

Horacio E Zagarese y Walter R CraveroCentro Regional Universitario Bariloche,
Universidad Nacional del Comahue**Virgina Villafañe y Walter Helbling**

Estación de Fotobiología Playa Unión, Rawson

Efecto de la radiación ultravioleta sobre los ecosistemas acuáticos

La radiación solar es la principal fuente de energía en la mayoría de los ecosistemas naturales. Las algas y las plantas verdes utilizan la energía radiante proveniente del sol para sintetizar moléculas orgánicas a partir de moléculas inorgánicas que toman del medio —o sea, que pueden realizar fotosíntesis—, por lo que así se convierten en la base de la vida en la Tierra (ver 'Agua, carbono, luz y vida', CIENCIA HOY, 27: 41-55, 1994). Sin embargo, la exposición a niveles altos de radiación solar, en particular de radiación ultravioleta, tiene efectos perjudiciales sobre la mayoría de los seres vivos (ver el recuadro 'Luz: ondas y partículas').

Apenas unas décadas atrás se consideraba que la radiación ultravioleta carecía de importancia como factor ambiental en los ecosistemas acuáticos, ya que se suponía que se absorbía totalmente en los primeros centímetros de la columna de agua. El descubrimiento del 'agujero de ozono' sobre la Antártida estimuló el desarrollo de mejo-

res instrumentos de medición, algunos de ellos capaces de funcionar debajo del agua. Gracias a ellos hoy se sabe que la penetración de la radiación ultravioleta es mucho mayor, y que sus efectos biológicos resultan observables hasta decenas de metros de profundidad.

El ozono es uno de los factores que determinan la intensidad de la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra (ver 'Radiación ultravioleta y ozono atmosférico', CIENCIA HOY, 9: 40-48, 1990) pero, una vez que ella ha penetrado en el agua, su atenuación depende fundamentalmente de la concentración de materia orgánica disuelta y de la cantidad de microorganismos presentes.

El hombre ha causado cambios sustanciales en el medio ambiente. La producción de clorofluorocarbonos ha resultado en una disminución de la concentración de ozono estratosférico, mientras que el aumento del efecto invernadero está alterando el balance de materia orgánica disuelta en los lagos (véanse el recuadro 'Ozono estratosférico y tro-

¿DE QUÉ SE TRATA?

Recién en los últimos años comenzamos a comprender algunos de los complejos procesos físicos, químicos y biológicos involucrados en la interacción de la radiación ultravioleta con el medio acuático. A partir de ese conocimiento será posible evaluar con mayor certeza la vulnerabilidad de los ecosistemas y proponer acciones para disminuir el impacto que tienen las actividades del hombre sobre las barreras naturales a la radiación ultravioleta.

posférico' y el artículo 'Los clorofluorcarbonos y el ozono estratosférico: un problema global', CIENCIA HOY, 36: 51-61, 1996). Es decir que se puede prever un aumento de la radiación ultravioleta en el medio acuático a mediano y largo plazo. Esto podría afectar las cadenas alimentarias de algunos ecosistemas lacustres y marinos, y perjudicar, por ejemplo, la producción pesquera.

Otros factores, además del ozono estratosférico, condicionan la intensidad —o irradiancia— y la calidad —es decir, la composición espectral— de la radiación que llega a la superficie de la Tierra (ver el recuadro 'Factores que afectan la intensidad de la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre'). Algunos de estos factores resultan sumamente variables y difíciles de cuantificar, por ejemplo, la nubosidad o el nivel y tipo de polución ambiental en áreas urbanas. Por este motivo, las estimaciones satelitales del nivel de ozono solo brindan una idea aproximada de la intensidad de la radiación que alcanza la superficie terrestre. Resulta imprescindible complementar las estimaciones satelitales con mediciones locales que se integren en redes de monitoreo. La Argentina ha sido precursora

en la instalación de este tipo de estaciones de medición y desde 1994 se encuentra en funcionamiento la primera red latitudinal de monitoreo de radiación ultravioleta y visible de América Latina, con estaciones en Ushuaia (Tierra del Fuego), Playa Unión (Chubut), Buenos Aires y Huaico Hondo (Jujuy), a las cuales se sumará próximamente San Carlos de Bariloche (Río Negro).

La atenuación de la radiación ultravioleta en el medio acuático es el resultado de la combinación de los procesos físicos de absorción y dispersión. Un fotón que ha sido dispersado continúa libre para seguir interactuando con el medio hasta ser definitivamente absorbido por el agua, otras sustancias en solución, o partículas u organismos en suspensión.

