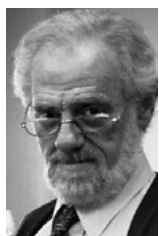


El adelgazamiento de la capa de ozono: ¿cómo prevenir los efectos adversos?



Por Ernesto de Titto

El desequilibrio y sus consecuencias para la salud humana. Los seres vivos y los mecanismos para acotar los efectos negativos de la radiación solar.

¿Es posible recuperar la capa de ozono?

La Tierra está rodeada por una envoltura gaseosa de aproximadamente 100 Km de altura (ver figura 1) compuesta por varios elementos, pero mayoritariamente por oxígeno en un 21% y nitrógeno en un 78%. En ella se puede distinguir una capa enriquecida en ozono a la que se denomina **Capa de Ozono** (ver cuadro 1), que es esencial para el desarrollo de la vida en el planeta ya que actúa como un filtro natural de la **radiación ultravioleta (RUV)** emitida por el sol (ver cuadro 2).

En la estratósfera existe un equilibrio natural entre el oxígeno biatómico y el oxígeno triatómico (ozono) que puede ser afectado por la presencia de agentes que catalizando una de las reacciones (ozonogénesis-ozonólisis) promueven el incremento relativo de alguno de los dos productos. Así, en la década de los 70 se demostró que una familia de compuestos llamados clorofluorcar-

bonados (CFCs) que, por su gran estabilidad, carencia de toxicidad y alta volatilidad habían sido incorporados en la década del 40 como sustancias refrigerantes a las heladeras y más tarde como propelentes de los aerosoles y en la manufactura de plásticos, eran sensibles a la radiación UV liberando átomos de cloro, capaces de mediar la disociación del ozono estratosférico. Otras fuentes importantes, aunque no predecibles ni controlables, de cloro son los océanos y la actividad volcánica. Se ha estimado que aproximadamente 1% de las halomoléculas liberadas en la superficie terrestre escapan a la tropósfera baja y, en unos cinco años llegan a la capa de ozono¹.

La presencia de átomos de cloro libres reduce la concentración estratosférica del ozono, efecto que se multiplica porque después de catalizar la ozonólisis el cloro se regenera y por ello cada molécula destruye muchos

* Ernesto De Titto es doctor en Ciencias Químicas. Consultor en Salud Ambiental. Retirado del CONICET (ex-miembro de la carrera del Investigador Científico 1987-2016). Ex director nacional de Determinantes de la Salud e Investigación del Ministerio de Salud de la Nación. Docente de posgrado de la Universidad ISALUD y la Universidad de Buenos Aires. Ha publicado numerosos trabajos de investigación referidos a salud, ambiente, residuos, entre otras cosas.

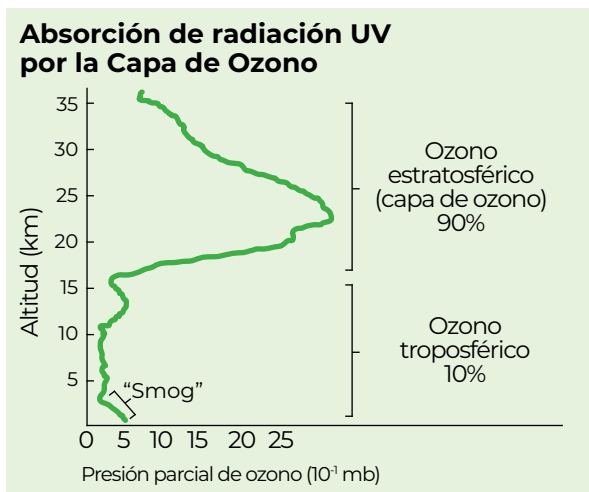
Figura 1. Capas de la atmósfera



Fuente: <https://geologiaweb.com/planeta-tierra/atmosfera-terrestre/>

Cuadro 1
¿Qué es la capa de ozono?

El ozono (oxígeno triatómico) conforma un manto envolvente del planeta de unos 20 Km de espesor en la alta atmósfera (estratósfera) a unos 15-30 Km de la superficie terrestre.



