

LA DIVERSIDAD DEL AGUA

(Discurso de ingreso como Académico Numerario, adscrito a la Sección de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales, leído el 11 de Junio de 2009)

ANICETO LÓPEZ FERNÁNDEZ
ACADÉMICO NUMERARIO

*Sin agua las lágrimas no existieran
ni suspiros ni almas ni alimento,
tampoco las hojas en el viento
y los mares del mundo nunca fueran*

(De El Agua de Julio Serrano)

RESUMEN

Este discurso pretende aportar una visión innovadora e integradora sobre la tipología del agua que ayudará a elevar, aún más, la valoración perceptiva que tenemos de ella. Después de examinar la significación del agua para la vida y de revisar su estructura molecular y sus principales propiedades, este trabajo se adentra en el estudio de los distintos tipos de agua. Se distingue entre la diversidad isotópica, por el estado, por la composición, por las características organolépticas, por la temperatura, por el movimiento, por la contaminación, por su utilidad y por el precio. Se hace también referencia al agua virtual y a la huella hidrológica.

ABSTRACT

This paper aims to provide an innovative and integrated information on the types of water to help raise the perceptual assessment of the water we have. After examining the significance of water for life and review their molecular structure and its main properties, this work explores the study of different types of water. It distinguishes between diversity isotopic, by the state, the composition, organoleptic characteristics, temperature, by the movement, by pollution, by its utility and price. It also refers to water footprint and virtual water.

PRESENTACIÓN

Excmo. Sr. Director de la Real Academia, Rector Magnífico de la Universidad de Córdoba, Ilustre Cuerpo Académico, Dignísimas Autoridades, querida familia, amigos, Señoras y Señores:

Hoy es un día especial en la Academia, y para mí, un día que siempre mantendré vivo en la memoria por gozar del privilegio de dirigirme a todos ustedes para leer mi Discurso de Ingreso como Académico Numerario adscrito a la Sección de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de esta Real Casa. Antes de comenzar deseo expresar públicamente mi agradecimiento a los Académicos Numerarios que confiaron en mi persona para ocupar esta plaza, especialmente a D. José Roldán Cañas que me presentó y defendió mi propuesta ante el pleno, a D. Joaquín Moreno Manzano y D. José Manuel Cuenca Toribio, que me presentaron y al conjunto del Cuerpo Académico que me otorgó su beneplácito y que en este día me recibe como compañero. Asumo la responsabilidad que para mí supone esta nueva situación y no duden que trabajaré con renovado esfuerzo e ilusión en la línea de contribuir a acrecentar el prestigio en la labor de difusión de la cultura que tiene encomendada esta bicentenaria Institución.

LAUDATIO

Es costumbre en esta Real Casa tal como recogen sus Estatutos dedicar unas palabras en honor al Académico desaparecido cuyo lugar se pasa a ocupar hoy. Tarea que para el que hace uso de esta tribuna encierra notable dificultad por los méritos académicos y científicos que orlaron la trayectoria vital de quien voy a tener, desde hoy, el grato honor de suceder. Me estoy refiriendo al Excmo. Sr. D. Francisco Castejón Calderón; pero los cánones académicos me obligan a no eludir tan alta responsabilidad y a ello me dispongo.

El Excmo. Sr. D. Francisco Castejón nos dejó a finales de Julio del pasado año tras soportar con entereza cristiana una larga y penosa enfermedad. Significa para mí una distinción inmerecida el pasar a ocupar el sillón de una persona de talla intelectual más que contrastada del que, entre otras cosas, tuvo el grato honor de recibir su magisterio cuando iniciaba mi andadura universitaria en el viejo caserón de la antigua Facultad de Veterinaria hoy remozada sede del Rectorado de nuestra Alma Mater. Con el correr del tiempo, al integrarme como profesor en la plantilla docente de nuestra Universidad, D. Francisco fue mi Rector; eran tiempos difíciles en los que la naciente Universidad cordobesa tenía que abrirse camino en medio de miles de dificultades. Él supo superar cuantos obstáculos encontró y sentar las bases durante su mandato para el posterior despegue de nuestra Universidad. En el ámbito de la actividad docente e investigadora fue persona de reconocida valía entre la comunidad científica, sabiendo cosechar algo no muy al uso en la Universidad, el afecto y respeto de sucesivas generaciones de alumnos. En su larga y dilatada trayectoria humana obtuvo múltiples distinciones, condecoraciones y honores entre los que él mismo manifestara que tal vez la que recibió con mayor afecto y cariño fue la concesión de la Medalla de Oro de la Universidad de Córdoba. Su paso por esta Academia, siguiendo la estela inolvidable que en ella dejara su padre, le mereció reconocimientos y amistades en los años postreros de su vida. Hoy quiero dedicar mi personal y afectuoso recuerdo al maestro, al universitario y al académico al que tengo el honor de suceder. Descanse en paz.

INTRODUCCIÓN

Agua, agua, agua y tierra firme o superficies emergidas. Así es, el 71%, casi las tres cuartas partes de la superficie terrestre son agua, de tal forma que si nuestro Planeta tuviese que ser caracterizado por algo sería el Planeta Azul o Planeta del Agua. El agua es fuente de vida, es vida, es naturaleza, es salud, esperanza, prosperidad, bienestar, materia para el ingenio..., a veces el agua es todo. En ocasiones bien escaso que da lugar a enfrentamientos más o menos violentos, otras veces abundante como el aire. En unos casos mansa, bucólica, evocadora, y en otros fiera, desafiante, depredadora. Hay agua natural en multitud de tipos que abarca incluso la influenciada por los organismos, y el agua antrópica, es decir la modificada u obtenida por el hombre. Analizaremos aquí, en el marco del Decenio Internacional del Agua 2006-2015 instituido por Naciones Unidas, toda esta tipología, toda esta variedad, toda esta diversidad, entendida en sentido laxo, de las aguas existentes en nuestro Planeta.

Pero antes debemos preguntarnos ¿qué es el agua? El agua formaba parte de los antiguos elementos de China, de los hindúes, de los budistas e incluso de Japón, al igual que para los griegos presocráticos el “agua” de Tales de Mileto era uno de los cuatro elementos que aludían al estado de la materia, junto al “fuego” de Heráclito, el “aire” de Anaxímenes y la “tierra” de Jenófanes. Empédocles de Agrigento, el que dice la leyenda que murió al arrojar al Etna para conocer lo que era el fuego y el volcán agradecido devolvió una de sus zapatillas, postuló la teoría de las “cuatro raíces” basada en lo anterior, a la que Aristóteles llamó la “Teoría de los cuatro elementos” y a la que él añadió el quinto, la quintaesencia, el “éter” como una sustancia celestial, que persistieron durante la Edad Media hasta después del Renacimiento. En efecto, a pesar de la reconocida importancia del agua para todas las culturas, no fue hasta el siglo XVIII cuando se descubre la verdadera naturaleza del agua. Henry Cavendish (1731-1810) físico y químico británico, aunque nacido en Niza, se mostró sorprendido en 1781 al quemar “gas inflamable” en el aire y obtener agua. Poco después Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) eminente químico francés, padre de la Química moderna, que tristemente murió guillotinado, y en lo que pudo intervenir una revancha académica, anunció en 1783 a la Academia de las Ciencias francesa que el agua está formada por la combinación del “aire inflamable” que bautizó como “hidrógeno” (del griego, que significa “da origen al agua”) con el “oxígeno” al que dio este nombre también del griego “que origina ácidos” al creer, aunque de forma equivocada, que todos los ácidos lo contenían. Los trabajos de Laplace y de Meusnier, completados por los de Carlisle y de Nicholson (análisis electrolítico del agua de 1800), de Gay-Lussac, de Humboldt (síntesis eudiométrica de 1805) y los de Dumas (síntesis ponderal de 1834) ayudaron a establecer con absoluta certeza su composición.

EL AGUA Y LA VIDA

El agua es el compuesto químico más familiar para nosotros, el más fabuloso por sus propiedades, el más abundante y el de mayor significación para nuestra vida. El mar, los lagos y los ríos están “hechos” de agua, de manera que el agua es la materia prima de la Oceanografía y de la Limnología, no solo por las características que imprime a los ecosistemas acuáticos en lo que a medio físico se refiere, sino también por su significación para la vida. El agua no es simplemente un soporte que alberga vida, sino que en la vida misma participa el agua. De hecho la vida nació en el agua.

Los procesos funcionales de un organismo son completamente dependientes del

agua y las propiedades de la vida son con frecuencia un resultado directo de las del agua, consecuencia de ser la molécula de agua, la más abundante de entre las que constituyen los seres vivos. Toda la materia viva contiene agua en cantidades significativas, por ejemplo en el cuerpo humano su proporción es de un 65%, aunque otros organismos tienen más, como la lechuga (94%) o las medusas (98%). El agua es de vital importancia en las reacciones celulares. Un ser vivo al fin y al cabo es un sistema organizado de reacciones químicas catalizadas por enzimas y los participantes en esas reacciones son sustancias en solución acuosa, es decir, rodeadas de moléculas de agua. No podemos olvidar que la vida nació en las aguas de aquellos primitivos mares, en la sopa caliente que proponía Oparín, y que mucho después las formas vivientes pudieron emigrar a tierra y para conseguirlo las plantas y animales debieron procurarse un ambiente interno rico en agua, como si dispusiesen de su propio mar interior, de un sistema circulatorio que le otorgaba el privilegio de la independencia. En ese mar interior los reactantes se encuentran de forma disuelta. El agua es el disolvente de esos reactantes. Las moléculas de agua no solo facilitan las reacciones químicas o bioquímicas sino que con frecuencia participan directamente en ellas como en los procesos de hidrólisis y óxido-reducción.

El agua también juega un papel crucial en la estructura de los seres vivos. A nivel celular distinguimos entre agua libre y agua estructural o ligada a la estructura. Así las macromoléculas celulares, proteínas, ácidos nucleicos, fosfolípidos, polisacáridos, etc., son en su mayor parte sustancias hidrófilas, asociadas a moléculas de agua por Fuerzas de Van der Waals que le proporcionan su estructura. El agua conforma el sistema hidráulico, muy patente en las células vegetales, merced al cual se suministra rigidez a las paredes celulares, a la vez que determina la forma del vegetal, el crecimiento y el movimiento de sus órganos. El agua además es crucial en el sistema de transporte de los organismos, ya que la movilidad de las sustancias en su interior ocurre por solubilización, difusión o por arrastre en la corriente hídrica.

El agua es un magnífico agente de estabilización y transferencia calorífica. Su calor específico, así como el de fusión y vaporización es extremadamente elevado, lo que la convierte en un medio excelente de estabilización térmica, ya que puede absorber y ceder grandes cantidades de calor con solo relativamente pequeños cambios de temperatura, cuestión esta de gran importancia ecológica. En definitiva, el agua es el medio ideal para la vida.

ESTRUCTURA MOLECULAR

Químicamente es una sustancia inusual, es el único mineral líquido del Planeta, a excepción del mercurio metálico y del anhídrido carbónico líquido que se supone presente en cristales de cuarzo confinados en cavidades sometidas a elevada presión. La magnificencia de la molécula de agua y la explicación a muchas de sus asombrosas propiedades hay que buscarla en su estructura molecular.

La combinación de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno para formar la molécula de agua hace que los electrones se repartan de tal modo que la molécula resultante es estable, pero lejos de formar estos tres átomos entre sí un ángulo de 180° lo forman de casi 105° , de manera que aunque la molécula en su conjunto es eléctricamente neutra, la distribución asimétrica de los electrones da lugar a que un lado esté cargado positivamente respecto al otro. Así quedan dos pares de electrones libres del oxígeno que determinarán una carga negativa en contraposición a los dos protones de los hidrógenos que conforman el lado positivo. Estas moléculas reciben el nombre de dipolos y tienden a orientarse en un campo eléctrico con el lado negativo hacia el

polo positivo y viceversa.

