325 pp. 601-610.
- Gwynne, M. D. 1992. United Nations Environmental Programme. *Glaciers and the environment*. Unep / GEMS Environmental Library N° 9.
- Kroto, H. W. 1988. The Chemistry of the interstellar medium. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 325 pp. 405-421.
- McClendon, J. H. 1999. The origin of life. *Earth-Sciences Reviews* 47 pp. 71-93.
- Saizar, P. 2000. Guía del cielo nocturno. *Ciencia Hoy* 10 (57) pp. 20-25.
- Shriver, D. F; Atkins, P. W; Langford, C. H. 1998. *Inorganic Chemistry*, 2nd Ed. Oxford University Press.
- Smoluchowsky, R. 1986. *El Sistema Solar*. Biblioteca Científica. Prensa Científica. Ed. Labor.
- Wanke, H. Dreibus, G. 1988. Chemical composition and accretion history of terrestrial planets. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 325 pp. 545-557.
- Wetherill, G. W. Formación de la Tierra a partir de planetesimales. (1981) *Investigación y Ciencia* pp 87-97.
- Wolff, E. W. 1990. Signals of atmospheric pollution in polar snow and ice. *Antarctic Science* 2(3) pp. 189-205.