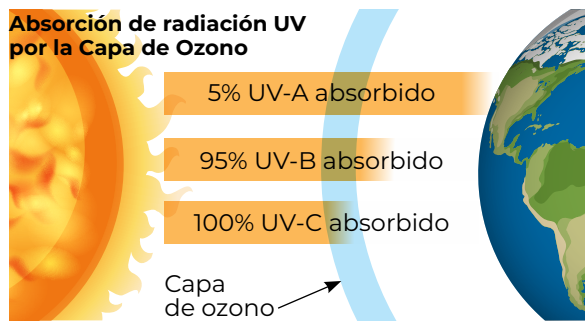
Fuente: Organización Meteorológica Mundial

miles de las de ozono. El mismo efecto producen otros halógenos (flúor y bromo) lo que extendió la categoría de sustancia peligrosa para la capa de ozono a todas las que puedan liberar átomos de halógenos al medio².

Este desequilibrio acarrea serias consecuencias. El pasaje de oxígeno biatómico a ozono absorbe RUV de longitud de onda corta (UV-C o lejana) mientras que el pasaje inverso absorbe RUV de longitud de onda un poco mayor (UV-B o media). El resultado neto de este

Cuadro 2
¿Qué es la radiación UV?

La luz del sol está compuesta por ondas electromagnéticas de un amplio rango de longitudes desde las más pequeñas (ultravioletas-UV), pasando por las visibles al ojo humano (el espectro del arco iris) hasta las más grandes (infrarrojas-IR). La radiación UV abarca el intervalo de longitudes de onda desde los 100 a los 400 nm (nanómetros), y se divide en tres bandas: **UV-C (100-280 nm)**, **UV-B (280-315 nm)** y **UV-A (315-400 nm)**. El ozono, el vapor de agua, el oxígeno y el dióxido de carbono en la atmósfera absorben toda la radiación UV-C, aproximadamente el 90/95 % de la radiación UV-B y una reducida fracción de la radiación UV-A.



ciclo permanente de “ozonogénesis–ozonólisis” es la absorción de prácticamente toda la RUV-C y gran parte de la RUV-B que llega del sol pero que por ello no alcanza a la superficie terrestre. En consecuencia, la destrucción desmedida del ozono estratosférico es crítica ya que desprotege al planeta frente a los efectos nocivos de la RUV.

La disminución de la capa de ozono se acrecienta todos los años sobre la Antártida durante la prima-

vera, por las características especiales de la región, ya que de mayo a septiembre se produce un remolino de viento sobre el Polo Sur que mantiene aislado el aire del interior, que los científicos llaman vórtice. Allí, se forman unas nubes de agua y ácido nítrico que liberan cloro. Con la llegada de la primavera, aumenta la luz solar y las moléculas de cloro se activan destruyendo el ozono dentro del vórtice. A fines de noviembre, los límites se desdibujan, la masa de aire con poco ozono se libera y se forman manchas sobre el continente sudamericano.

Los seres vivos frente al adelgazamiento de la capa de ozono

Desde los años 70, diversos estudios han demostrado que algunos procesos metabólicos de las plantas relacionados con la fotosíntesis u otros directamente vinculados con la actividad génica son afectados por la RUV-B. Además, la morfología de las plantas terrestres es sensible a esta radiación, cuyo incremento inhibe el alargamiento de los tallos y la expansión de la superficie de las hojas^{3,4}.

Más recientemente se ha demostrado que, contra lo que se creía, la RUV penetra profundamente en las columnas de agua y que sus efectos biológicos resultan observables hasta decenas de metros de profundidad (por ejemplo 15 metros en el lago Nahuel Huapi y 23 metros en el Mar Antártico) afectando las cadenas alimentarias de los ecosistemas lacustres y marinos y por ende la fauna acuática y hasta la producción pesquera^{5,6}. En los ecosistemas acuáticos, se suman a la RUV, otras variables que interactúan con ella, tales como el incremento de viento/turbulencia en la capa superficial que afecta la exposición del fitoplancton y la fotodegradación de materia orgánica disuelta, impactando en la productividad primaria y calidad del alimento^{7,8}.

No es sencillo extrapolar el efecto acumulado de los cambios de respuesta de células e individuos a sistemas de mayor complejidad, como son los ecosistemas, pero debe entenderse que ya que las diversas especies tienen diferente capacidad de respuesta o adaptación entonces presentan distin-

ta reacción a los cambios en la RUV y así se afectan las interacciones y el equilibrio competitivo que resulta en variaciones en la biodiversidad y hasta en extinciones⁹.