La atracción electrostática entre las dos regiones de signo contrario de dos moléculas vecinas producen uniones de ambas moléculas a través de la formación de puentes de hidrógeno, Fuerzas de Van der Waals, que constituyen enlaces que aunque de fuerza débil ($1/24$ de la fuerza de un enlace covalente O-H) son capaces de mantener unidas a esas moléculas. Debido a la presencia de dos protones, de los hidrógenos, y dos pares de electrones libres, del oxígeno, una molécula de agua puede formar hasta cuatro enlaces de hidrógeno con las otras moléculas circundantes. Los enlaces de hidrógeno tienden a disponerse de forma tetraédrica y es por ello por lo que las moléculas de agua en el hielo forman una estructura cristalina tetraédrica y los tetraedros se disponen de tal manera que constituyen básicamente un cristal hexagonal. Los átomos de hidrógeno se sitúan en general entre dos átomos de oxígeno pero a distancias diferentes (1 y 1,76 Å), de modo que las moléculas de agua mantienen su individualidad. Sin embargo, en el agua líquida las moléculas no se disponen de una forma tan ordenada y regular sino que ahora, al disminuir la cantidad de puentes de hidrógeno con los aumentos de temperatura, aunque siempre quedan algunos incluso cuando se alcanza el punto de ebullición, el agua se presenta como una mezcla de distintos polímeros o asociaciones de moléculas de agua quedando los huecos rellenos por moléculas aisladas. El orden de estos polímeros viene definido por el número de moléculas que los componen, predominando los polímeros de orden más elevado con las temperaturas bajas y viceversa. Continuamente se están disgregando estas agrupaciones de moléculas a la vez que otras moléculas se aglomeran, por lo que la vida media de esos polímeros es tan solo de 10^{-10} a 10^{-21} segundos. Por su parte el agua en estado de vapor consiste en moléculas aisladas sin ningún tipo de unión por puentes de hidrógeno.

PROPIEDADES DE IMPORTANCIA ECOLÓGICA

El agua posee unos puntos de fusión (0°C) y de ebullición (100°C) muchísimo más elevados de lo que cabría esperar, lo que propicia que sea líquida a temperaturas ordinarias. En general el estado de cualquier sustancia va a depender de su peso molecular. Dado el escaso peso molecular del agua (18,0154) le debería corresponder un estado gaseoso como por ejemplo le corresponde al metano (16) o al anhídrido carbónico (44). Esto puede explicarse por la elevada atracción entre sus moléculas que hace que se comporte como si tuviese un peso molecular muy por encima del que simplemente se deduce de su fórmula (H_2O). De no ser así el agua sería gaseosa a temperaturas normales con un punto de ebullición que a una atmósfera se situaría en los -80°C y de congelación a -100°C .

El calor de fusión y de vaporización del agua líquida son anormalmente altos. El primero es de 79 k cal l^{-1} un valor solo sobrepasado por el del amoníaco y algunos metales. Es decir, que se necesita prácticamente la misma cantidad de calor para fundir hielo a 0°C para pasarlo a agua líquida a 0°C , que para elevar la temperatura de ese agua hasta casi los 80°C . La envergadura del calor de evaporación va a depender de la temperatura a la que se realice el cambio y será más bajo contra mayor sea la temperatura. Así a 100°C es de 537 k cal l^{-1} pero por ejemplo a 15°C es de 590 k cal l^{-1} . Para cada temperatura se puede calcular el calor de evaporación utilizando la fórmula de Clapeyron ($C_c = 796 - 0,695 T$; siendo T la temperatura absoluta en $^{\circ}\text{K}$). El significado ecológico de estos hechos es fácil de intuir: antes de que el agua se congele debe ser extraída una cantidad de calor relativamente grande y por el lado contrario la evaporación tiene un fuerte efecto refrescante. De otra parte el aumento de volumen

que se produce con el hielo va a destruir las paredes celulares, pero el elevado calor de fusión hace que la congelación ocurra con menos facilidad que en otros líquidos por lo que los cultivos pueden protegerse de los riesgos de la congelación regando por aspersión. Las cubetas de los lagos y el armazón de las piscinas se quiebran al formarse la capa de hielo superficial.

La presencia de sales tiende a rebajar el punto de congelación lo que introduce complicaciones en el estudio de aguas saladas. Así, cuando se menciona un punto de congelación para un agua marina en concreto, se referencia la temperatura a la que se produce el inicio de la solidificación, solidificación que lleva consigo el que se vean separadas una parte de las sales que harán aumentar la salinidad del agua que queda alrededor de los núcleos de formación del hielo. Este agua más salina requiere de una nueva bajada de la temperatura para congelarse. Por esta razón el hielo del agua del mar presenta una salinidad heterogénea y una estructura granular en la que los cristales de agua sólida están separados por agua de elevada concentración salina por lo que va a ser más plástico que el hielo de agua dulce.

El calor específico o cantidad de calor en calorías que se requieren para aumentar en 1°C la temperatura de 1g de una sustancia, en el caso del agua de 14,5 a 15,5°C es extremadamente alto. En efecto, en el caso del agua líquida, tiene el valor de 1 cal g a 15°C y una atmósfera de presión. Este valor es el mayor de todos los sólidos y líquidos, a excepción del litio, el hidrógeno líquido y el NH₃ líquido. Si consideramos que el calor específico medio de la superficie continental puede estar alrededor de 0,2 cal g encontraremos la explicación del calentamiento diferencial entre continentes y océanos, y la formación alternativa de ciclones y anticiclones en las estaciones frías y cálidas sobre las superficies del océano y continentales lo que va a regir el clima global del Planeta. En consecuencia, los ecosistemas acuáticos manifiestan la tendencia a estar relativamente tamponados contra los cambios térmicos que provienen de los patrones estacionales o incluso diarios de radiación solar. Por tanto los océanos, los lagos y otros ecosistemas acuáticos epicontinentales contribuyen a una dulcificación climática en las regiones terrestres de su influencia.

La densidad del agua y su variación con la temperatura ha sido una cuestión que desde hace tiempo ha llamado la atención de químicos y biólogos. La estructura tan ordenada del hielo que hemos referido más arriba es muy abierta lo que explica el aumento de volumen al congelarse el agua líquida. Nos encontramos aquí con un hecho insólito: el agua al estado sólido es menos densa que al estado líquido. A 1 atmósfera la densidad del agua a 4°C se ha tomado como unidad, aunque la densidad máxima se da a 3,94°C; a 600 atmósferas la densidad máxima es a 0°C. De todos los líquidos conocidos sólo en dos se ha comprobado que presentan la máxima densidad a una temperatura superior a la del punto de congelación: el agua y el cloruro de cesio, un raro producto de laboratorio que pasa al estado líquido a unas temperaturas muy elevadas. Por tanto el agua difiere de todas las sustancias, prácticamente, por ser más densa como líquido que como sólido. A 0°C el hielo tiene una densidad de 0,9168 g ml⁻¹, que supone un 8% menos que la del agua líquida a esa temperatura (0,9998). Esta circunstancia hace que el hielo flote porque si fuese más denso iría cayendo hacia el fondo de mares y lagos que quedarían convertidos en inmensos cubos de hielo acabando con la vida que soportarían y entrando en una situación de no retorno al estado líquido.

La temperatura y la densidad no guardan una relación lineal. La intensidad de cambio de la densidad por grado de temperatura depende de la temperatura del momento y aumenta notablemente conforme se aleja de los 4°C. Así la diferencia de densidad entre 10 y 11°C es doce veces más grande que entre 4 y 5°C. Desde una óptica limnológica

significa que la cantidad de trabajo necesario para mezclar masas estratificadas de agua por ejemplo a temperaturas de 29 y 30° C es cuarenta veces mayor que la que se requiere para mezclar las mismas masas a 4 y 5° C (CRUZ y CRUZ, 1982). Ello da una idea del arraigo de la estratificación térmica estival cuando se hallan separadas una masa superficial (epilimnion), cuya temperatura en nuestras latitudes puede llegar a rondar los 30° C, y otra profunda con menos de 10° C (hipolimnion), separadas ambas por una capa de fuerte gradiente vertical de temperatura y de densidad que recibe el nombre de termoclina o metalimnion.

La densidad del agua también varía con la salinidad, aunque ahora de una forma aproximadamente lineal. A 4° C un agua con cero de salinidad tiene un valor de 1 para su densidad, pero se va aumentando este valor de la unidad progresivamente con la salinidad. A un valor de salinidad del 35 por mil, que es el medio del agua del mar, la densidad llega a 1,02822. Esta cuestión también es importante en limnología ya que el agua salada tenderá a ocupar el fondo de la cubeta en los lagos, dando lugar a formas especiales de estratificación (Meromixis), así como la parte más profunda del acuífero cuando hablamos de aguas subterráneas lo que acarreará problemas en los depósitos subálveos sobreexplotados.

Hay que significar la importancia del hecho que suele pasar inadvertido de que el agua pura sea incolora lo que posibilita la realización de la función fotosintética y el subsiguiente establecimiento del primer nivel trófico, base de las cadenas y redes alimentarias en los ecosistemas acuáticos. No obstante, su comportamiento con las diferentes longitudes de onda que componen el espectro de radiación solar no es homogéneo. El agua, a través de los puentes de hidrógeno, absorbe eficazmente el infrarrojo y las radiaciones caloríficas (10 a 30 micras de longitud de onda) por lo cual la capa superior rápidamente ganará temperatura. Además presenta también distintos valores del coeficiente de extinción para la fracción luminosa del espectro con lo que se verá desfavorecida la penetración hacia el interior del agua de las longitudes de onda pertenecientes al color rojo (680 nm) o amarillo (580) y otros, siendo el azul verdoso (480 nm) el que presenta el menor coeficiente de extinción (0,018) y por tanto el que mayor poder de penetración tiene en las masas de agua que adquieren esa tonalidad a nuestra vista por ser el único que podrá ser difundido desde la profundidad hasta nuestros ojos.

La tensión o energía superficial del agua es la mayor de todos los líquidos a la temperatura ordinaria, con excepción del mercurio, y tiene un valor con respecto al aire de 72,76 dinas cm⁻¹ a 20° C. Ello es debido a la especial disposición de las primeras capas monomoleculares superficiales que presentan el oxígeno dirigido hacia arriba afianzando la atracción de esas moléculas superficiales por las moléculas de la masa del líquido. Por esta circunstancia el agua muestra una cierta resistencia a la penetración lo que posibilita la existencia de la comunidad de organismos del neuston que son capaces de andar por la superficie.

La viscosidad dinámica del agua líquida es de 0,01 g cm⁻¹ s⁻¹ a 20° C que es relativamente elevada, aunque menos viscosa de lo que cabría esperar porque las moléculas resbalan unas sobre otras, lo que representa una ventaja, al igual que las fuerzas de adhesión y de cohesión, para las funciones fisiológicas de los organismos.

Son también dignos de mención, entre otros, los valores de la constante dieléctrica del agua líquida, relativamente altos, que explican la fácil ionización en su seno de las sales, los de conductividad eléctrica y térmica, compresibilidad y velocidad del sonido.

Por estar el agua tan unida a nuestra existencia puede que no hayamos reflexionado

acerca de las innumerables maneras en que se presenta en la naturaleza e incluso en el laboratorio. Este discurso pretende aportar una visión absolutamente innovadora e integradora sobre la tipología del agua que ayudará a elevar, aún más, la valoración perceptiva que tenemos de ella.

LA DIVERSIDAD ISOTÓPICA

La existencia de isótopos del oxígeno y del hidrógeno da lugar a combinaciones entre ellos que originan un gran número de tipos de moléculas de agua. En efecto, se conocen tres isótopos del oxígeno: ^{16}O , ^{17}O y ^{18}O (junto a otros tres radioactivos de vida breve de menor importancia), y tres del hidrógeno: ^1H que es el Protio, ^2H o Deuterio y ^3H el Tritio. Este último es radioactivo con una vida media de 12,5 años y se forma en la atmósfera por acción de una determinada línea solar.