La proporción de fotones absorbidos por cada metro de agua es constante. Por ejemplo, si en el primer metro la radiación se reduce del 100% al 10%, en el segundo metro se reducirá del 10% al 1%. Por lo tanto, cuando se grafican los datos de radiación versus profundidad en una escala semilogarítmica se obtiene una línea recta, cuya pendiente representa el coeficiente de atenuación para la longitud de

onda considerada. En la figura 1 se muestra la atenuación de la radiación ultravioleta para distintos tipos de agua. En esa figura se observa que la penetración de la radiación ultravioleta es mucho mayor en los lagos de alta montaña y en el océano abierto que en lagos de planicie o en las zonas marinas costeras, las cuales poseen un mayor contenido de materia orgánica disuelta.

Los efectos de la radiación ultravioleta sobre los organismos vivos dependen tanto de la irradiancia como del tiempo de exposición. La radiación recibida por organismos sésiles —fijos a un soporte o sustrato— puede calcularse con bastante precisión a partir del coeficiente de atenuación del agua y mediciones de la irradiancia en superficie. En el caso de organismos móviles, como el plancton, los cálculos de la radiación recibida son mucho más complicados ya que estos organismos están expuestos a intensidades de radiación fluctuantes. En el medio marino, la posición del fitoplancton —o sea, la comunidad integrada por microalgas— dentro de la columna de agua está determinada por las características físicas de la masa de agua. Como el fitoplancton se desplaza dentro de la denominada *capa superficial de*

mezcla, está expuesto a una variación continua de radiación. Recordemos que esta capa es la parte superior de un cuerpo de agua, y que se halla expuesta a la acción del viento y las olas. La 'mezcla' que se produce origina una capa de agua homogénea en cuanto a temperatura y salinidad y, por consecuencia, su densidad también es uniforme.

Para caracterizar las fluctuaciones de radiación a las que se ven expuestos los organismos planctónicos, debemos conocer su amplitud, determinada por la profundidad de la capa superficial de mezcla, y su frecuencia, determinada por la velocidad dentro de ella. Ambos parámetros, amplitud y frecuencia, varían de un lugar a otro y dependen además de ciertas condiciones meteorológicas, por ejemplo, la velocidad del viento. En zonas polares, como consecuencia de los fuertes vientos dominantes, la capa superficial de mezcla alcanza un espesor de alrededor de 100 metros de profundidad, mientras que en las zonas tropicales su espesor varía entre 10 y 30 metros.

Para estudiar los efectos de la radiación solar sobre el plancton, nuestro grupo ha realizado varios experimentos simulando el movimiento de los organismos inducido

LUZ: ONDAS Y PARTÍCULAS

Lo que habitualmente conocemos por luz no es otra cosa que radiación electromagnética. La fuente más importante de esta radiación es el movimiento acelerado de los electrones que forman parte de los átomos. La luz visible constituye una pequeña porción de la amplia familia de ondas electromagnéticas (figura I); otras formas que también nos resultan familiares son, por ejemplo, las ondas de radio, las microondas, los rayos X y la radiación ultravioleta. Los diferentes nombres que les damos solo son producto de una clasificación histórica, ya que solamente se diferencian en la *longitud de onda y frecuencia* (figura II). Sin embargo, esta diferencia es crucial a la hora de establecer sus propiedades, en particular, las que tienen que ver con la emisión y absorción de la radiación electromagnética.

Las ondas electromagnéticas transportan energía; cuando inciden sobre la materia, dicha energía se transmite a los átomos. Para comprender cómo estas se absorben y emiten luz, la descripción ondulatoria de la luz no es suficiente. Una descripción en términos de partículas —o fotones— resulta mucho más apropiada en este caso. Los fotones son paquetes de energía electromagnética, absorbidos o emitidos

por los átomos en cantidades discretas. La energía que lleva uno de esos fotones depende de la frecuencia de la radiación electromagnética en cuestión: a mayor frecuencia, mayor energía por fotón.

Podemos considerar que los electrones se encuentran orbitando los núcleos atómicos en órbitas fijas. Cuando un átomo absorbe un fotón, uno de sus electrones cambia de órbita (decimos que el átomo se *excita*); para que esto suceda la energía del fotón debe coincidir con la energía necesaria para que el electrón cambie de órbita. Luego de ser absorbido, el fotón puede ser reemitido, el electrón involucrado vuelve a su órbita original y el átomo abandona el estado excitado. Sin embargo, si durante el tiempo en que el átomo está excitado se produce una colisión con un átomo vecino, la energía puede transferirse como movimiento, y el átomo puede abandonar el estado excitado sin emitir. En este caso, el fotón se habrá absorbido definitivamente, cediendo su energía. Los fotones de la radiación ultravioleta poseen suficiente energía como para excitar a la mayoría de los átomos, y aun arrancarles electrones —*ionizarlos*— en ciertos casos. Radiaciones más energéticas, como los rayos X y gamma, provocan la expulsión

