

En los lagos de las regiones ecuatoriales, sub-tropicales, etc., también se observan idénticos fenómenos de estratificación pero con intensidad y periodicidad diferentes. Así es como en un lago tropical a pesar de que sus aguas tienen siempre una temperatura relativamente elevada y nunca hay formación de hielo o llega a tener la temperatura de 4°C, la estabilidad de estratificación es casi tan grande como en los lagos templados. Esto se explica de la siguiente manera: se sabe que las variaciones de densidad del agua debidas a las modificaciones de la temperatura, son mucho mayores a temperaturas altas que a las bajas. Debido a ello es que entre los 24 y 25°C se observa una variación de densidad treinta veces mayor que entre 4 y 5°C. Como resultado de esto, se tiene que una diferencia de pocos grados en la temperatura de dos capas de agua en un lago tropical es suficiente para provocar una diferencia grande de densidades o la necesaria para proporcionar una gran estabilidad de estratificación (25). Otra consecuencia de este mismo hecho, es que, en los climas tropicales, un pequeño enfriamiento de las capas superficiales produce diferencias tan grandes en la densidad que su descenso hacia el fondo da origen a corrientes mucho más intensas en el período de circulación de otoño que en los lagos templados, donde la temperatura del agua está alrededor de los 4°C y cuyo calentamiento provoca diferencias infinitesimales en la densidad. Esas corrientes promueven el enfriamiento del hipolimnio y la mezcla de las capas de agua, aún sin la intervención de los vientos.

En las regiones tropicales, la temperatura de la superficie de los lagos nunca es menor de los 20 ó 30°C. A pesar de ello, esa pequeña gradiente térmica puede dar origen a una gradiente de la densidad suficiente como para provocar la estratificación estable. En esos lagos se produce solamente un período de circulación total en las épocas más frías del año.

En las regiones sub-tropicales, los fenómenos de estratificación y circulación son semejantes entodo a los que se producen en las regiones templadas, con la única diferencia de que en ellas nunca se observa el fenómeno de la estratificación inversa que ocurre todos los años en los lagos templados siempre que la temperatura del agua sea inferior a los 4°C.

En las regiones polares y sub-polares los lagos se caracterizan por una gradiente térmica en que la temperatura superficial rara vez (o nunca) es superior a los 4°C. La capa de hielo que se forma impide la acción del viento la mayor parte del año, existiendo los fenómenos de circulación solamente en el verano o en el verano y otoño (lagos sub-polares).

La introducción de desechos en un cuerpo de agua puede afectar sus características térmicas de diferentes maneras: el aumento de la cantidad de material en solución o en suspensión que, como se ha visto en páginas anteriores, puede reducir la penetrabilidad de las radiaciones, elevando la temperatura de las capas superficiales. En la represa Billings de Sao Paulo, Brasil, en las áreas caracterizadas por gran cantidad de materias en suspensión y una coloración cenicienta oscura y aún

en las zonas ya autopurificadas que contienen gran cantidad de flocs de algas azules en la superficie, las diferencias de temperatura entre la superficie y los 8 metros de profundidad son ligeramente superiores a las que se observan en las zonas de aguas limpias. Los propios fenómenos de oxidación biológica de la materia orgánica pueden producir la elevación de la temperatura en áreas localizadas. Se observa con frecuencia en los ríos en cuyos lechos se depositan cantidades apreciables de lodo de desagües o material proveniente de la caída de las hojas, un calentamiento perceptible del fondo. Finalmente, la causa principal del calentamiento de los ríos consiste en el lanzamiento a su cauce de desechos industriales de temperatura elevada o, con más frecuencia, del agua de sistemas de refrigeración de calderos o de máquinas térmicas, entre los cuales se destacan las plantas generadoras de electricidad.

La consecuencia principal de la elevación de la temperatura del agua de una fuente cualquiera está relacionada con la pérdida de oxígeno. La solubilidad del oxígeno en el agua, así como la de otros gases, es mayor cuanto menor es la temperatura. El calentamiento empobrece al agua en oxígeno y puede dar como resultado lo siguiente: sustitución de los procesos aerobios de descomposición de la materia orgánica presente en el agua, por procesos anaerobios con la consiguiente producción de mal olor debido al desprendimiento de metano, mercaptans, ácido sulfhídrico, etc.; asfixia de los organismos acuáticos aerobios, tales como peces y otros que mueren en gran cantidad agravando aún más las consecuencias de la putrefacción; mayor solubilidad de los compuestos de fierro, lo que dificulta la utilización de esa agua para abastecimiento público; reducción de la potabilidad del agua, etc. Por otro lado, según las observaciones de Arnold (27), la elevación de la temperatura puede beneficiar el tratamiento de las aguas en varios otros aspectos; por ejemplo, aumentando la solubilidad del sulfato de cobre y otros compuestos empleados en el tratamiento del agua, proporcionando así una economía de material, o aún disminuyendo la solubilidad del fierro y del calcio facilitando su precipitación.