Las diferencias entre los isótopos del oxígeno son demasiado pequeñas para que puedan verse influidas las propiedades del agua ya comentadas. Sin embargo, tienen mucho interés en paleoecología. Por ejemplo, la acumulación relativa de los isótopos en los caparzones de carbonato cálcico de pequeños organismos acuáticos como las globigerinas, varía, dependiendo de la temperatura reinante en el océano cuando esos organismos vivieron. Así la concentración de ^{18}O en las conchas de los foraminíferos citados era menor en los períodos más fríos porque había menos moléculas de agua con ese isótopo en esas masas oceánicas sometidas a una menor evaporación. Esto es un efecto indirecto que se debe a la mayor retención del ^{18}O en el hielo que se almacena sobre los continentes en los períodos glaciales. Del estudio de muestras de sedimentos marinos (cores) se conoce, por ejemplo, la variación de la temperatura del océano en el último medio millón de años y que el Planeta atravesó por cinco períodos glaciales y por trece estadios de los isótopos del oxígeno durante ese tiempo (HAYS et al. 1976). La historia de las variaciones térmicas en las cuevas se puede conocer por este procedimiento aplicado al carbonato cálcico que conforma los espeleotemas e incluso si se investigan las sucesivas capas de hielo depositadas en Groenlandia o en la Antártida y su riqueza en ^{18}O se llega a conocer las fluctuaciones térmicas del pasado, como por ejemplo de los últimos 800 años (JOHNSON, 1970). En realidad al menos en los últimos 1,2 millones de años el Planeta ha atravesado por sucesivos períodos de calentamiento y enfriamiento que han permitido distinguir 35 estadios del oxígeno.

Desde luego que la molécula de agua más abundante es la formada por dos átomos de protio y otro de oxígeno 16 y de las restantes combinaciones entre isótopos predomina el agua pesada o semipesada que es la HDO. Por cada 2500-3000 moléculas de agua normal hay una de HDO y por cada 6700 aproximadamente hay una de agua pesada u óxido de deuterio (D_2O), descubierta al destilar hidrógeno por Harold Clayton Urey (1893-1981) cuando trataba de dar explicación a un error aparente que encontró el físico inglés Francis William Aston (1877-1945) al estudiar con el espectrógrafo de masas de su invención el espectro del hidrógeno. Ambos fueron premios Nobel de Química en 1934 y 1922 respectivamente. El agua pesada fue el primer moderador de neutrones que se utilizó en las reacciones de fisión nuclear y tuvo una importancia estratégica en la segunda guerra mundial. Este agua pesada difiere de la normal por su peso molecular y por presentar valores diferentes en algunas de sus propiedades como las temperaturas de fusión ($3,79^\circ\text{C}$) y ebullición ($101,41^\circ\text{C}$). El deuterio del agua del mar va a ser la fuente energética para la nueva energía a partir de los reactores de fusión, o soles en miniatura, que desarrolla experimentalmente el proyecto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) en el que intervienen la Unión Europea, Japón,

Estados Unidos, Rusia, Corea del Sur, India y China, y que está construyendo sus instalaciones en Cadarache, en la Provenza francesa.

En el agua tritiada intervienen uno o dos átomos de tritio. Se denomina agua superpesada a la que tiene dos átomos de tritio y semi-superpesada a la que cuenta con uno. El tritio produce emisiones beta de baja energía. El deuterio y el tritio obtenido a partir del litio constituyen los materiales de fusión para las futuras plantas de producción de energía termonuclear.

LA DIVERSIDAD POR EL ESTADO

En nuestro Planeta, como todo el mundo conoce, se encuentra el agua en sus tres estados. Hay diversas hipótesis sobre el origen del agua en la Tierra, aunque la más aceptada es que proviene de un exudado de la corteza terrestre más que de una condensación de la atmósfera primitiva o de algún origen exógeno. La hidrosfera junto a la atmósfera constituyen las envolturas fluidas de la Tierra, unos medios donde la vida se manifiesta.

Los mares y océanos constituyen el mayor almacén de agua líquida con un volumen de 1348 millones de km³, las aguas continentales contienen solo 0,23 millones de km³; la que circula por la corteza (acuíferos, suelo) 8,062; el agua sólida representa 27,82 millones, y una cantidad muy inferior el agua al estado de vapor en la atmósfera (0,013). En ecología es de interés conocer la tasa de renovación anual que se obtiene para cada uno de los medios dividiendo el cambio anual por el volumen o el inverso que es el tiempo de renovación, cuyo valor es de unos 3000 años para los océanos, de 1 a 100 años para los lagos de agua dulce y tan solo de 9 a 10 días para el agua atmosférica. Si comparamos el número de especies animales en un determinado volumen de agua de los grandes dominios mencionados encontramos que por cada mil km³ solo hay 0,11 especies en el mar, 660 en las aguas continentales y 92.200 en la atmósfera, lo que se puede interpretar como que la escasez de agua y la vida en un medio más diversificado y progresivamente más distinto del marino han representado un estímulo para la evolución (MARGALEF, 1974, 1983).

Los distintos estados del agua se imbrican en el ciclo del agua. De forma sinóptica se puede afirmar que anualmente se evaporan desde los océanos unos 383.000 km³, de los que 346.000 retornan por precipitación. Sobre los continentes, a través de la precipitación orográfica, convectiva y ciclónica o frontal, caen en forma de agua líquida o sólida 99.000 km³ (37.000 procedentes del mar y 62.000 de la evapotranspiración continental). Salvando las acumulaciones temporales en aguas subterráneas y el hielo en ambos sentidos, los ríos devuelven anualmente a los océanos esos 37.000 km³ que significan el exceso de agua recibido por los continentes (DUSSART, 1966).

Aunque nuestra experiencia diaria nos acostumbra a ver el agua en sus tres estados, incluso para la medición de la temperatura Celsius eligió como referencia sus cambios de fase: sólido- líquido- gas, hay que mencionar que el abanico de fases posibles del agua es mayor. Así para el estado sólido hay más de quince distintas que presentan diferentes propiedades físicas y estructurales. La variedad más común es la del hielo hexagonal, Ih, que presenta organización cristalina hexagonal (h). En los copos de nieve predomina esta simetría hexagonal aunque existen diferentes morfologías para los cristales de nieve: dendritas, placas, agujas, carretes, etc. Esta diversidad de formas responde a dos factores principales, a saber: temperatura y sobresaturación de vapor de agua en la atmósfera. Cuando la temperatura es del orden de - 15° C y la masa de aire está muy sobresaturada aparecen las dendritas o crecimientos arbóreos, pero cuando la

sobresaturación es relativamente baja se van a formar placas o columnas dependiendo otra vez de la temperatura.

Otra variedad de hielo que aparece a presiones normales pero a temperaturas mucho más bajas que el anterior, del orden de $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, es el hielo cúbico, Ic, cuya estructura también es bastante abierta pero esta vez de simetría cúbica (c) y que se forma en las capas altas de la atmósfera. Otras variedades son las del hielo II, hielo III, IV, etc., que se obtienen con diferentes condiciones de temperatura y presión tal como refleja el diagrama de fases del agua (Figura 1). En él se observa como existen variedades del hielo a altas temperaturas, un hecho que no puede dejar de sorprendernos. Sucede que en circunstancias más o menos extremas de presión el agua pasa al estado sólido, a pesar de tener una temperatura que la haría cambiar a vapor bajo las normales condiciones naturales. Se trata de variedades exóticas de hielo que se pueden obtener cuando se investigan condiciones cada vez más extremas. Se ha conseguido la congelación ultrarrápida, del orden de nanosegundos, al comprimir agua líquida en un rango de 1 a 5 GPa obteniéndose hielo VII. A partir de setenta mil atmósferas (7 GPa) el agua no puede seguir en estado líquido y se solidifica en cuestión de nanosegundos (DOLAN and GUPTA, 2004; DOLAN et al. 2005). Recientemente en los laboratorios Sandia se ha estudiado la formación de hielo VII utilizando un formidable acelerador, la Máquina Z, la más poderosa fuente de rayos X del mundo, que consigue una temperatura de 1.6 millones de grados centígrados en un contenedor del tamaño de un carrete de hilo. Con esta máquina se ha logrado comprimir extraordinariamente una capa de agua de 25 micras de espesor en un rango de entre 5 y 12 GPa congelándose en nanosegundos. Las simulaciones realizadas indican que trabajando con presiones del orden de 100 GPa y 4000°K de temperatura se puede producir "agua metálica", donde los electrones se mueven libremente como en los metales, facilitando el que sea conductora. Otros experimentos sugieren que la Máquina Z podrá alcanzar temperaturas del orden de 2 a 2.2 millones de grados centígrados que es la nueva meta, ya que para la fusión nuclear son necesarias temperaturas de 2 a 3 millones de grados.

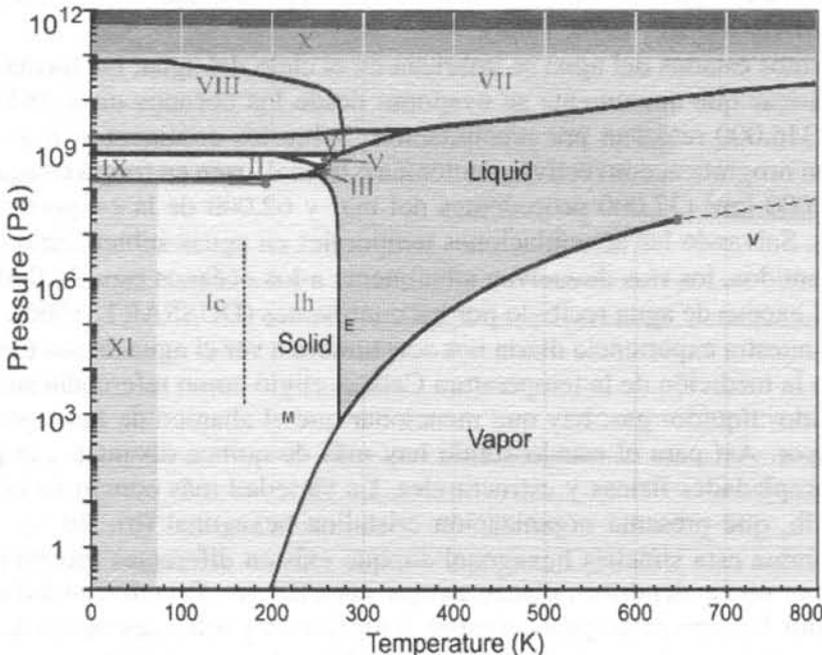


Figura 1.- Diagrama de fases del agua.

De otra parte el hielo acumulado durante cientos de miles de años en Groenlandia o en la Antártida es el único archivo que ha preservado la información tanto de los cambios climáticos del pasado como de la composición de atmósferas pretéritas. El Proyecto EPICA (EUROPEAN PROYECT FOR ICE CORE IN ANTARCTICA) ha proporcionado, a través de la perforación de la capa de hielo hasta los 3000 m de profundidad, una valiosísima información acerca de la variabilidad natural del clima y de los mecanismos de los rápidos cambios climáticos ocurridos en la última época glacial, que incluye el reconocimiento de ocho períodos glaciales en los últimos 740.000 años y datos sobre el contenido en gases invernadero (anhídrido carbónico, metano, óxido nitroso) de atmósferas pasadas que han quedado en pequeñísimos volúmenes encerradas en el hielo en el momento que se formó. Por ejemplo, respecto al metano las concentraciones preindustriales sobre la Antártida no han superado las 773 ppbv (partes por billón en volumen), mientras que el óxido nitroso muestra concentraciones máximas de 278 ppbv ligeramente superiores a las del principio del Holoceno (EPICA COMMUNITY, 2004; 2006). Con estas investigaciones además se pretende calibrar el efecto del hombre sobre el cambio climático natural.

También encontramos diversificación respecto al agua líquida en la que existen agregados de moléculas, polímeros o *clusters* en los que una molécula está unida a otras por medio de enlaces de hidrógeno, estando formados los más estables por tres, cuatro y cinco moléculas, o seis –hexámero que tiene forma de caja análogo a la estructura del hielo hexagonal-, agregados que a su vez se unen a otros formando unidades mayores en equilibrio dinámico y de efímera existencia, del orden de picosegundos.

Aunque el agua líquida se presenta entre los 0 y 100° C es posible mantener agua líquida hasta los - 41° C que es el límite inferior de la denominada agua *subenfriada*, también denominada agua *viscosa*, porque su viscosidad es mucho mayor, al igual que presenta una mayor densidad que el agua habitual. Así mismo, es posible mantener el agua líquida calentándola por encima de su punto de ebullición, siempre que se aumente la presión, obteniendo agua *supercaentada* hasta los 374° C, que es la temperatura crítica del agua o temperatura por encima de la cual no se puede licuar por mucho que se aumente la presión. A la presión correspondiente a esa temperatura crítica se la denomina presión crítica que para el agua es de 22.064 Mpa. El margen de existencia del agua líquida es por tanto muy superior al habitualmente considerado (ALARIO, 2006).