En síntesis, hemos convivido desde siempre con la RUV; más aún, se considera que ella ha jugado un papel fundamental en el origen de la vida en nuestro planeta. Sin perjuicio de que esta radiación es necesaria para la síntesis de vitamina D y de que algunas algas pueden utilizar una porción del espectro UV en el proceso de fotosíntesis, la RUV afecta las complejas moléculas orgánicas de los seres vivos debido a su elevada energía. Sus efectos son variados y dependen de la irradiancia, del tiempo de exposición y de la sensibilidad de cada especie. Entre ellos deben mencionarse, sin agotar el listado, la inhibición de la fotosíntesis, alteraciones en las moléculas de ADN, daño de las membranas celulares, y la inducción de reacciones fotoquímicas con la formación de especies químicas altamente reactivas que alteran la composición de la materia orgánica.

Los seres vivos hemos desarrollado una serie de mecanismos para acotar los efectos negativos de la radiación solar. El más obvio es evitar o minimizar la exposición a la misma tanto como sea posible. Pero ello no es siempre posible ni conveniente. Así, nos cubrimos, producimos moléculas protectoras como la melanina y los carotenos y/o desarrollamos mecanismos de reparación, como por ejemplo la fotorreactivación que corrige ciertas alteraciones del ADN, que pueden contener algunos efectos nocivos de la RUV¹⁰. Sin embargo, estos mecanismos de reparación pueden ser desbordados y el daño acumularse. No debe olvidarse que la respuesta de los organismos vivos a los cambios ambientales raramente es instantánea: la sensibilización o aclimatación es gradual. Tampoco debe perderse de vista que en este caso no estamos hablando de fenómenos de orden local: la disminución de la concentración de ozono estratosférico, como el aumento de los gases responsables del efecto invernadero, extiende sus efectos a regiones distantes globalizando los perjuicios. Por último, adaptabilidad no es sinónimo de invulnerabilidad.

La salud humana frente al adelgazamiento de la capa de ozono

La Organización Mundial de la Salud (OMS) bajo el patrocinio conjunto de la Comisión Internacional sobre Protección contra las Radiaciones no Ionizantes y del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ha detallado los diversos efectos adversos para la salud resultante de la exposición a la RUV solar (ver cuadro 3)¹¹, y produjeron un índice de fácil interpretación como medida sencilla de la intensidad de la RUV en la superficie terrestre indicadora de su capacidad de producir lesiones cutáneas. Este índice que está detallado en la figura 2 sirve para concientizar y advertir a las personas de la necesidad de adoptar medidas de protección cuando se exponen a la RUV solar, a fin de impulsar cambios en los estilos de vida que frenen la tendencia al aumento de los casos de cáncer de piel^{12, 13}. No debe perderse de vista que algunos de los daños descritos en el cuadro 3 son en función de la dosis total, mientras otros dependen de alcanzar un umbral acumulativo determinado.

Desde el punto de vista biológico debe tenerse en cuenta la complejidad del interjuego de la predisposición individual y el componente ambiental, que excede lo físico-químico para incluir los aspectos psico-sociales y laborales, estilos de vida y la adopción de modelos estéticos y saludables.

Por su posición en el planeta, Argentina está particularmente expuesta a los efectos del adelgazamiento de la capa de ozono, como se muestra en la figura 3. Si bien

Cuadro 3. Impacto sanitario de la exposición a la radiación UV

El sol es la principal fuente de exposición natural a la radiación UV para las personas. Un efecto beneficioso de la exposición a la radiación UV es la que resulta de su mediación en la producción de vitamina D, que participa en el metabolismo óseo y en la protección contra un amplio rango de enfermedades. No está claro si la administración oral de vitamina D puede reemplazar la síntesis natural ya que el impacto de la dosis solar depende de las características personales (tipo de piel, tipo de receptores para vitamina D, la dieta, el sedentarismo, los hábitos de vestimenta) y ambientales (incluyendo la temporada del año, la hora del día, la exposición al sol y la latitud).

Por el contrario, la exposición está asociada con algunos tipos de cáncer de piel, aceleración del envejecimiento de la piel, cataratas (opacidad en el cristalino del ojo) y otras enfermedades oculares como pterigion (crecimiento anormal del color rojo y blanquinoso de la conjuntiva, que invade la córnea), y posiblemente tiene un efecto adverso en la capacidad de las personas para resistir enfermedades infecciosas.