de gran cantidad de electrones del medio que atraviesen. Es esta propiedad la que las hace tan peligrosas para los seres vivos. Cuando un átomo reemite la radiación electromagnética que ha incidido sobre él, habitualmente no lo hace en la misma dirección de la radiación incidente, sino que emite luz en múltiples direcciones. Este fenómeno se conoce como *dispersión de Rayleigh*. Las moléculas de oxígeno y nitrógeno, que constituyen la mayor parte de la atmósfera, dispersan de este modo la radiación solar. Como la magnitud de la dispersión de Rayleigh es inversamente proporcional a la longitud de onda de la

radiación, la dispersión de la radiación ultravioleta es mayor que la visible. Dentro de esta última, los componentes violeta y azul son los que más se dispersan, mientras que los colores rojos son los menos afectados por el fenómeno. Esa es la razón de la apariencia azul del cielo; lo que vemos no es otra cosa que luz reemitida por los átomos de oxígeno y nitrógeno excitados a su vez por la luz directa del Sol. Por la misma razón, la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra es, en una proporción importante, radiación difusa proveniente, no del disco solar en forma directa, sino del resto del cielo.

Figura I. El espectro electromagnético es una gama continua de ondas que abarca desde las ondas de radio hasta los rayos gamma.

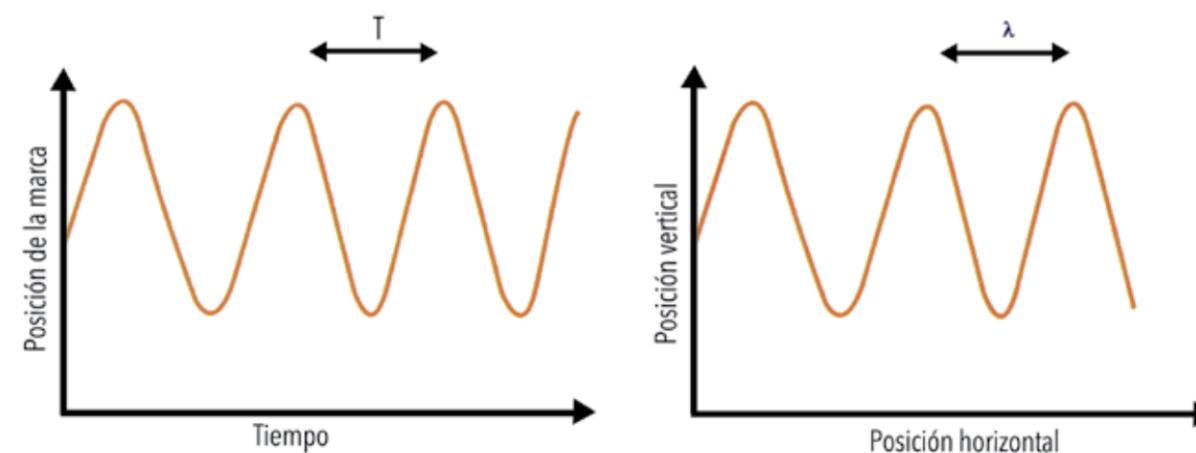
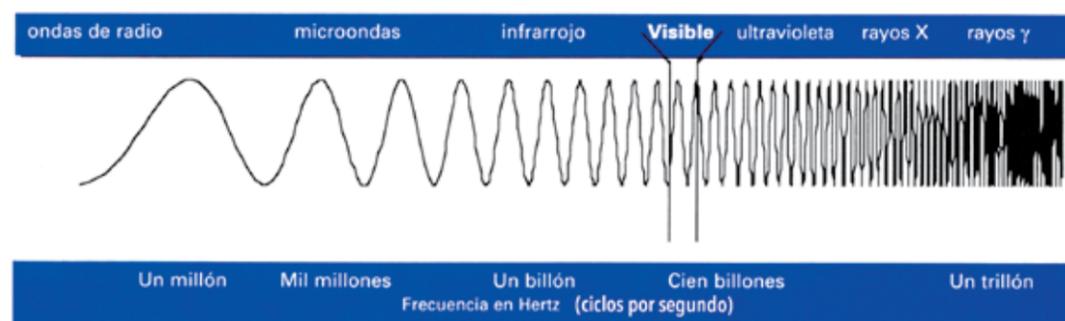


Figura II. Podemos imaginar una onda como oscilación en el tiempo y en el espacio. Si observamos el movimiento que realiza, por ejemplo, una marca en una cuerda que hacemos oscilar, veremos que esta sube y baja. Si representamos ese movimiento en un gráfico, obtendremos algo similar al gráfico de la izquierda. El tiempo que transcurre para que la marca vuelva a la misma posición es el período; la inversa del período es la frecuencia. Si, en cambio, le sacamos una fotografía a la cuerda en un determinado instante, lo que observaremos es algo similar al gráfico de la derecha. La distancia entre las crestas consecutivas es lo que denominamos *longitud de onda*. Para cualquier onda, se cumple que a mayor frecuencia, menor longitud de onda.