LA DIVERSIDAD POR LA COMPOSICIÓN

De los aproximadamente 1500 millones de km³ de agua que tiene nuestro Planeta, unos 1300, que son los que conforman los océanos, presentan una cierta homogeneidad respecto a su composición salina, que solo varía entre 35 y 39 g de sales por kg de agua. Las aguas marinas están muy mezcladas y su composición varía poco de unos lugares a otros. En ellas predomina el catión Na⁺ con un valor de 77,2 en porcentaje de equivalentes de los principales cationes y el anión Cl⁻ con un 90,2 en porcentaje de equivalentes de los aniones. Por tanto las aguas oceánicas vienen caracterizadas por su composición salina estable y la dominancia del cloruro sódico en ellas. No obstante, es posible diferenciar ciertas masas de agua oceánica que presentan características peculiares. Me refiero, por ejemplo, a las frías y de elevada salinidad y por tanto densas aguas que se hunden en las costas antárticas especialmente en el Mar de Weddell (Agua Antártica de Fondo) y de Groenlandia (Agua Noratlántica Profunda) que van a desplazarse lentamente por el fondo en dirección al Ecuador y que dan lugar a la

circulación termohalina.

Sin embargo, las aguas epicontinentales son tremendamente diversas en su composición debido fundamentalmente al lavado del sustrato que ejercen las aguas de escorrentía incorporando cantidades muy variables de sales en función de la naturaleza del terreno. De esta forma las aguas presentarán connotaciones de carácter más o menos local en un abanico que comprende desde aguas prácticamente destiladas en un extremo de la escala a aguas de mucha mayor salinidad que las del agua del mar en el otro, como sucede en las aguas que configuran lagos endorreicos u otros lagos salados como el Mar Muerto con más de 350 gramos de sales por kilo de agua. Aún así y de forma general podríamos afirmar que las aguas continentales vendrían definidas por su contenido en bicarbonato cálcico, al igual que las marinas lo eran por el cloruro sódico. La mayor parte de las aguas continentales tienen una concentración salina total muy baja (menos de 1 g por kg de agua), razón que justifica el calificarlas como “aguas dulces”. Por ofrecer un dato nuestro Guadalquivir en la provincia de Córdoba presenta unos niveles anuales medios de salinidad o, lo que es lo mismo, de la fracción mineral de las materias en solución de 824 mg/l (LÓPEZ FERNÁNDEZ et al., 1986)

El contacto entre agua salada y dulce en un acuífero o en un lago da lugar a que el agua salada, de mayor densidad, siempre vaya al fondo, lo que genera problemas en los acuíferos sobreexplotados de los que manará agua salada cuando se agote el agua dulce sobrenadante. En los lagos el agua salada constituirá el monimolimnion que habitualmente no participará del mezclado con las aguas superiores del mixolimnion. Ambos tipos de agua quedarán separados por una capa de fuerte variación en la densidad que es la quimioclina o litoclina. Esta particular estratificación es la que define a los lagos Meromicticos, de triple origen: crenogénico, ectogénico y biogénico.

Si atendemos a la alcalinidad de las aguas que viene definida por el exceso de cationes sobre los aniones fuertes, correspondiendo por tanto a los aniones débiles, siendo los más importantes, pero no exclusivos, en las aguas dulces el bicarbonato y el carbonato, nos encontramos con una nueva diversificación que nos permite distinguir entre aguas blandas de muy baja alcalinidad y aguas duras de alcalinidad elevada. Estas segundas son típicas de zonas calizas y se generan por procesos de ataque disolutivo del ácido carbónico a esos sustratos que generarán toda una serie de formas de modelado cárstico, lapiazes, cuevas, etc. Estas aguas al final de su recorrido saldrán por los manantiales con unas características muy diferentes a las que tenían cuando entraron, a partir del agua de lluvia y tras atravesar el suelo, por las diaclasas y fisuras al sistema calizo. Ahora son muy tamponadas y al tomar contacto con la atmósfera y perder anhídrido carbónico, ya sea por sobresaturación, por elevación de la temperatura, por fotosíntesis, etc., va a entrar en acción el sistema carbónico- bicarbonato- carbonato, produciéndose los típicos precipitados de carbonato que dan lugar a los travertinos y espeleotemas, a los que nos hemos referido con anterioridad en otras publicaciones y que no voy a detallar aquí (LÓPEZ FERNÁNDEZ, 2007; 2008).

No resulta necesario indicar que el hombre aprovecha esa gama de aguas diferentes en su composición que se obtienen de los manantiales o incluso del deshielo para comercializarla envasada bajo multitud de marcas. Tradicionalmente entre las aguas denominadas minerales se distinguen aguas sulfurosas (Ledesma, Carratraca), aguas clorurosódicas (Solares), aguas alcalinas (Vichy), aguas arsenicales (San Hilario), aguas cálcicas y magnésicas (Caldas de Bohí), aguas nitrogenosalinas (Panticosa). Así mismo, en el laboratorio y en la industria es posible obtener múltiples tipos de agua distintos en su composición y propiedades: agua destilada, descalcificada, desionizada, oxigenada, agua potable, agua fuerte, agua regia, etc. Mención aparte merece el agua desalada a

partir del agua del mar que gracias a las tecnologías de membranas puede obtenerse a precios relativamente asequibles (entre 0,5-1 euros/m³), y además hay que citar al agua reutilizada que va cambiando sucesivamente su composición, cuyo aprovechamiento y empleo se irá generalizando de forma progresiva en el futuro cercano.

LA DIVERSIDAD POR UBICACIÓN

Dentro del volumen ingente de aguas oceánicas es posible distinguir algunos tipos atendiendo básicamente al eje horizontal y vertical. En el sentido horizontal en la superficie marina se distinguen las aguas intermareales que se extienden entre los niveles de la bajamar y la pleamar, el agua somera de la plataforma continental que ocupa la zona nerítica y las aguas oceánicas situadas más allá de la plataforma continental. En sentido vertical se encuentra toda una gradación entre las aguas superficiales epipelágicas y las aguas abisales que ocupan las mayores profundidades del océano (BHATT, 1978).

En la superficie continental citaremos en primer lugar el agua del suelo o agua de infiltración que es la que queda retenida y se halla disponible para las plantas, el agua de capilaridad que está retenida en forma de finas películas entre las partículas del suelo, el agua de saturación o agua subsuperficial que ocupa la zona de saturación y se desplaza bajo la acción gravitatoria, etc. El agua del suelo alcanza un volumen de 65.000 km³.

Hay que citar a las aguas subterráneas, muchas de ellas asociadas a los ríos que transportan no sólo el agua que se ve en el cauce sino también una ingente cantidad de agua subálvea que circula más lentamente entre los materiales porosos, gravas, arenas, areniscas, etc. Estos materiales fueron depositados en el pasado como consecuencia de la subida del nivel del mar en los períodos cálidos, que obligaban a los ríos a rellenar con los materiales que transporta, al menos en los tramos bajos, el cauce que previamente fue ahondado cuando el nivel del mar bajaba de forma paulatina por la acumulación de hielo sobre los continentes. El agua también puede ocupar grandes bolsas de materiales permeables que están limitados por estratos impermeables. Las aguas subterráneas emergen a superficie a través de diferentes tipos de fuentes y manantiales, notables por la constancia de condiciones y por su antigüedad, lo que ha posibilitado la existencia de comunidades propias de los manantiales (MARGALEF, 1983). En ocasiones las aguas de los manantiales presentan características especiales en su composición dando lugar a aguas amargas, aguas sulfurosas, aguas ferruginosas, aguas de mineralización débil, etc., que ya se han comentado y que en muchos casos en el pasado y también en el presente son recomendadas para determinados pacientes que pasan temporadas de reposo en afamados balnearios. Los mantos acuíferos hasta los 800 m de profundidad albergan un volumen de agua de cuatro millones de km³, si bien esta cifra varía según los autores.

De otra parte, debemos considerar las aguas fluviales que constituyen los ríos, encargados de devolver al mar el exceso de precipitación que anualmente cae sobre los continentes, es decir, las aguas de escorrentía total, cuyo valor relativo es el 36% de la precipitación total y que tienen un tiempo medio de renovación de 12 a 20 días. El volumen de agua contenida en los cursos fluviales es de 1230 km³. El 68,7% de la superficie de los continentes es drenada por los ríos a lagos y océanos. El resto de las zonas continentales permanece prácticamente sin drenaje, constituyendo las áreas arreas, que incluyen los desiertos ya sean fríos o cálidos. Estas aguas fluviales transportan anualmente hacia el mar 2000 millones de toneladas de rocas y suelo procedentes de la erosión de la corteza terrestre. A escala global solo 13 ríos evacúan la tercera parte del exceso de agua que reciben los continentes, encabezados por el

Amazonas que, con un caudal de 190.000 m³/s, evacua el 15,1% de la escorrentía total anual (BAUMGARTNER and REICHEL, 1975).

Las aguas también forman parte de lagos, lagunas, estanques, embalses, etc. El volumen de los lagos de agua dulce se cifra en 123.000 km³ y el de otros lagos y mares internos a menudo salados de 100.000 km³. Las aguas lacustres pertenecen a más de setenta tipos diferentes de lagos (HUTCHINSON, 1957). Unos son muy antiguos como el Baikal, el decano de los lagos del Planeta, con una historia continuada de 25 millones de años, que encierra multitud de endemismos vegetales y animales. Otros son más modernos, relacionados con el deshielo tras la última glaciación, cuya vida no se remonta a más de diez o doce mil años. Citemos entre ellos al lago de Sanabria en Zamora, alimentado por el río Tera, que es el único lago de origen glaciar de España (VEGA et al., 2005). En Córdoba tenemos el lago de Zoñar, que fue hace años objeto de nuestras investigaciones (LÓPEZ FERNÁNDEZ et al. 1980, 1984; LÓPEZ FERNÁNDEZ and MUÑOZ ALBELDA, 1986).

De siempre los lagos han sido vistos como elementos impulsores y esenciales del paisaje; baste recordar a quien puede ser considerado pionero de la ecología y promotor del ecologismo, entre otros movimientos sociales, Henry David Thoreau (1817-1862), que se retiró durante dos años, 1845-1847, a vivir en plena naturaleza en un bosque cerca del lago Walden en Concord (Massachusetts), lago que le sirvió como título para una de sus obras (THOREAU, 1854) en la que escribió lo siguiente:

*Un lago es el rango más hermoso y expresivo del paisaje.
Es el ojo de la tierra en el que, mirando a su interior,
el espectador mide la profundidad de su propia naturaleza.*

Por último en este apartado debemos hacer alusión al agua que está presente en los organismos vivos, cifrada en 400 km³, al agua que se localiza en la atmósfera: 12.700 km³, en aguas profundas (4.000.000 km³) y en los casquetes polares y glaciares, cuya agua sólida tiene un volumen citado con anterioridad. En estos dos últimos casos se puede hablar de agua fósil que generalmente pasa largos períodos de tiempo aislada del ciclo general.

LA DIVERSIDAD ORGANOLÉPTICA

Aunque el agua pura sea incolora, inodora e insípida, en la naturaleza se encuentran aguas que se pueden catalogar por su color, olor y sabor.

Respecto al color, lo habitual es que esperemos encontrar al agua incolora como se presenta por ejemplo en las aguas limpias, netas, oligotróficas, de los riachuelos de alta montaña. En el hielo compacto y en las masas de agua al profundizar la luz se hace, como ya se ha comentado, azulada o azulado-verdosa, por el menor coeficiente de extinción de esas longitudes de onda. El hielo aparece azul cuando tiene una consistencia muy alta y las burbujas de aire no impiden el paso de la luz. El color azul es el que menos se absorbe y de ahí la tonalidad azulada del hielo puro, de un glaciar o de un iceberg. No obstante, por diversas circunstancias, el agua se presenta en algunos ecosistemas con algún tipo de color diferente. Tal es el caso de las aguas del río Hoang-Ho de China septentrional que son amarillas por los aluviones de loess que transporta, lo que le ha valido el nombre de río Amarillo. En otras ocasiones no es el material en suspensión el que imprime cierta tonalidad al agua sino los materiales disueltos, como por ejemplo el contenido en sulfatos que da un tenue color azulado como le sucede al río Tajo al pasar

por Aranjuez. También se ven azuladas, por ejemplo, las aguas de las piscinas, que son gours, de los cinco colores de Huanglong (China).