### 2.3.2. Propiedades Químicas de los Cuerpos de Agua.

Una de las más importantes características del agua es su gran capacidad para disolver sustancias iónicas o moleculares, dando origen a soluciones electrolíticas o no electrolíticas (verdaderas soluciones). En el caso de la formación de soluciones iónicas y coloidales del tipo gel, donde las micelas dispersas en la fase líquida constituyen partículas dotadas de altas cargas electrostáticas, esa capacidad resulta de la alta constante dieléctrica que caracteriza no sólo al agua sino también a otros líquidos que contienen hidrógeno en su molécula. Con relación a la formación de soluciones no electrolíticas, el alto poder disolvente del agua se debe a su peculiar estructura molecular que hace posible la existencia de puentes de hidrógeno de una a otra molécula (2).

De esa enorme capacidad que tiene el agua de disolver - sustancias resulta que sea prácticamente imposible obtener, aún en el laboratorio, un agua que sea absolutamente libre de impurezas. Y cuando se trata de cuerpos de agua naturales expuestos al aire o al contacto con las rocas, el suelo, la materia orgánica proveniente de vegetales ribereños, etc., se comprende perfectamente que tales aguas, es decir, el agua de los ríos, lagos y mares contengan invariablemente sustancias en solución, ya sea bajo la forma de gases, en forma iónica o molecular, o en forma de miscelas coloidales o de partículas en suspensión. La misma agua de lluvia cuando atraviesa la atmósfera cargada de polvo y del humo de las fábricas y aún el agua que en forma de gotitas constituye las nubes, contienen pequeñas cantidades de sulfatos, cloruros, etc., y a veces cantidades apreciables de amoníaco, nitratos, etc.

Las características cualitativas y cuantitativas de la flora y fauna que habitan en una fuente de agua determinada, dependen, estrictamente de la cantidad y de la proporción que hay entre cada uno de los diferentes elementos que están presentes en esa agua. De ellos, los que se encuentran en concentraciones mínimas, es decir, concentraciones apenas superiores a las mínimas exigidas por una determinada especie animal o vegetal, son los que desempeñan un papel decisivo y directo con relación a la abundancia de esa especie. Esa ley, llamada ley de Liebig o ley del mínimo se puede enunciar así: la abundancia de un organismo en un medio dado es proporcional a la concentración del elemento fertilizante asimilable que se encuentra en la cantidad mínima requerida por ese organismo (6). Actualmente ese concepto ha sufrido modificaciones en virtud de los conocimientos más detallados que se tienen con respecto a la interacción de los diferentes elementos que constituyen un medio. La ley en referencia hace pensar que los diferentes factores ambientales actúan independientemente, de tal manera que si uno se encuentra en cantidad limitada ningún efecto resulta de la variación de los otros factores. Hoy en día se sabe que el simple control del factor en mínimo no es una cosa absoluta puesto que apenas reduce, sin llegar a eliminar, la influencia de los demás factores. Esto llevó a Welch a la conclusión de que: "La comprensión de las condiciones necesarias para la producción biológica depende no sólo del reconocimiento de cada uno de los factores que intervienen en ella y de la medida de su cantidad o intensidad, sino también del conocimiento de la forma cómo cada uno de ellos se comporta en presencia de los demás, lo que hace aún más complicado el problema". (28).

Los organismos vivos existen prácticamente en todas las aguas naturales, cualquiera que sea su composición química con excepción de las aguas que contienen sustancias fuertemente tóxicas. Aún en las aguas en las cuales se encuentran condiciones inapropiadas para el desarrollo de la mayoría de las especies, como son por ejemplo los medios muy polucionados, existen ciertas especies que se adaptan a ellos. Esas especies al encontrarse libres de la competencia de otros organismos consiguen reproducirse con facilidad. Por lo tanto, di-

chos ambientes se caracterizan por tener un número reducido de especies pero representadas por un gran número de individuos. Por el contrario, los ambientes más propicios a la vida de la mayoría de las especies y donde hay gran concurrencia de ellas, se encuentra un gran número de especies con pocos representantes de cada una. Cuanto más fácilmente utilizables son las fuentes de energía que existen en un medio, tanto mayor es el número de especies capaces de vivir en él y menor el número de individuos de cada especie.