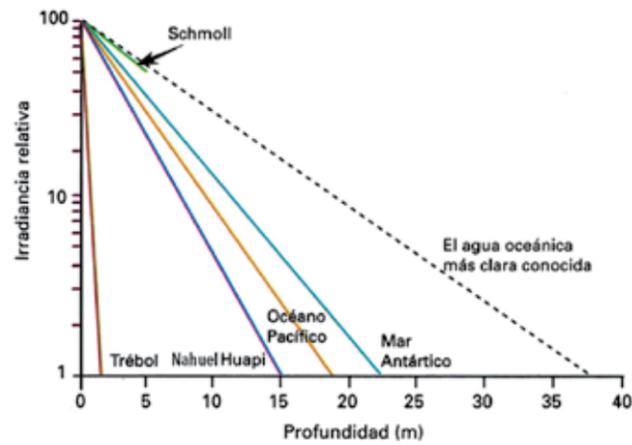


Figura 1. Atenuación de la radiación ultravioleta ($\lambda = 305\text{nm}$) para diferentes lagos de la zona de Bariloche y su comparación con mares costeros (océano Pacífico, Mar Antártico) y con el océano abierto. La intersección de las líneas con el eje horizontal indica la profundidad a la cual llega el 1% de la radiación incidente en la superficie. La línea correspondiente al lago Schmoll se corta a causa de que su profundidad es solo de cinco metros.

por la circulación de agua en un lago poco profundo. Los resultados indicaron que la cantidad de radiación a la que están expuestos los organismos móviles es muy superior a la que recibirían si permanecieran fijos a una profundidad media comparable.

Hemos convivido desde siempre con la radiación ultravioleta; más aún, se considera que ella ha jugado un papel fundamental en el origen de la vida en nuestro planeta.

— OZONO ESTRATOSFÉRICO Y TROPOSFÉRICO —

La capa de atmósfera más cercana a la superficie se llama *troposfera* y tiene un espesor de unos 10km. En la troposfera la temperatura disminuye con la altura hasta los -70°C . Luego sigue otra capa de unos 10km dentro de la cual la temperatura se mantiene más o menos constante. Por ese motivo se la denomina *tropopausa*. Por encima de esta y hasta los 50km de altura se extiende la *estratosfera*. La circulación entre la troposfera y la estratosfera está relativamente restringida por la tropopausa, que actúa como una barrera.

El *ozono estratosférico* se forma principalmente en la región ecuatorial de la estratosfera, desde donde luego se distribuye al resto de ella. Este proceso ocurre en forma natural.

Las principales fuentes del ozono troposférico son el ozono estratosférico transportado hacia abajo por movimientos atmosféricos que consiguen atravesar la tropopausa, como la *convección tropical* o *frentes* en latitudes medias, y la fotodisociación natural y antropogénica de dióxido de nitrógeno, por radiación ultravioleta, que tiene lugar en la troposfera. Muchas de estas reacciones involucran la fotooxidación de productos químicos, como monóxido de carbono, metano y otros hidrocarburos. Por este motivo, la producción de ozono troposférico aumenta en áreas densamente pobladas e industrializadas, donde la concentración de estos contaminantes es mayor.

A pesar de que esta radiación es necesaria para la síntesis de vitamina D y de que algunas algas pueden utilizar una porción del espectro ultravioleta en el proceso de fotosíntesis, la radiación ultravioleta afecta las complejas moléculas orgánicas de los seres vivos, debido a su elevada energía. Sus efectos son variados y dependen de la sensibilidad de cada especie. La radiación ultravioleta puede inhibir la fotosíntesis en muchas algas (induciendo simultáneamente una disminución de la cantidad de pigmentos fotosintéticos en las células), influye sobre la velocidad de crecimiento de los organismos, provoca alteraciones en las moléculas de ácido desoxirribonucleico —el ADN—, daña las membranas celulares y, además, afecta la capacidad de locomoción u orientación en los *ciliados* y *dinoflagelados* —organismos planctónicos que poseen un flagelo transversal y otro longitudinal—. Finalmente, y como resultado de todas las alteraciones mencionadas, una exposición prolongada a la radiación ultravioleta puede resultar en un incremento de la mortalidad de organismos muy sensibles.