Hay cursos de agua de tonalidad rojiza como el Red River en Nuevo Méjico por la arcilla roja que arrastra, o la de nuestro Río Tinto en Huelva, cuyas aguas presentan además una acidez extrema que en verano llega a un valor de pH de 1,05, así como de niveles importantes de metales pesados, lo que hacen de él un medio casi prohibitivo para la vida, no obstante en sus aguas se han encontrado organismos extremófilos como ciertas bacterias, protozoos, hongos y algas. Entre las primeras hay bacterias quimiotróficas capaces de obtener su energía al metabolizar el sulfuro de hierro, dando como productos finales ácido sulfúrico e hidróxido férrico, responsables de la acidez del agua y de su color. Entre las microalgas citemos a *Chlamydomonas acidophila* o a *Euglena mutabilis*, organismos capaces de obtener el anhídrido carbónico de la atmósfera y de protegerse con carotenoides de las radiaciones ultravioleta cuando se sitúan en la superficie. La NASA y el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Aplicada) realizan en la zona del Tinto las investigaciones del Proyecto Marte que coordina el astrofísico Juan Pérez Mercader. Este Proyecto surgió cuando el robot "Opportunity" envió a la Tierra indicios suficientes de la existencia de Jarosita en Marte. Este sulfato de hierro, descubierto en 1852 en el barranco Jaroso de la sierra almeriense de Almagrera, necesita de aguas ácidas para formarse y se encuentra en el Río Tinto que como se ha visto es capaz de albergar vida, lo que hace pensar que en el Planeta Rojo también puede haberla o haya podido haberla en el pasado.

Hay también aguas de color rosa como la que presenta en ciertos momentos del año el agua de la laguna del Cisó en el NE de España. Tal coloración es debida al crecimiento masivo de bacterias fotosintetizadoras del género *Chromatium*. Estas bacterias viven en aguas estancadas ricas en materia orgánica y se sitúan en niveles con poco oxígeno pero a los que llega la luz. Tales condiciones se suelen dar en lagos meromicticos entre los cinco y veinte metros de profundidad. A veces la tonalidad rosa se presenta a nivel de la termoclina como consecuencia del crecimiento en un estrato de pocos centímetros de grosor de esos organismos, lo cual se pone de manifiesto cuando con un muestreador de profundidad se toma agua de ese determinado nivel.

En el mar se aprecia una tonalidad rojiza asociada a la denominada marea roja o hematotalasia, ya citada en el Éxodo. Se trata de aguas cargadas de peridíneos o dinoflagelados, que ocasionan la muerte de muchas especies marinas y la toxicidad de los mariscos, particularmente de los mejillones. De igual manera cuando en los mares fríos se encuentra el krill, (*O. Euphausiaceae*), crustáceos que aparecen en grandes densidades y que constituyen el alimento por excelencia de las ballenas, se observa el agua roja, como ya apuntara Charles Robert Darwin (1809-1882) en su viaje (DARWIN, 1982).

Como consecuencia de la eutrofización las aguas de lagos, ríos o embalses se pueden presentar de color verdoso o pardo por la proliferación de organismos fotosintéticos que prestan esa tonalidad al agua. La eutrofización está causada por el aumento de nutrientes o estimulantes vegetales en el agua, lo que en la estación cálida da lugar a una proliferación exagerada de pequeños organismos fotosintéticos, algas e incluso plantas flotantes, induciendo cambios en la biomasa, en las relaciones de competencia y en la diversidad del ecosistema, principalmente. Este exceso de materia orgánica junto a los exudados algales hace más difícil y costoso el potabilizar el agua que se destine a consumo público. Además, el metabolismo microbiano, cuando muera toda esa biomasa, conduce a fuertes depleciones de oxígeno, que también se pueden producir por las noches debido a la respiración de la ingente cantidad de organismos, lo que conduce

con frecuencia a la muerte por anoxia de peces y otras comunidades acuáticas.

La degradación anaerobia que se va a producir de ese exceso de materia orgánica da lugar a la presencia en el agua profunda de amonio, sulfhídrico, hierro, manganeso, etc., que reduce la calidad de esas aguas incluso para regadío. La causa del aumento de nutrientes, particularmente de compuestos nitrogenados y fosforados, hay que buscarla en los drenajes desde los campos agrícolas que han sido fertilizados de forma poco eficiente, así como en vertidos de aguas residuales hacia el ecosistema receptor. La solución pasa en primer lugar por evitar las causas realizando unas buenas prácticas de gestión de los campos de cultivo y la depuración adecuada, con tratamiento terciario, de las aguas residuales. Además existe toda una gama de medidas a emplear en las propias aguas del ecosistema para disminuir o minimizar los efectos de la eutrofización: empleo de sulfato de cobre para disminuir la biomasa algal, diferentes métodos de aireación para elevar los niveles de oxígeno disuelto, empleo de coagulantes, descargar el hipolimnion, dragar los sedimentos, cosechar la biomasa, etc., medidas todas ellas que pertenecen al campo de una buena gestión de los ecosistemas acuáticos (HARPER, 1995).

En ocasiones el agua se presenta de color negro: tal es el caso de las que se ven contaminadas por alpechín procedente de las industrias aceiteras. Este vertido de alpechines, hoy más controlado que hace años -en lo que ha influido el cambio en los procesos de extracción de aceite por parte de las almazaras-, es tremendamente perjudicial para los ecosistemas acuáticos ya que impide la penetración de la luz en ellos y deja las aguas sin oxígeno disuelto, dada la elevada Demanda Bioquímica de Oxígeno que presentan y que ocasiona la muerte de todos los organismos del ecosistema receptor de esos vertidos (LÓPEZ FERNÁNDEZ et al., 1983; BELLIDO SEMPERE et al., 1983).

Otras veces se nos presenta a la vista como de color blanco. Esto sucede, por ejemplo, cuando aguas cristalinas caen enriqueciéndose en oxígeno por un desnivel o cascada de mayor o menor envergadura, como la de Tívoli o la cascada de Aguas Blancas en la República Dominicana o incluso en Las Chorreras en la Sierra de Cabra por citar un lugar más cercano.

En ríos contaminados por aguas residuales las aguas tienen un color ceniza parecido al del "agua de fregona" con presencia de espumas frecuentemente. Son unas aguas que generan mal olor y, en ocasiones, su aspecto llega a ser repugnante.

En sentido figurado se habla de aguas de color amarillo dorado (SHAMIR, 2000) para referirse a aquellas de alta salinidad o con compuestos tóxicos que podrían ser reutilizadas tras los oportunos tratamientos con modernas tecnologías procedentes de la ingeniería química. Abundando en este sentido abstracto coincido con Shamir en que el color más importante del agua es el gris, haciendo referencia a la materia gris de nuestro cerebro. Sin duda la inteligencia humana será capaz de resolver los grandes retos que respecto al agua se le plantean a la humanidad.

Respecto del olor con frecuencia se presentan en el olfato aguas malolientes como es el caso de las aguas residuales urbanas, que impregnan incluso la atmósfera de las estaciones depuradoras. Las aguas de zonas pantanosas, de ciénagas y las que proceden del desagüe de fondo de los pantanos huelen mal, a podrido, como consecuencia de los productos finales provenientes de la degradación anaerobia de la materia orgánica: amonio, sulfhídrico, etc. Como olores agradables destaca el que desprenden las aguas del mar que nos llega a la mucosa pituitaria con la suave brisa marina.

Respecto del sabor distinguir en primer lugar entre las aguas dulces y las saladas. Otros sabores se presentan asociados generalmente a aguas procedentes de ciertos

manantiales. Así hay aguas de sabor agrio que suelen prestar el nombre a la fuente de la que manan, y aguas de sabores especiales por su contenido generalmente asociado a compuestos azufrados o ferruginosos.

LA DIVERSIDAD POR LA TEMPERATURA

La variación de la densidad del agua con la temperatura, que ya ha sido comentada, promueve que las aguas frías caigan hacia el fondo mientras que el agua de mayor temperatura tenga la tendencia a permanecer en la superficie. De esta manera en los ecosistemas acuáticos durante la estación cálida se va a producir la estratificación térmica, lo que nos permite distinguir una capa de agua caliente superficial, que recibe el nombre de epilimnion, una capa inferior de agua fría de un volumen superior a la anterior que constituye el hipolimnion, y un estrato de separación entre ambos tipos de agua, caracterizado por una fuerte variación en él de la temperatura, que se llama termoclina o metalimnion. Al llegar la estación fría se rompe esta estratificación, a lo que contribuye la pérdida de calor del agua, que va generando movimientos convectivos, y el viento que ayuda a que las aguas pasen a estar mezcladas, con la lógica homogeneización de sus características en perfil vertical.

La variación de la temperatura en las aguas de los lagos y los diferentes regímenes de estratificación y mezclado, que tienen que ver con la latitud y la altura sobre el nivel del mar, permite distinguir diversos tipos de lagos (HUTCHINSON and LÖFLER, 1956), desde aquellas aguas muy frías y con una capa permanente de hielo opaco en superficie que configuran los lagos Amícticos en un extremo de la escala, a las aguas siempre calientes a todas las profundidades de los lagos Oligomícticos en el otro.

Son conocidas también las aguas termales que brotan a temperaturas superiores a la media del ambiente de manantiales asociados a ciertos procesos de la corteza terrestre. La temperatura de salida es muy diferente de unos a otros manantiales, pudiendo llegar hasta el punto de ebullición con lo que se expulsa al exterior además agua al estado de vapor. Así sucede en los géiseres, que son emanaciones termales intermitentes, generalmente con desprendimientos sulfurosos, caracterizados precisamente por la emisión de una cantidad considerable de vapor de agua (STRAHLER, 1987).

En el mar también se producen movimientos convectivos que hacen descender a las aguas que se han enfriado en superficie bien por procesos de evaporación o bien por las bajas temperaturas reinantes, dando lugar, en los mares fríos de elevadas latitudes, al hundimiento de grandes masas de agua que constituirán las corrientes termohalinas, ya comentadas. También hay que citar a las aguas cálidas que generan corrientes superficiales que describen giros conocidas en diferentes áreas oceánicas, como las que se generan en el Caribe y comienzan a circular en dirección norte a una velocidad de cinco nudos transportando entre 20 y 40 millones de metros cúbicos de agua cada segundo. Estas aguas pasan entre Cuba y Florida dando la Corriente de Florida, que después constituirá la Corriente del Golfo y más tarde la Corriente Noratlántica que hará abundante la pesca al pasar por Terranova y otras zonas del Atlántico Norte, así como contribuirán a la dulcificación del clima de los países costeros del norte de Europa. Las aguas regresarán dando un giro completo en el sentido de las agujas del reloj hasta su lugar de origen en el Caribe.

LA DIVERSIDAD POR EL MOVIMIENTO

En las aguas dulces se distingue por un lado a las aguas corrientes, que se desplazan

a una determinada velocidad y por otro a las aguas estancadas. Las primeras constituyen los ecosistemas lóticos cuyo mejor exponente son los ríos y arroyos que drenan las zonas exorreicas. A las aguas corrientes se las ha visto como sistemas secundarios porque planteaban dificultades a la hora de aplicar nociones como la de comunidad o ecosistema. Sin embargo, la aplicación del concepto de continuo fluvial (VANNOTE, 1981; VANNOTE et al., 1981) ha contribuido en mucho a mejorar su percepción ecológica. Desde un punto de vista histórico debemos pensar que los cauces de los ríos y de las aguas corrientes en general han sido más persistentes que la mayor parte de los lagos, -como los caminos son más antiguos que las ciudades-. Una red fluvial está constituida por un conjunto de afluentes que van convergiendo de manera sucesiva, de forma que hay un mayor número de tramos equivalentes cuanto más aguas arriba sea. En consecuencia, hay más posibilidades de experimentación por parte de la naturaleza en aguas arriba, caracterizadas por unas condiciones más duras de supervivencia. Las aguas de cabecera tienen la posibilidad de arrastrar los organismos hacia aguas abajo donde la competencia entre especies se da en un marco más reducido de ecosistemas, que serían más estables que los de cabecera. Las aguas de los tramos inferiores circulan más lentas por la menor pendiente, por lo que el río tiende a ocupar el espacio y a divagar formando meandros y cauces reticulados.