En general, un factor importante en la limitación de la vida en las aguas es la salinidad del medio. La vida vegetal exige una cierta concentración de sales minerales; por otro lado, una salinidad excesiva impide el desarrollo de gran número de especies que son incapaces de defenderse contra la pérdida de agua originada por la elevada presión osmótica del medio. Thienemann, estudiando algunos lagos salados de Westfalia, Alemania, comprobó que en los ambientes cuya salinidad era superior al 3% vivían 64 especies de animales; en los lagos cuya concentración variaba entre 3 y 10% encontró 38 especies; en los que tenían 16% apenas 12 especies; y en los que tenían concentración entre 16 y 20% había una sola especie, representada por un número excepcionalmente grande de individuos (10).

Como consecuencia, sobre todo, de las diferencias de temperatura y de densidad que existen en las distintas profundidades, las sustancias químicas, especialmente los gases, disueltos en el agua se encuentran distribuidos en forma estratificada y no homogénea. Esa estratificación química es a su vez responsable de una estratificación bioquímica en el cuerpo de agua, originada por una distribución no uniforme de sus habitantes de acuerdo a sus necesidades de oxígeno y sustancias nutritivas. En un cuerpo de agua, se puede distinguir dos zonas más o menos definidas de acuerdo al tipo de actividad orgánica que prevalece: una zona superficial, llamada zona trofógena, donde se realiza la absorción de la mayor parte de la luz y por consiguiente, se llevan a cabo las reacciones de fotosíntesis por encima del punto de compensación y la producción de materia orgánica; y una segunda zona, situada por debajo de la primera, donde por el contrario predominan los procesos de desasimilación o descomposición y por eso denominada zona trofólítica.

En los lagos en los cuales se realiza el fenómeno del estancamiento de verano, la zona trofógena queda limitada al epilimnio y a veces incluye también a la termoclina, mientras que la zona trofólítica está constituida por el hipolimnio.

#### 2.3.2.1. Distribución de los Gases.

La concentración de los gases disueltos en el agua depende principalmente de la presión parcial del gas considerado (siempre que se trata de gases atmosféricos) y de la temperatura. Para conocer la presión parcial de un gas es necesario

tomar en consideración la presión total del aire y la proporción en que ese gas entra en la mezcla del mismo. Además, es preciso que se tenga en cuenta el grado de solubilidad específica de cada gas para determinadas temperaturas y presiones ya que la solubilidad disminuye con la elevación de la temperatura y en general, esa disminución no se realiza según una línea recta que es la representación de una función de primer grado.

Las relaciones entre presión, temperatura y calidad de los gases disueltos tienen una importancia fundamental en los estudios limnológicos. En un cuerpo de agua, la vida, sobre todo animal, depende de la cantidad de oxígeno disuelto y como éste varía en las diferentes regiones, caracterizadas por distintas presiones y temperaturas, se hace indispensable el conocimiento de estas últimas a fin de evaluar las posibilidades de vida a las diversas especies en cada región. Muchos animales, como por ejemplo, los peces salmonídeos (truchas y salmones) buscan las regiones más frías de un lago o de un río no tanto porque son susceptibles a las temperaturas elevadas sino porque tienen mayores exigencias con respecto a la cantidad de oxígeno disuelto. Del mismo modo, se observan fenómenos semejantes en los vegetales: se sabe que entre las algas de agua dulce, algunas tienen la capacidad de tomar el anhídrido carbónico de equilibrio, cedido por los bicarbonatos como fuente directa de carbono para la fotosíntesis, mientras que otras solamente pueden vivir en ambientes que tienen un alto contenido de  $\text{CO}_2$  agresivo. La temperatura tiene una influencia directa en la relación que hay entre el  $\text{CO}_2$ , bicarbonatos y carbonatos. En un agua que contiene elevada concentración de carbonatos se consumen grandes cantidades de anhídrido carbónico para la transformación de los carbonatos en bicarbonatos y por lo tanto, si esa agua tuviera una temperatura elevada no habría exceso de anhídrido carbónico que permaneciese en estado libre. Solamente cuando el agua está a una temperatura baja es capaz de retener suficiente cantidad de anhídrido carbónico como para que alcance en la transformación de todo el carbonato en bicarbonato y todavía haya un exceso que permanezca libre y utilizable por las algas que son incapaces de emplear directamente el  $\text{CO}_2$  de equilibrio. Tales algas tendrán su ciclo de vida indirectamente limitado por el factor temperatura, aunque en este caso, el anhídrido carbónico sea el verdadero factor limitativo.