La radiación ultravioleta puede provocar reacciones fotoquímicas que alteran la composición del medio e indirectamente afectan a los organismos. Esta radiación es la responsable de la formación de especies químicas altamente reactivas, como el peróxido de hidrógeno o agua oxigenada (H_2O_2), radicales hidroxilos (HO^{\cdot}), superóxidos (O_2^{\cdot}), etcétera, que provocan daños en la estructura de las células y alteraciones de la fisiología celular (ver 'Antioxidante de origen vegetal', CIENCIA HOY, 44: 32-41, 1998).

Existe otro conjunto de reacciones fotoquímicas que produce modificaciones en la materia orgánica disuelta en los lagos, la cual proviene del ambiente terrestre circundante. Antes de llegar al agua, la materia orgánica ha estado expuesta a la actividad de los microorganismos del suelo. Puesto que las moléculas más pequeñas y lábiles son más susceptibles al ataque microbiano, la materia que finalmente llega al lago —denominada *sustancia amarilla*— está compuesta por moléculas relativamente grandes que resultan muy resistentes al ataque microbiano. Sin embargo, gracias a la acción de la radiación ultravioleta, la sustancia amarilla puede escindirse en moléculas de menor tamaño y, de esta forma, convertirse en un material aprovechable por bacterias y otros microorganismos. Este proceso produce una progresiva decoloración del agua del lago, lo cual constituye un interesante ejemplo de retroalimentación positiva: la radiación ultravioleta provoca la decoloración del agua, lo que a su vez se traduce en su mayor capacidad de penetración en la columna de agua (figura 2).

Otra consecuencia importante de la fotooxidación de la materia orgánica es la liberación de algunos elementos contenidos en la sustancia amarilla. En algunos casos, esta liberación tiene efectos positivos, ya que aumenta la disponibilidad de ciertos nutrientes esenciales, como el hierro; pero en otros casos puede resultar perjudicial, como cuando se liberan metales que resultan tóxicos aun en concentraciones extremadamente bajas.

Independientemente del aumento de irradiancia en superficie, provocado por la disminución de ozono estratosférico, cualquier factor que disminuya la concentración de materia orgánica provocará un aumento de la transparencia del agua que redundará en una mayor exposición de los organismos a la radiación ultravioleta. Un estudio reciente realizado en varios lagos canadienses ha demostrado que el aumento tanto de la acidez como de la temperatura del agua puede disminuir la concentración de materia orgánica disuelta. Ambas variables son perturbadas por el desarrollo de la sociedad; el aumento de acidez está directamente relacionado con la lluvia ácida que afecta la mayor parte de las regiones templadas del hemisferio norte (ver 'Lluvia ácida', CIENCIA HOY, 9: 34-39, 1990), mientras que los cambios de temperatura están relacionados con el aumento del efecto invernadero. Se ha hallado que un aumento en la acidez del agua provoca la precipitación de la materia orgánica, mientras que la relación entre esta y la temperatura no es tan directa. En el estudio que relatamos, el aumento de temperatura estuvo acompañado por una disminución de las precipitaciones en el área, lo cual se tradujo en una menor *escorrentía*, o sea que disminuyó el drenaje del agua desde la cuenca terrestre hacia los cuerpos de agua. El resultado neto fue una disminución del transporte de materia orgánica hacia los lagos.

Los seres vivos hemos desarrollado una serie de mecanismos para acotar los efectos negativos de la radiación solar. El más obvio consiste en evitar o minimizar la exposición a la radiación solar tanto como sea posible. Una persona puede permanecer en el interior de su hogar o a la sombra de un árbol; de la misma manera, los organismos acuáticos pueden buscar refugio en la profundidad del agua. Sin embargo, no siempre es posible, ni conveniente, evitar la exposición al sol. El caso más evidente es el de las algas planctónicas, que utilizan la luz del sol para sintetizar moléculas orgánicas a través del proceso de fotosíntesis. Si bien las algas utilizan longitudes de onda dentro del espectro visible, su dependencia de la radiación solar las obliga a exponerse a la radiación ultravioleta. Las especies típicas de ambientes muy expuestos suelen estar mejor adaptadas a altos niveles de radiación. Por ejemplo, las especies tropicales son mucho más resistentes que las especies de las zonas polares, ya que en los trópicos no solo es mayor la irradiancia en la superficie sino que, como ya se mencionó, la capa superficial de mezcla es menos profunda.