Las segundas, las aguas estancadas, conforman los ecosistemas lénticos o leníticos. De siempre los lagos se han considerado como los ecosistemas acuáticos epicontinentales más completos, a manera de mares de dimensiones pequeñas. Un lago es aquella masa de agua que posee una profundidad suficiente para el establecimiento de una termoclina durante el periodo de estratificación. Si esta profundidad no es suficiente se habla de aguas que constituyen lagunas o estanques. Mención aparte merecen las aguas embalsadas. Los embalses son considerados como ecosistemas intermedios entre ríos y lagos. La necesidad de disponer de agua cuando ésta escasea, fenómeno asociado a determinados regímenes climáticos, ha llevado al hombre a la construcción de embalses, una actividad que no podemos calificar como de exclusiva de nuestros tiempos ya que se la conoce desde hace unos cinco mil años, tal es el caso de la presa de Jawa en Jordania con una altura de 5 m construida hacia el año 3000 a. C. o la de Saddle-Kaffara de Egipto construida hacia el 2600 a. C. con 11 m de altura (SCHNITTER, 1994). Respecto del agua embalsada se impone cada día con más fuerza la necesidad de disponer de unos eficaces programas de gestión y de vigilancia que impidan el que pueda verse deteriorada, por diversas circunstancias accidentales o intencionadas, la calidad de este agua tan necesaria para el bienestar y el desarrollo de la sociedad de nuestros días.

El agua de los lagos presenta dos tipos de movimientos que son fruto principalmente, pero no exclusivamente, de la energía cinética que es transferida por el viento al agua. Así se distingue entre movimientos periódicos u olas rítmicas y movimientos aperiódicos o corrientes arrítmicas. No voy a entrar en detalle en su descripción pero, dadas las profundas consecuencias que el movimiento del agua tiene sobre la química y la biología de las aguas internas, al menos nombraré los principales movimientos que se producen, a saber, en el epilimnion: las corrientes superficiales, la corriente espiral de Ekman, los giros, las olas de gravedad superficiales, las secas de superficie, las espirales de Langmuir y el flujo al azar. Por su parte, en la termoclina se distinguen los siguientes: las secas internas, las olas internas de gravedad de corto período y las olas internas de largo período que son las olas Kelvin y Poincaré (GOLDMAN and HORNE, 1983).

Los movimientos a gran escala de las aguas marinas dan lugar a la circulación

oceánica. Tanto la atmósfera como los océanos contribuyen al transporte de calor (energía) desde las latitudes bajas a las altas, amortiguando las diferencias de energía entre las diferentes zonas del Planeta. El océano actúa como una máquina térmica aunque es menos eficiente que la atmósfera. El origen de tal circulación es el calor procedente del sol que actúa sobre la superficie del agua para generar dos grandes tipos de movimientos: la circulación debida al viento y la circulación termohalina. Además la circulación oceánica se ve influenciada por la rotación de la Tierra (Efecto de Coriolis que fue descrito en 1884 por el científico francés Gaspard Gustave de Coriolis), por atracción lunar de tipo gravitacional, así como por fuerzas solares y por diferencias en los niveles de presión. En las aguas del mar se producen también una buena parte de los movimientos que hemos enumerado para las aguas dulces, que incluyen el transporte espiral de Ekman, la circulación de Langmuir, los giros, que son ahora de mucha mayor importancia, algunos de cuyos aspectos han sido ya comentados al igual que con la circulación termohalina. En cambio sí merece la pena dedicar unas líneas a los movimientos periódicos del nivel de los océanos, es decir al movimiento de las aguas en las mareas, que hacen referencia al ascenso y descenso periódico del nivel de los océanos. Desde el siglo I a C. se conoce que de alguna forma estaban controladas por el sol y la luna, pero no se consiguió una explicación correcta hasta que Isaac Newton publicó su Ley de la Gravitación en 1687. Sucintamente distinguimos entre la pleamar o marea alta y la bajamar, que ocurrirán cincuenta minutos más tarde cada día porque la Tierra invierte 24 h y 50' m en un giro sobre sí misma tomando como referencia la luna; entre las mareas vivas que tienen lugar dos veces al mes coincidiendo con la luna llena y nueva (sizigia), y las mareas muertas que suceden cuando el sol y la luna están en cuadratura. Las mareas vivas superan en un 20% a la marea media, mientras que las mareas muertas son inferiores a la media en ese mismo porcentaje. También hay mareas de perigeo (cuando la luna se encuentra en su posición más cercana a la Tierra) que son un 15-20% superiores a la marea media, y de apogeo (cuando se encuentra en la más lejana) que son un 20% inferiores a la marea media. Cuando coincide una marea viva con una marea de perigeo tendrá lugar una marea muy acusada y viceversa, cuando coincide una marea muerta con una de apogeo la oscilación de las aguas del mar será muy pequeña.

También merecen ser citados los movimientos del agua que dan lugar a las mareas fluviales que producen una ola, a veces de extraordinarias dimensiones, que penetra hacia el interior del estuario, y las corrientes de marea, que entran y salen de las desembocaduras de los ríos originadas por los cambios en el nivel del océano que producen las mareas (STRAHLER y STRAHLER, 1987).

LA DIVERSIDAD POR LA CONTAMINACIÓN

Son muchas las aguas tanto continentales como marinas que ven alteradas sus características por la contaminación. Desde el neolítico, hace casi cien siglos, el hombre ha construido sus ciudades principalmente a las orillas de los ríos. Las grandes civilizaciones de la antigüedad, baste recordar las del Creciente Fértil, ya se instalaron en sus márgenes. Pronto fueron vistas las aguas continentales no sólo como suministradoras sino también como evacuadoras, cauce abajo, de desechos y residuos no deseados. Las primeras contaminaciones debieron ser de tipo metálico relacionadas con la utilización del cobre, del hierro o del bronce y de tipo orgánico sobre todo aguas de albañal y las procedentes de industrias más o menos incipientes, como la textil y la de curtidos. Desde entonces el transcurrir del tiempo, con el aumento de la población,

la llegada de la revolución industrial, el desarrollo de la industria química, etc., ha propiciado el que en la actualidad la humanidad se encuentre con multitud de formas de contaminación que afectan a un gran número de ecosistemas acuáticos, de los que la sociedad de nuestros días, al menos en los países avanzados, reclama su restauración.

Por sistematizar, las aguas pueden recibir contaminantes pertenecientes a tres grupos: físicos, químicos y biológicos. Entre los primeros citamos a las aguas con contaminación radioactiva, consecuencia, sobre todo, de ensayos nucleares y accidentes. Lo primero que viene a la mente de todos es la explosión del reactor nuclear nº 4 de Chernobil, ocurrida a las 1h 23 minutos del 26 de Abril de 1986 y que acabó con un gran número de vidas quedando con secuelas miles de personas, además de la contaminación que se extendió por gran parte de Europa, particularmente de Cesio-137, que afectó a ecosistemas terrestres y acuáticos al incorporarse a las cadenas tróficas, viéndose en última instancia el hombre también afectado a través de la vía alimenticia. Es conocida también la contaminación de las aguas de muchos ríos, consecuencia de haber recibido vertidos producidos por experiencias nucleares, a veces secretas y ligadas a la industria del armamento nuclear, por citar algún ejemplo, la contaminación de ciertos ríos de Rusia que recibieron descargas de residuos líquidos de media y baja intensidad como sucedió en el río Techa, que obligó al traslado de varias poblaciones de sus orillas porque sus habitantes presentaban lo que secretamente se llamó "la enfermedad crónica de radiación por exposición prolongada". En el mar también se han realizado numerosas explosiones nucleares, baste citar los ensayos nucleares llevados a cabo por Francia en la Polinesia Francesa en el Pacífico sur, que ostenta el status desde 2004 de "colectividad de ultramar". Entre 1966 y Enero de 1996 Francia ha realizado cerca de 200 pruebas nucleares en los atolones de Mururoa y Fangataufa, unos ecosistemas coralinos cuyas aguas se han visto contaminadas por partículas de Plutonio y Cesio-137. La presión internacional ha contribuido a que desde hace 13 años no se realicen explosiones nucleares en esos atolones. De otra parte, las centrales productoras de energía originan la contaminación térmica del agua que utilizan para los procesos de condensación del vapor de agua, con lo que se evacua agua caliente al ecosistema receptor, con una temperatura generalmente entre 8 y 10 ° C más elevada. Este aumento, entre otras cuestiones, repercute en el metabolismo de las especies acuáticas y en la disminución del oxígeno disuelto, un hecho particularmente grave si además se ven contaminadas por aguas residuales (RAMADE, 1977a).

La contaminación química de las aguas es tremendamente variada por lo que me limitaré a reseñar con la mayor brevedad posible los casos más significativos. Respecto a la contaminación del agua por metales pesados su peligro estriba en que los organismos no están preparados para encontrarlos en cantidades más o menos elevadas en el ambiente, porque a lo largo de la historia de la evolución no han tenido que adaptarse desde un punto de vista fisiológico a concentraciones elevadas de metales, dado que éstos siempre han estado ausentes en el ambiente o a concentraciones naturales bajísimas. El caso de la contaminación del agua por mercurio es particularmente temido desde que en 1953 sucediese el episodio de la bahía de Minamata en Japón, donde los vertidos de metilmercurio de una fábrica americana de acetaldehído ocasionaron que el mercurio se fuese acumulando cada vez a mayores concentraciones a lo largo de la cadena trófica que culminaba en los habitantes de la bahía, ávidos consumidores de pescado. La intoxicación se tradujo en numerosas muertes y en daños genéticamente heredables con aparición de numerosas malformaciones, una sintomatología que dio en llamarse la Enfermedad de Minamata (RAMADE, 1977b), sufrida aún hoy por miles de personas. En la actualidad están muy controlados estos vertidos, aunque hay algunos

lugares en que se siguen produciendo, como en la cuenca del Amazonas, donde los buscadores de oro utilizan el mercurio para la purificación de este metal.

Por su proximidad citaré el caso sucedido en Luque (Córdoba) en 1985 cuando, a petición de la Agencia de Medio Ambiente, hubo de realizar un informe a cerca de la posible contaminación de unas aguas embalsadas por una empresa americana de prospección petrolífera. Las aguas presentaban un color amarillento con fuerte olor a sulfhídrico que habían salido desde una profundidad de 4000 m y tenían, como se descubrió en el estudio analítico, una fuerte contaminación por cromo trivalente y hexavalente consecuencia de los anticorrosivos empleados en el tubo de perforación por lo que se prohibió su vertido al río Guadajoz que era lo que pretendía la empresa (LÓPEZ FERNÁNDEZ et al., 1985).

Otro caso es el de las aguas ácidas contaminadas por óxidos de nitrógeno y de azufre de origen industrial y que ocasionan la llamada lluvia ácida, denominación con la que se designan aquellas precipitaciones con un pH inferior a 5,6 como consecuencia de la presencia de ácido sulfúrico y nítrico en ellas (GORHAM, 1984), que ha hecho estragos en muchos bosques europeos y americanos. Los efectos de la llegada de aguas ácidas a los ecosistemas acuáticos no son uniformes ya que las aguas receptoras que tengan suficiente reserva alcalina contrarrestarán la acción del ácido. Sin embargo son muy sensibles aquellos ecosistemas acuáticos que reciben el drenaje de sustratos altamente silíceos, bien representados en el escudo fennoscándico precámbrico de la península Escandinava, el Escudo Canadiense, Nueva Inglaterra, los Apalaches, etc. En lagos de esas regiones se han constatado en las últimas décadas descensos del pH entre 0,02 y 0,05 unidades por año. El efecto más llamativo de la acidificación ha sido la eliminación de la fauna piscícola tradicional aunque también se han descrito alteraciones en el resto de niveles tróficos e incluso la liberación de aluminio desde el suelo (ADRIANO and HAVAS, 1989). No obstante, hay investigadores que no achacan la acidificación de los ecosistemas acuáticos (al menos los escandinavos) al agua ácida procedente de la contaminación atmosférica, sino a errores cometidos en el pasado en el manejo de los bosques en los que se eliminaron las especies autóctonas para la construcción de granjas, abandonadas después por ser improductivas, regenerando a continuación la vegetación con especies introducidas fundamentalmente de coníferas, productoras de un humus rico en ácidos poliurónicos que actuarían como intercambiadores de iones cuando entran en contacto con los electrolitos disueltos en el agua de precipitación, por lo que se producen aguas de drenaje ácidas, con más facilidad cuando la lluvia es intensa (ROSENQUIST, 1978; 1980; ROSENQUIST et al., 1980). También se producen aguas ácidas por el drenaje de ciertas minas de carbón o de pirita. La oxidación de la pirita termina dando ácido sulfúrico; tal reacción ocurre lentamente, pero ciertas bacterias autotróficas como *Thiobacillus* o *Ferrobacillus*, poseen enzimas que efectúan esta reacción con rapidez. Estas aguas ácidas de las minas causan efectos adversos sobre la flora y la fauna de los cauces receptores y pueden facilitar la solubilización de metales pesados. La precipitación de hidróxido férrico tendrá lugar cuando el pH del agua aumente por dilución en aguas receptoras de los drenajes ácidos, causando efectos directos e indirectos sobre las comunidades del ecosistema que los recibe. El resultado es la disminución de la diversidad y la biomasa en las zonas afectadas.