#### 2.3.2.1.1. Oxígeno.

Un litro de aire contiene en números redondos 210 mg de oxígeno y 790 mg de nitrógeno (incluyendo los gases raros y anhídrido carbónico que existen en muy pequeñas cantidades). A la temperatura de  $20^\circ\text{C}$  el agua tiene un coeficiente de absorción para esos gases de 1:32 y 1:65 respectivamente. Luego, un litro de agua a  $20^\circ\text{C}$ , expuesto al aire a presión normal al nivel del mar, contendrá en solución 9.08 mg de oxígeno y 12.3 mg de nitrógeno. Ahora bien, el coeficiente de absorción de los gases por el agua disminuye con el aumento de la temperatura. Siendo esto así, por ejemplo a una temperatura de  $5^\circ\text{C}$  los valo-

res mencionados anteriormente serán modificados a 12.77 mg de oxígeno y 16.8 mg de nitrógeno. En función de ello se podría esperar que en un lago la cantidad de oxígeno disuelto fuese siempre mayor donde la temperatura fuese más baja. Esto que sería decir que en un período de estratificación en el que la temperatura del lago variase de  $20^\circ\text{C}$  en la superficie a  $4^\circ\text{C}$  en el fondo, la curva del oxígeno disuelto, con relación a la profundidad, sería exactamente inversa a la curva de la temperatura. Sin embargo, raras veces se realiza ese fenómeno puesto que se consumen grandes cantidades de oxígeno en las regiones profundas debido a la oxidación de sustancias orgánicas que precipitan y a la respiración de animales y bacterias aerobias que viven allí (2). Otros aspectos de la solubilidad del oxígeno en el agua se discutirán en el Capítulo 6.

En los lagos oligotróficos que generalmente son profundos, de aguas claras, pobres en sustancias nutritivas orgánicas y minerales y por lo tanto en plancton animal y vegetal, la cantidad de oxígeno permanece más o menos constante desde la superficie hasta el fondo. Por otro lado, en lagos poco profundos, ricos en materia orgánica putrescible y en plancton, llamados lagos eutróficos, la cantidad de ese gas disminuye sensiblemente (hasta cero algunas veces) en las regiones profundas. Siendo esto así, se puede tener una idea bastante aproximada de la productividad de un lago a través de su curva de oxígeno, puesto que la cantidad de materia oxidable contenida en un agua, constituye al mismo tiempo la fuente de energía utilizable por los organismos animales y la causa de la depresión del oxígeno en las regiones donde se acumula en mayores cantidades.

Las zonas superiores, donde hay mayor acceso a la luz son todavía más enriquecidas por el oxígeno producido en la fotosíntesis de los vegetales. También se debe recordar que la elevación de la temperatura en algunas regiones aumenta la velocidad de las reacciones de oxidación y la actividad respiratoria de los organismos acuáticos, las que contribuyen a un mayor consumo de oxígeno. Los lagos térmicamente estratificados pueden ser mucho más ricos en oxígeno en el metalímnio que en la superficie (Hutchinson (2) menciona casos hasta de 380% de saturación en esa capa), lo que hace que ciertos animales, por lo menos en las épocas más calientes del año, busquen esas regiones más profundas. Las aguas claras, ricas en sustancias nutritivas y en las que hay proliferación de microorganismos clorofilados puede llegar a tener grandes cantidades de oxígeno.

Los organismos sub-acuáticos se sirven de los más variados procesos y mecanismos para obtener el oxígeno indispensable para su respiración. Muchos de ellos realizan el cambio de gases por ósmosis a través de los tejidos de la superficie del cuerpo, gracias a la diferencia de presiones parciales del anhídrido carbónico y el oxígeno que existe dentro y fuera del cuerpo del organismo y que tienden a equilibrarse. Otros como los crustáceos y los peces tienen órganos especialmente destinados a realizar esos cambios con el medio acuático.