Aun cuando la exposición a la radiación ultravioleta sea inevitable, a veces es posible minimizar sus consecuencias. Los seres humanos nos cubrimos con ropa y utilizamos cremas o filtros solares. Además, el bronceado nos protege, ya que nuestro organismo ha respondido aumentando la producción de melanina, la cual absorbe gran parte de la radiación solar y evita que esta alcance tejidos más sensibles. Muchos organismos acuáticos son capaces de producir compuestos que tienen alguna función protectora, como es el caso de las pulgas de agua, que también generan melanina. Otros ejem-

plos de moléculas protectoras son los carotenos, presentes en *copépodos* —pequeños crustáceos—, que actúan como antioxidantes, y un grupo de sustancias conocido como MAA (por *mycosporine like aminoacids*). Los MAA constituyen una familia de compuestos que tienen un ciclohexeno unido a un grupo aminoácido o aminoalcohol; son solubles en agua y tienen un máximo de absorción entre 310 y 360nm.

Los carotenos y los MAA son producidos exclusivamente por algas y cianobacterias. Pueden ser sintetizados a gran velocidad por ciertas especies, dependiendo, en la mayoría de los casos, de la cantidad y calidad de radiación recibida anteriormente, es decir, de su historia lumínica. Los organismos que no son capaces de sintetizar sus propios compuestos protectores pueden incorporarlos a través de la dieta. Por ejemplo, los erizos de mar acumulan MAA en sus gónadas y posteriormente los transfieren a sus larvas. Se ha observado que las larvas de erizos de mar cuya dieta es pobre en MAA son más sensibles a la radiación ultravioleta. Además, algunos organismos desarrollan una 'protección externa' —una cubierta calcárea o de celulosa, en ciertos casos— que ayuda a dispersar la radiación.

A veces no es posible evitar la exposición a la radiación solar, ni resulta posible disminuir el daño provocado por la exposición. En este caso todavía queda la posibilidad de reparar el daño producido. Algunos tejidos o estructuras celulares dañadas —por ejemplo, la epidermis, las membranas y los cloroplastos— pueden ser reemplazados, y las alteraciones causadas en el ADN pueden ser corregidas por enzimas especializadas.

Una de las lesiones más frecuentes que la radiación ultravioleta produce en el ADN es la formación de dímeros entre dos pirimidinas adyacentes (para consultar la estructura del ADN, véase 'ADN: una molécula maravillosa', CIENCIA HOY, 8: 26-35, 1990). Esta lesión puede ser reparada mediante un proceso llamado *fotorreactivación*, debido a que se requiere la presencia de luz. En el proceso interviene la

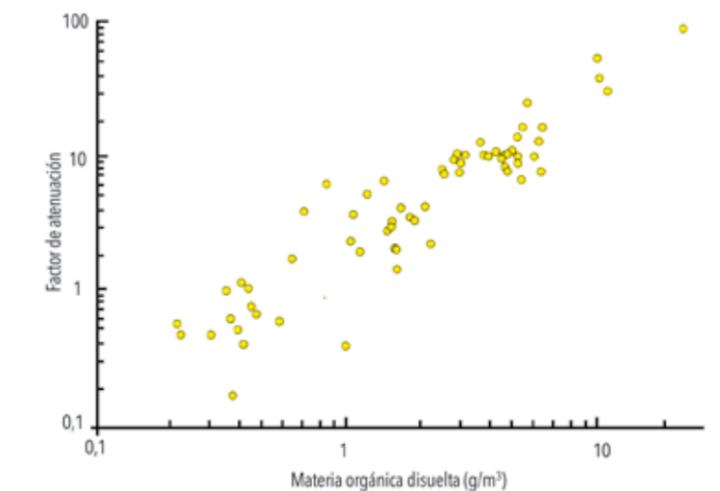
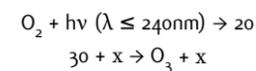


Figura 2. Atenuación de la radiación ultravioleta ($\lambda = 305\text{nm}$) en función de la concentración de materia orgánica disuelta en distintos lagos de la región andino-patagónica argentina y de América del Norte.

FACTORES QUE AFECTAN LA INTENSIDAD DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA QUE LLEGA A LA SUPERFICIE TERRESTRE