Las aguas contaminadas por nitratos constituyen otro foco de atención que persigue la mejora de las prácticas agrícolas convencionales. En efecto, el escape por solubilización, y lixiviación junto a los fosfatos, de los nitratos que se utilizan como abono va a causar la ya comentada eutrofización en las aguas superficiales receptoras (ALVAREZ COBELAS et al., 1991). Pero este asunto se complica aún más cuando los

nitratos alcanzan las aguas subterráneas destinadas a consumo público y que permiten solo un determinado nivel de nitratos en ellas, a menudo sobrepasado en acuíferos relacionados con campos agrícolas. En sí los nitratos no son tóxicos, de hecho se emplean en determinados medicamentos y como conservantes, pero por reducción pasan a nitritos que son capaces de hacer afuncional a la hemoglobina sanguínea y causar metahemoglobinemia. La reducción de los niveles de nitratos en el agua pasa por una buena gestión de los campos de cultivo para proteger los acuíferos y por el empleo de tecnologías como el intercambio iónico utilizando resinas específicas, la ósmosis inversa, la electrodiálisis o incluso métodos biológicos (CANTER, 1997).

Otra variedad de agua contaminada por productos procedentes de la tecnología química es aquella que presenta residuos de plaguicidas. Desde que Paul Müller descubriera las propiedades insecticidas del DDT y recibiese el Premio Nobel de Medicina por ello en la década de los años treinta del pasado siglo han sido muchas las familias de sustancias sintéticas que se han utilizado, y se siguen utilizando, en la lucha contra las plagas. Baste citar a los insecticidas organoclorados, muchos de ellos ya prohibidos, que tras los rociamientos llegan al agua incorporándose a las cadenas tróficas y experimentando el fenómeno de la magnificación biológica, ya puesta de manifiesto hace más de treinta años (EDWARDS, 1975) y que tuvimos la oportunidad de estudiarlo en ecosistemas acuáticos cordobeses (LÓPEZ FERNÁNDEZ et al., 1980 op. cit.; LÓPEZ FERNÁNDEZ e INFANTE MIRANDA, 1981a y b; 1982; LÓPEZ FERNÁNDEZ et al., 1984 op.cit). Aguas contaminadas por herbicidas son también hoy día muy frecuentes tanto subterráneas (MORELL y HERNÁNDEZ, 2000) y de estuarios (READMAN et al., 1993) como superficiales, tal como en Córdoba se ha podido comprobar hace unos años en el embalse de Iznájar (LÓPEZ FERNÁNDEZ, 2009).

Las aguas que presentan contaminación biológica pertenecen a dos grandes grupos: unas contaminadas por microorganismos y otras en general por materia orgánica muerta. La presencia de microorganismos en las aguas se comenzó a investigar por razones de salubridad prestandose especial atención a las Enterobacteriáceas. Los estudios en relación al papel de los microorganismos en cuestiones ecológicas llegaron con posterioridad relacionados con las bacterias implicadas en los ciclos biogeoquímicos de los elementos (TOJA, 1980; CANTERAS, 1981; LÓPEZ FERNÁNDEZ and ANCHÍA VILDA, 1988). En aguas eutróficas con buena temperatura y en zonas de escasez de oxígeno se puede desarrollar el peligroso *Clostridium botulinum* causante de botulismo, lo que hace muy peligroso utilizar este agua para la bebida.

Las aguas residuales urbanas o de albañal o aguas negras son ricas en materia orgánica y producen cuando son vertidas a un ecosistema acuático fuertes bajadas de oxígeno disuelto como consecuencia del metabolismo bacteriano de esa materia orgánica que ponen en riesgo la supervivencia de los organismos acuáticos, además de contribuir a la eutrofización por los nutrientes que se liberan. Este tipo de contaminación por vertidos de aguas residuales es el más común y extendido y el que mayoritariamente forma parte de lo que Hutchinson llamaba la eutrofización cultural. La depuración de las aguas residuales urbanas, agroindustriales e industriales es un asunto que aún hoy no ha terminado de solventarse. La sociedad necesita cada vez con más urgencia de aguas depuradas y que además tengan posibilidades de reutilización.

LA DIVERSIDAD POR SU UTILIDAD

Aunque el agua sea útil para “todo” el pensar en la utilidad del agua conduce a la

distinción de dos niveles, uno que podríamos llamar microscópico o reduccionista y otro macroscópico. En el primero cabrían todas las respuestas que cada uno de nosotros daríamos a la pregunta para qué nos sirve el agua. Algunos rápidamente responderían que para beber y para asearse. A otros tal vez más bucólicos se les vendría a la retina la imagen de un lago o del mar porque valoran la percepción de un paisaje que les trae paz al espíritu. Otros pensarían en el agua que necesita su ganado o la industria o el transporte. Sin embargo, debemos caer en la cuenta de que la mayor parte del agua que está bajo el control del hombre se utiliza para riego, bajo una gran amplitud de sistemas que el hombre puso en marcha desde los albores de la humanidad y que han experimentado también el impulso de la tecnología en tiempos recientes, si bien cada vez más se reclame un cambio en las prácticas de riego orientado hacia un modelo de gestión del agua basado en la reducción de la demanda y que potencie la política de aguas frente a la política hidráulica (ROLDÁN CAÑAS, 2007).

El enfoque macroscópico nos lleva a tener en cuenta el papel esencial que juega el agua a nivel global en nuestro Planeta y a ser conscientes de la utilidad del agua en el intercambio de energía entre los distintos subsistemas y en el funcionamiento de la biosfera que no se puede entender sin la consideración del ciclo del agua.

LA DIVERSIDAD SUBLIMINAL

Esta diversidad que me ha parecido adecuado calificar de subliminal porque es de más difícil percepción que las anteriores, resulta ser de gran interés porque se refiere a conceptos recientes que ofrecen una nueva perspectiva respecto a lo que en términos globales podríamos denominar “política del agua”.

El primer concepto o metáfora es el de agua virtual que, como apunta WILCHEMS (2004), es útil para describir el uso del agua en la política agrícola y ganadera y para mejorar la seguridad alimentaria e hidrológica de un país. El concepto de agua virtual fue introducido en la última década del siglo pasado (ALLAN, 2003; 2006) y se refiere al agua utilizada en el proceso de producción de un bien cualquiera ya sea agrícola, alimenticio o industrial.

Cuando un país exporta un bien que ha necesitado del consumo de agua virtual para su producción es equivalente a exportar agua. De esta forma el país importador no necesita utilizar agua nacional para obtener ese producto y podría dedicar su agua a otros fines. La importación de agua virtual está facilitando que los países pobres en recursos hídricos consigan seguridad alimentaria e hidrológica, de modo que pueden destinar sus limitados recursos hídricos a fines más lucrativos como el turismo, la industria, el abastecimiento urbano o la producción de cosechas de alto valor (LLAMAS, 2006). El comercio de agua virtual puede permitir que países pobres en este tipo de recursos eviten lo que hasta hace poco se preveía que era una inminente crisis del agua. Estos países importan preferentemente alimentos básicos como cereales, arroz o forrajes de bajo contenido en agua virtual. Por ejemplo, la producción de 1 kg de cereales requiere 1500 l de agua virtual, mientras que 1 kg de carne de vaca requiere 15000 l (Cuadro I).

Cuadro I.- Cantidad de agua, en litros, necesaria para la producción de algunos bienes (Fuente: LLAMAS, 2005).

1 kg de carne de vaca.....	15000
1 kg de carne de cordero.....	10000
1 par de zapatos de piel de vaca.....	8000

1 kg de carne de pollo.....	6000
1 camisa de algodón de 500 g.....	4100
1 hamburguesa de 150 g.....	2400
1 kg de aceite de palma.....	2000
1 kg de cereales.....	1500
1 kg de cítricos.....	1000
1 vaso de leche de 200 ml.....	200
1 botella de cerveza de 250 ml.....	75
1 rebanada de pan de 30 g.....	40
1 hoja de papel A-4 de 80 g/ m ²	10

En Andalucía es cada vez más importante la exportación de aceite de oliva que requiere para la producción de 1 kg de aceite en olivares de regadío entre 500 y 1000 litros de agua (elaborado a partir de datos facilitados por GARCIA, 2008 y PINEDA, 2009), a la que hay que añadir el agua de lluvia (verde) en una cantidad que oscila según las precipitaciones entre 3000 y 6000 litros. Hay que sumar además el agua consumida por la almazara, la del envase, empaquetado, etc. Algunos autores cifran en 11000 litros el agua necesaria para la producción de 1 kg de aceite (GARRIDO, 2005).

A nivel global España importa 45 km³/año de agua virtual y exporta del orden de 31 km³/año (LLAMAS, 2005).

Relacionado también con este concepto se habla de agua azul, agua verde y huella hidrológica (*water footprint*). Como agua azul se designa al agua de los ríos, lagos y acuíferos, mientras que el agua verde es la que queda empapando el suelo después de la lluvia (es el agua del suelo a la que nos hemos referido con anterioridad). El agua verde es la que permite la existencia de la vegetación natural y de los cultivos de secano. La mayor parte de este agua se perderá por evapotranspiración hacia la atmósfera. En el caso de un país la suma del agua verde y azul se puede denominar como agua nacional. HOEKSTRA and HUNG (2002) introdujeron el concepto de huella hidrológica, muy ligado al de agua virtual, definido como el volumen de agua necesario para la producción de los bienes y servicios que utiliza una persona o un colectivo. La suma total del uso de agua verde y azul y del agua neta importada es la huella hidrológica de un colectivo o de un país. La huella hidrológica para el conjunto de la humanidad se estima en 7500 km³/año (CHAPAGAIN and HOEKSTRA, 2004), lo que supone menos de un 10% del total de las precipitaciones que anualmente caen sobre los continentes. Esto puede hacer mirar el futuro con cierto optimismo aunque este es un asunto mucho más complejo de lo que parece a simple vista.

LA DIVERSIDAD POR EL PRECIO

Y para finalizar con un cierto tono irónico aludir, en recuerdo de quien fuese miembro de esta Casa D. Rafael Cabanás, que comentaba este tipo de cuestiones en sus clases, que el agua pura y transparente de un arroyo de montaña la podemos beber y utilizar sin que nos cueste nada. Ahora bien si la queremos beber de una forma más cómoda, la que sale del grifo de nuestra casa, ya nos cuesta 0,0009 euros/l; si la preferimos tomar embotellada vamos a pagar mucho más: 0,3 euros el litro; si además la deseamos con burbujas, ya subimos a 0,6 euros y, para colmo, si la queremos teñida de negro nos costará 1 euro, y esto a precios de supermercado, que si la tomamos en algún lugar de distinción estos precios se disparan.

He dicho.