El PNUMA estimó que anualmente ocurren más de 2 millones de casos de cáncer de piel no melanoma y 200 mil melanomas malignos. Hacia 2010 en algunas regiones la incidencia de melanoma en niños y jóvenes había dejado de crecer, o su crecimiento estaba confinado a las formas menos letales, probablemente como resultado de las intensas campañas de difusión de las medidas de protección y por los progresos en la detección temprana. La OMS ha estimado que hay en el mundo 12-15 millones de ciegos por cataratas, de los cuales el 20%, o sea unos 3 millones de casos, pueden ser atribuidos a la exposición a la radiación UV.

Figura 2. Sistema estandarizado de protección ante la radiación UV

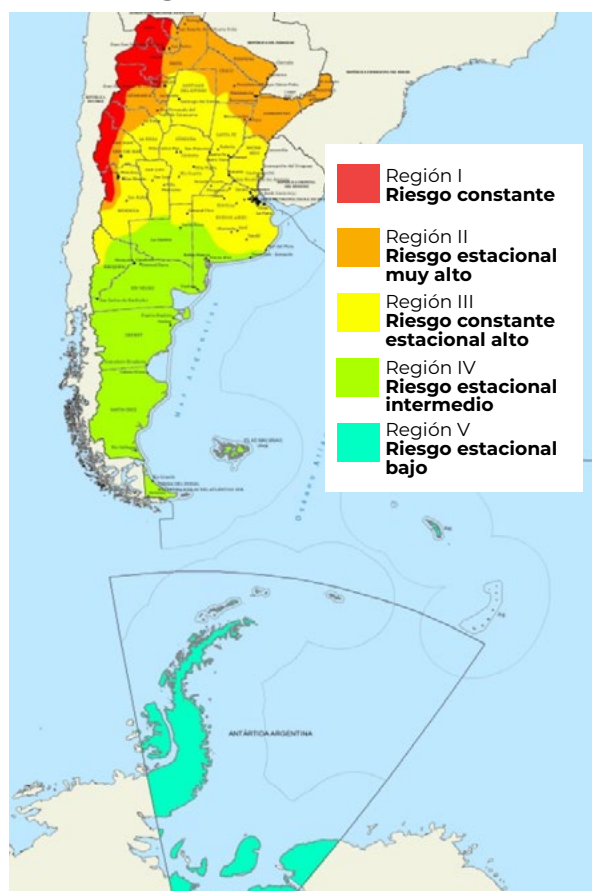


en Argentina no se han efectuado estudios de asociación, los estudios epidemiológicos han demostrado que desde comienzos de la década del 80 se ha producido un aumento creciente de la morbimortalidad por cáncer de piel, mientras que los estudios clínicos revelan los perfiles característicos de pacientes con cáncer de piel¹⁴.

Promoción de la protección frente al adelgazamiento de la capa de ozono

Desde el punto de vista de la salud pública, es especialmente importante proteger a los grupos de pobla-

Figura 3. Mapa de radiación UV en Argentina



ción más vulnerables. Teniendo en cuenta que, según se ha comprobado, más del 90% de los cánceres de piel no melánicos se producen en los fototipos I y II (ver Tabla 1), los mensajes de protección básicos asociados con la RUV deben dirigirse a las personas de piel clara más propensas a las quemaduras. Los niños, particularmente sensibles a la RUV, requieren una protección especial.

Por ello es importante la actividad del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que evalúa permanentemente los niveles de RUV en superficie en 8 estaciones continentales y 1 en la Antártida cubriendo todo el territorio nacional en asociación con la Red SAVERNET^{15, 16}. Esta información puede ser complementada por equipamiento desarrollado por investigadores argentinos del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF) en colaboración con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), para la medición y visualización de la RUV eritémica, es decir aquella que afecta principalmente a la piel de los seres humanos, que permite visualizar el valor de la radiación por medio de luces de colores internacionalmente codificadas (ver cuadro 4), y que ya está instalado en varias localidades (por ejemplo Villa Martelli, la sede del Ministerio de Ciencia en la CABA, Pinamar, Puerto Madryn y San Martín de los Andes).