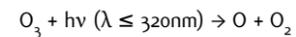
- La intensidad de radiación ultravioleta producida por el Sol tiene leves variaciones, asociadas a su período de rotación aparente —27 días—, al ciclo de manchas solares —11 años— y a la aparición de protuberancias y explosiones en la fotosfera. Estas fluctuaciones afectan sobre todo los componentes más energéticos del espectro, que no llegan a la superficie terrestre. Sin embargo, pueden afectar el ciclo de producción y destrucción de ozono en la alta atmósfera, y en consecuencia, la transmisión atmosférica de otras porciones del espectro ultravioleta.
- Otro factor que determina la cantidad de esta radiación que llega a nuestro planeta es la distancia entre la Tierra y el Sol, la cual, debido a la forma elíptica de la órbita terrestre, oscila un 3,4% a lo largo del año. Como la atenuación de la radiación es cuadrática con esta distancia, el resultado es una variación de alrededor del 7% en la intensidad de radiación ultravioleta extraterrestre, y es máxima en diciembre, al comienzo del verano austral.
- Se denomina *ángulo cenital* al que forma la dirección aparente del Sol con la vertical local. Este ángulo depende a su vez de la hora del día, la estación y la latitud del sitio. La influencia de este factor tiene dos aspectos, uno de ellos puramente geométrico, ya que el flujo de radiación que atraviesa una superficie cualquier varía con la orientación de la superficie. Si esta es paralela a la dirección de incidencia, el flujo de radiación es cero, mientras que si es perpendicular, resulta máximo. Además de este efecto, el aumento del ángulo cenital implica que la radiación tiene que atravesar una capa atmosférica más gruesa, y por consiguiente su atenuación será mayor.
- Dentro de los factores atmosféricos, el más conocido es la atenuación que produce la capa de ozono (ver 'Radiación ultravioleta y ozono atmosférico', CIENCIA HOY, 9: 40-48, 1990). Podemos dividir este fenómeno en dos fases; en la primera, una molécula de oxígeno absorbe radiación $-h\nu$ representa un fotón— de longitud de onda (λ) menor de 240nm y se disocia. Este *oxígeno atómico*, con ayuda de alguna otra molécula, forma ozono (O_3):



enzima fotoliasa, la cual se une a los dímeros de pirimidina en una reacción independiente de la luz. Luego se requiere un fotón cuya longitud de onda esté comprendida entre 300 y 500nm para que la enzima pueda donar un electrón al dímero. Esto último inicia una reorganización electrónica que finalmente restablece las dos pirimidinas intactas.

En este caso se observa que el daño producido por la radiación ultravioleta es mucho mayor cuando los orga-

La segunda parte consiste en la disociación del ozono mediante la absorción de más radiación ultravioleta, pero esta vez de longitud de onda más larga:



La porción del espectro que comprenden longitudes de onda entre 240 y 320nm no se absorbe uniformemente, por lo que algo de radiación ultravioleta de $\lambda > 290\text{nm}$ llega a la superficie terrestre. Esta banda es justamente la más seriamente afectada por la disminución de las concentraciones de ozono estratosférico.

- La atenuación de la radiación solar no solo se produce por absorción sino también por la denominada dispersión de Rayleigh. En el fenómeno de dispersión, el fotón involucrado no desaparece sino que es desviado en su dirección de propagación (ver el recuadro 'Luz: ondas y partículas'). La distribución angular de la radiación dispersada es simétrica, lo que implica que la probabilidad de que la luz sea dispersada en alguna dirección 'hacia arriba' es equivalente a la de ser dispersada en alguna dirección 'hacia abajo'. Para la porción ultravioleta del espectro, la dispersión de Rayleigh resulta importante hasta el punto de que más del 40% de la irradiancia de 300nm que llega a la superficie terrestre no proviene directamente del disco solar —*radiación directa*— sino del resto del cielo —*radiación difusa*—.
- La fracción del cielo cubierto y el tipo de nubes afectan la *intensidad* y la *composición espectral* de la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre. Este efecto es debido principalmente a la reflexión de la radiación ultravioleta por las gotas de agua o cristales de hielo que forman la nube. No siempre el efecto neto es la disminución de la irradiancia; en ocasiones, las nubes cubren gran parte del cielo, pero no ocultan el disco solar. En estas circunstancias, la radiación solar reflejada por la superficie terrestre hacia arriba es reflejada a su vez por las nubes nuevamente hacia la Tierra, por lo que así aumenta el nivel de irradiancia en la superficie.
- En áreas urbanas se producen concentraciones importantes de gases contaminantes a nivel de la atmósfera baja, entre ellos: ozono troposférico, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, que absorben radiación ultravioleta. El aumento de concentración de estos gases lleva a una disminución de la intensidad de radiación ultravioleta en las áreas urbanas, a pesar del debilitamiento de la capa de ozono estratosférico.

nismos son irradiados exclusivamente con ella que cuando se los irradia simultáneamente con luz visible, como ocurre en la naturaleza. Aunque la fotoliasa está presente en la mayoría de los organismos acuáticos, incluyendo bacterias, algas, crustáceos y peces, en algunas especies no se observa fotorreactivación. En nuestros estudios con copépodos del género *Boeckella* hemos observado fotorreactivación en dos especies y ausencia en una tercera. Esta es-

pecie es muy sensible a la radiación ultravioleta, por lo que debe permanecer debajo de los 10 metros de profundidad en los lagos más transparentes. Otros organismos que no poseen mecanismos de fotorreactivación, como los virus y ciertas cepas mutantes de *Escherichia coli* —una de las bacterias que viven en nuestro intestino—, resultan muy útiles como dosímetros biológicos, ya que el daño observado en ellos es exclusivamente función de la dosis de radiación ultravioleta acumulada. Otro mecanismo de reparación del daño es el de escisión y reparación que se observa, por ejemplo, en algunos organismos planctónicos y ciertas especies de peces. Este mecanismo involucra un proceso de reconocimiento del daño, escisión y resíntesis del ADN en el sitio dañado con ayuda de la enzima ADN-polimerasa.