BIBLIOGRAFÍA

ADRIANO, D. C. and HAVAS (eds). 1989. *Acidic Precipitation*. Vol. 1. *Case Studies*. Vol. 2. Adriano, D. C. and Jonson, A.H. (eds). *Biological and Ecological Effects*. Vol. 3. Lindberg, S. E., Page, A. L. and Norton, S. A. (eds). *Sources, Deposition and Canopy Interactions*. Vol. 4. Norton, S. A., Lindberg, S. E. and Page, A. L. (eds). *Soils, Aquatic Processes and Lake Acidification*. Vol. 5. Bresser, T. A. and Salomons, W. (eds). *International Overview and Assessment*. Springer-Verlag.

ALARIO Y FRANCO, M. A. 2006. "El agua en que vivimos". *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.* (Esp). 100, 1: 157-173.

ALLAN, A. 2003. "Virtual water- the water, food, and trade nexus useful concept or misleading metaphor?" *Water International*. 28, 1: 4-11.

ALLAN, A. 2006. "Virtual water, part of an invisible synergy that ameliorates water scarcity". In *Water Crisis: Myth or Reality?* Roger, Llamas and Martinez, eds. Taylor and Francis Group. 131-150.

ALVAREZ COBELAS, M., MUÑOZ RUIZ, P. y RUBIO OLMO, A. 1991. *La eutrofización de las aguas continentales españolas*. Henkel Ibérica. 339 pp.

BAUMGARTNER, A., and REICHEL, E. 1975. *The world water balance*. Elsevier Sci. Publ. 179 pp.

BELLIDO SEMPERE, E., LÓPEZ FERNÁNDEZ, A., CHAMBER PÉREZ, I. y MERINO NAZ, E. 1983. "Algunas características físico-químico-biológicas de las aguas del río Guadalquivir a su paso por Córdoba, coincidiendo con una mortandad de peces". *II Congreso Español de Limnología*. Murcia.

BHATT, J. J. 1978. *Oceanography. Exploring the Planet Ocean*. D. Van Nostrand Company. 322pp.

CANTER, L. W. 1997. *Nitrates in Groundwater*. C R C Press. 263 pp.

CANTERAS JORDANA J. C. 1981. *Comunidades microbianas de un río y su embalse sometidos a contaminación orgánica*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Granada. 364 pp.

CHAPAGAIN, A. K. and HOEKSTRA, A. Y. 2004. "Water Foodprints for Nations". *Values of Water-Research Report Series*. 16, UNESCO-IHE. The Netherlands.

CRUZ PIZARRO, L. y CRUZ MARTÍNEZ, J. M. 1982. *Consideraciones sobre el estudio de los lagos*. Equipo de Ciencias Naturales "Los Filabres". Almería. 132 pp.

DARWIN, Ch. R. 1982. *Viaje de un Naturalista alrededor del Mundo*. Anjana Ediciones. Madrid.

DOLAN, D. H. and GUPTA Y. M. 2004. "Nanosecond freezing of water under multiple shock wave compression: Optical transmission and imaging measurements". *J. Chem. Phys.* 121, 9050.

DOLAN, D. H., JOHNSON, J. N. and GUPTA, Y. M. 2005. "Nanosecond freezing of water under multiple shock wave compression: Continuum modelling and wave profile measurements". *J. Chem. Phys.* 123, 064702.

DUSSART, B. 1966. *Limnologie. L'étude des eaux continentales*. Gauthier-Villars. París.

EDWARDS, C. A. 1975. *Persistent Pesticides in the Environment*. C R C Press.

EPICA COMMUNITY. 2004. "Eigth glacial cycles from an Antarctic ice core". *Nature* 429: 623-628.

EPICA COMMUNITY. 2006. "One to one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica". *Nature* 444: 195-198.

GARCÍA HURTADO, M. 2008. Comunicación personal referente a olivares de

regadío de Palenciana (Córdoba).

GORHAM, E. 1984. "Acid rain: an overview". In *Meteorological Aspects of Acid Rain*. Bhumralkar, C. M. (ed). Butterworth Publishers.

GARRIDO, A. 2005. cfr. LLAMAS, 2005.

GOLDMAN, Ch., R. and HORNE, A. J. 1983. *Limnology*. Mc. Graw-Hill.

HARPER, D. 1995. *Eutrophication of Freshwater*. Chapman and Hall. 327 pp.

HAYS, J. D., IMBRIE, J. y SHACKLETON, N. J. 1976. *Science*. 194: 1130.

HOEKSTRA, A. Y. and HUNG, P. Q. 2002. "Virtual Water Trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international food trade". Value of Water Research Report Series. 11. UNESCO-IHE. The Netherlands.

HUTCHINSON, G. E. (1957). *A Treatise on Limnology*. Vol. 1. J. Wiley and Sons. Nueva York.

HUTCHINSON, G. E. and LÖFLER, H. 1956. "The thermal classification of lakes". *Proc. Nat. Acad. Sci. Wash.*, 42: 84-86.

JOHNSON, S. J. 1970. "Oscilaciones climáticas 1200-2000 de nuestra era". *Nature*. 227, 5257, p. 483.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A., GONZÁLEZ, J. M., FERNÁNDEZ, J., MARTÍNEZ, J., PUERTO, A. y RICO, M. 1980. "Contaminación de la laguna de Zoñar (Córdoba). Niveles de insecticidas organoclorados en huevos de focha común (*Fulica atra*)". *Studia Oecologica* II: 171-179.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. e INFANTE MIRANDA, F. 1981a. "Residuos de insecticidas organoclorados en algunos ecosistemas acuáticos del SE de la provincia de Córdoba. I. Niveles en el agua". *Archivos de Zootecnia* 30, 117: 193-210.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. e INFANTE MIRANDA, F. 1981b. "Residuos de insecticidas organoclorados en algunos ecosistemas acuáticos del SE de la provincia de Córdoba. II. Niveles de contaminación y coeficientes de acumulación en los berros de agua (*Nasturtium officinale* R. Br.) y del caracol acuático *Melanopsis* sp". *Archivos de Zootecnia* 30, 118: 271-288.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. e INFANTE MIRANDA, F. 1982. "Residuos de insecticidas organoclorados en algunos ecosistemas acuáticos del SE de la provincia de Córdoba. III. Niveles en el cangrejo de río (*Austropotamobius pallipes* Lereb)". *Archivos de Zootecnia* 31, 119: 73-90.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A., BELLIDO SEMPERE, E. y CHAMBER PÉREZ, I. 1983. "Variaciones de algunas características de las aguas del río Guadalquivir en la provincia de Córdoba coincidiendo con la campaña de molturación de aceituna". *II Congreso Español de Limnología*. Murcia.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A., MUÑOZ ALBELDA, T. Y BELLIDO SEMPERE, E. 1984. "Contaminación por residuos de insecticidas organoclorados de la laguna de Zoñar (Córdoba)". *Limnetica* 1: 122-127.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A., BELLIDO SEMPERE, E. y MUÑOZ ALBELDA, T. 1985. *Informe sobre las características de muestras de agua procedentes de la instalación de perforación de petróleo ubicada en el Término Municipal de Luque (Córdoba)*. Realizado a petición de la Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Dirección Provincial de Córdoba).

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. and MUÑOZ ALBELDA, T. 1986. "Vertical distribution of certain organochlorine compounds in the Monomictic Lake Zoñar (Córdoba, Spain)". *Acta Hydrobiologica* 28 ¾. 307-316.

LÓPEZ FERNÁNDEZ A., BELLIDO SEMPERE, E., MUÑOZ ALBELDA, T., VILLALBA CABELLO, I., ANCHÍA VILDA, E., LÓPEZ TORRICO, P.,

OJEDA PIZARRO, M. A., SAAVEDRA DEL RÍO, M., PORRAS CASTILLO, A., ROMERA CAZORLA, E., BENITEZ CAMACHO, C., HINOJOSA GARRIDO, M., SOLER RODRÍGUEZ, F. y GALLEGU RUBIO, A. 1986. *Estudios Ecológicos del Río Guadalquivir en Córdoba. Evaluación de la Contaminación y Alternativas de Saneamiento*. Proyecto de Investigación subvencionado por el Excmo. Ayuntamiento de Córdoba, Excmo. Diputación Provincial de Córdoba y la Consejería de Gobernación de la Junta de Andalucía. 5 volúmenes, 1023 pp.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. and ANCHÍA VILDA, E. 1988. "Ecology of some species of Thiobacillus and sulfate-reducing bacteria in the middle course of the river Guadalquivir (Spain)". *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 73, 3: 309-318.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. 2007. "Los travertinos de Santa María de Trassierra (Córdoba, España)". *Boletín de la Real Academia de Córdoba*. Año LXXXVI. Nº 152: 81-94.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. 2008. "Las razones de la arquitectura del agua de Zuheros". *II Jornadas de la Real Academia de Córdoba en Zuheros*. En prensa.

LÓPEZ FERNÁNDEZ, A. 2009. "La incidencia de productos agroquímicos en los embalses: el caso de Iznájar". *II Jornadas de la Real Academia de Córdoba en Iznájar*. En prensa.

LLAMAS MADURGA, M. R. 2005. "Los colores del agua, el agua virtual y los conflictos hídricos". Discurso Inaugural del Año Académico 2005-2006. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid*. 30 pp.

LLAMAS MADURGA, M. R. 2006. "La contribución de los avances científicos a la solución de las crisis del agua". *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Esp)*. 100, 1: 175-186.

MARGALEF, R. 1974. *Ecología*. Omega. Barcelona.

MARGALEF, R. 1983. *Limnología*. Omega. Barcelona.

MORELL, I. y HERNÁNDEZ, F. 2000. *El agua de Castellón: un reto para el siglo XXI*. Atenea.

PINEDA PRIEGO, M. 2009. Comunicación personal sobre olivares de regadío de Córdoba.

RAMADE, F. 1977a. *Elementos de Ecología Aplicada*. Mundi Prensa.

RAMADE, F. 1977 b. *Ecotoxicología*. Masson.

READMAN, J. W., ALBANIS, T., BARCELO, D., GALASSI, S., TRONCZYNSKI, J. y GABRIELIDES, G. P. 1993. "Herbicide contamination of mediterranean estuarine waters: results from a MED POL pilot survey". *Marine Pollution Bulletin* 26, 11: 613-619.

ROLDÁN CAÑAS, J. 2007. "En torno al riego". Discurso de Ingreso en la Real Academia de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes de Córdoba. *Boletín de la Real Academia de Córdoba, de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes* nº 153: 81-105.

ROSENQUIST, I. Th. 1978. "Alternative sources for acidifications of river water in Norway". *The Science of the Total Environment*. 10: 39-49.

ROSENQUIST, I. Th. 1980. "Influence of forest vegetation and agriculture on the acidity of fresh water". In *Advances in Environmental Science and Engineering*. Pfafflin, J. R. and Zieper, E. N. (eds). 56-79.

ROSENQUIST, I. Th., JORGENSEN, P. and RUESLATTEN, H. 1980. "The importance of natural H⁺ production for acidity in soil and water". *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact Acid Precip. Norway*. SNSF project. 240-241.

SCHNITTER, N. J. 1994. *Historia de las Presas. Las Pirámides Útiles*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

- SHAMIR, U. 2000. *Sustainable Management of Water Resources*, Transition towards Sustainability, Interacademy Panel Tokio Conference, May , pp 62-66.
- STRAHLER, A. N. 1987. *Geología Física*. Omega.
- STRAHLER, A. N. y STRAHLER, A. H. 1987. *Geografía Física*. Omega.
- THOREAU, H. D. 1854. *Walden or Life in the Woods*. Ticknor and Fields. Boston.
- TOJA, J. 1980. "Limnología del embalse de La Minilla durante 1976". *Oecol. Aquat.*, 71-110.
- VANNOTE, R. L. 1981. "The river continuum. A Theoretical construct for analysis of river ecosystems". *Biological services Program*. Oct.
- VANNOTE, R. L., MISHALL, G. M., CUMMINS, K. W., SEDELL, J. R. and CUSHING, C. E. 1981. "The river continuum concept". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37: 130-137.
- VEGA, J. C., De HOYOS, C., ALDASORO, J. J., DE MIGUEL, J. y FRAILE, H. 2005. "Nuevos datos morfométricos para el lago de Sanabria". *Limnetica*, 24(1-2): 115-122.
- WILCHEMS, D. 2004. "The policy relevance of virtual water can be enhanced by considering comparative advantages". *Agricultural Water Management*, 66: 49-63.