A pesar de esta batería de recursos, cuando el nivel de exposición a la radiación ultravioleta es grande, los mecanismos de reparación se ven desbordados: el daño se acumula y eventualmente sobreviene la muerte. Esto explica el hecho de que solo unas pocas especies altamente especializadas pueden habitar en lagos transparentes de alta montaña, que normalmente reciben niveles de radiación muy altos.

Las respuestas de los organismos a los cambios ambientales raramente son instantáneas. En muchos casos, dichos organismos son inicialmente vulnerables a la radiación ultravioleta, pero a lo largo de exposiciones sucesivas adquieren una mayor resistencia, es decir que se produce su *aclimatación*. Por ejemplo, la producción de algunos pigmentos fotoprotectores es gradual y depende de las condiciones de la exposición previa del organismo a la radiación. A medida que aumenta la presencia de estos pigmentos, los organismos se vuelven progresivamente más resistentes. En otros casos ocurre lo contrario, ya que existe un proceso de *sensibilización*. Al comienzo no se observa ningún daño aparente, pero si las condiciones de irradiación continúan, se observa cada vez un daño mayor. Es imprescindible tener en cuenta los procesos de aclimatación y sensibilización, particularmente en experimentos de corto plazo —menos de un día—, para no cometer groseros errores de interpretación.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es el tiempo de respuesta de los distintos procesos desencadenados por la exposición a la radiación ultravioleta. Por ejemplo, el daño de la molécula de ADN se produce en una fracción de segundo, pero el proceso de reparación insume minutos, y la producción de compuestos fotoprotectores demanda horas e incluso días. Cuando se estudian los efectos sobre poblaciones o sobre toda la comunidad, la escala de tiempo considerada debe ser aun mayor. Observar cambios en la tasa de crecimiento, la estructura de edades o la composición de especies puede demorar días o incluso varias semanas.

Durante la mayor parte de la historia, los cambios ocasionados por el hombre han tenido una dimensión relativamente local, o bien han sido graduales. En los últimos 150 años los efectos del desarrollo han adquirido una dimensión global y la velocidad de los cambios se ha acelerado enormemente. Al mismo tiempo, nuestra capacidad para recolectar y procesar información nos permite apreciar la magnitud de los cambios ambientales casi al mismo tiempo en que estos se producen.

El aumento de los gases responsables del efecto invernadero y de la disminución de la concentración de ozono estratosférico hace sentir sus efectos en regiones completamente alejadas de las zonas donde fueron librados. Es probable que la disminución de la capa de ozono, como también el calentamiento global, se traduzcan en un aumento de la radiación ultravioleta que llega a los ecosistemas acuáticos. Existen distintos mecanismos que la naturaleza puede utilizar para contrarrestar sus efectos negativos, aunque el menú de opciones disponibles varía de una especie a otra. Las diferencias entre especies pueden resultar en el reemplazo de unas por otras. Lo que hemos aprendido en los últimos veinte años nos permite ser más optimistas con respecto a la posibilidad de que se produzcan cambios catastróficos o colapsos en los ecosistemas acuáticos en el futuro inmediato, pero la capacidad de adaptación de los ecosistemas no puede de ningún modo confundirse con invulnerabilidad. 

LECTURAS SUGERIDAS

BIGGS RH & JOYNER MEB, 1994, 'Stratospheric Ozone Depletion / UV-B Radiation in the Biosphere', *NATO ASI Series*, vol. 18, Springer-Verlag, Berlín.

WEILER CS & PENHALE PA, 1994, 'Ultraviolet Radiation in Antarctica: Measurements and Biological Effects', *Antarctic Research Series*, vol. 64. American Geophysical Union, Washington DC.

WILLIAMSON CE & ZAGARESE HE, 1994, 'Impact of UV-B Radiation on Pelagic Freshwater Ecosystems', *Archiv fuer Hydrobiologie*, vol. 43, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

YOUNG AR, BJOERN LO, MOAN J & NULTSCH L, 1993, *Environmental UV Photobiology*, Plenum Press, Nueva York.