Conclusiones

La radiación solar sostiene la vida y el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos. Controla procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperíodo, fototropismos), otros factores ambientales (temperatura) y los ciclos de las especies (diarios, anuales, hídricos, etc.) que inciden en su distribución y abundancia. Los cambios en la RUV que llegan a la superficie del planeta afectan la reproducción de los

Tabla 1. Clasificación de tipos de piel (Adaptado de Fitzpatrick y Bolognia, 1995)

	Fototipo cutáneo	Se quema tras la exposición al sol	Se broncea tras la exposición al sol
I	Deficiente en melanina	Siempre	Raramente
II		Habitualmente	Algunas veces
III	Con melanina suficiente	Algunas veces	Habitualmente
IV		Raramente	Siempre
V	Con protección melánica	Piel morena natural	
VI		Piel negra natural	

Comprometidos con el desarrollo
de la industria farmacéutica nacional



*Cámara Industrial de Laboratorios
Farmacéuticos Argentinos*

www.shakespearestudio.com.ar

Av. del Libertador 602 - 6° Piso (C1001ABT) CABA - Argentina
(5411) 4819 9550 / www.cilfa.org.ar

Cuadro 4. Solmáforo Dispositivo indicador en tiempo real del índice de radiación UV en superficie


Investigadores argentinos del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa (CITEDEF) han desarrollado, en colaboración con el Centro de Investigaciones de Láseres y Aplicaciones (CEILAP), la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) y la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), un instrumento (Solmáforo) de medición y visualización de la radiación UV eritemática, es decir aquella que afecta principalmente a la piel de los seres humanos y que permite visualizar la intensidad de la radiación por medio de luces de colores basadas en el índice internacional del 1 al 11 que se presenta en la figura 2.

Trabajo realizado por EA Wolfram, CI Repetto, JC Dworniczak, P Vasquez, MR Paniagua, OJ Vilar, R D'Elia, J Salvador y EJ Quel. Distinguido en INNOVAR 2010 (Mejor Proyecto Terminado de la Categoría Tecnología para el Desarrollo Social) y en la Feria de Proyectos UTN 2010 (3er Mejor Proyecto de Investigación).



organismos vivos acuáticos y terrestres y por ende la diversidad biológica de plantas y animales.

La humanidad ha reaccionado muy rápidamente ante los riesgos asociados a la RUV. El consenso internacional se expresó en el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, firmado en marzo de 1985 tras 8 años de negociación, y al que

con sus varias enmiendas a la fecha han adherido 197 países parte¹⁷. Se espera que la capa de ozono se recupere, muy lentamente, luego de que se establezcan los índices de pérdida de ozono; se reduzca la presencia de CFCs y otros gases contaminantes en el ambiente y, en la última etapa de recuperación, se incremente la cantidad de ozono. 

Referencias

- 1 WHO. (1995) Protection against exposure to UV radiation. WHO/ENG/95.17
- 2 La dilucidación de estos procesos le valieron a M. Molina, S. Rowland y P. Crutzen el Premio Nobel de Química en 1995.
- 3 Ballaré C. (1996) Efectos de la radiación ultravioleta sobre las plantas. *Ciencia Hoy* 36:53.
- 4 Fina J, R Casadevall, H AbdElgawad, E Prinsen, MN Markakis, GTS Beemster, P Casati. (2017) UV-B Inhibits Leaf Growth through Changes in Growth Regulating Factors and Gibberellin Levels. *Plant Physiology* 174(2):1110–26. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00365>
- 5 Zagarese H. (1998) Efecto de la radiación ultravioleta sobre los ecosistemas acuáticos. *Ciencia Hoy* 45:22-29.
- 6 Hernández E, G Ferreyra, L Ruberto, WP Mac Cormack. (2009) The water column as an attenuating factor of the UVR effects on bacteria from a coastal Antarctic marine environment. *Polar Research* 28:390-398.
- 7 Astidas Navarro, M, E Balseiro, B Modenutti. (2011) UV radiation affects simultaneously phototrophy and phagotrophy in a nanoflagellate dominated phytoplankton from an Andean shallow lake. *Photochemical and Photobiological Sciences* 10:1318-1325. DOI: 10.1039/c1pp05010a
- 8 Häder DP, CE Williamson, SA Wängberg, M Rautio, KC Rose, K Gao, EW Helbling, RP Sinha, R Worrest (2015) Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. *Photochemical and Photobiological Sciences* 14:108-126.
- 9 Sala O. (1996) Efectos de la radiación ultravioleta sobre los ecosistemas. *Ciencia Hoy* 36:56.
- 10 Fuentes Lorenzo JL. (2019) Las plantas como fuente de compuestos fotoprotectores frente al daño en el ADN producido por la radiación ultravioleta. *Rev Acad Colomb Cienc Ex Fis Nat* 43(168):550-562. <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.841>
- 11 WHO (1995) Protection against exposure to ultraviolet radiation. Ed. By UNEP-WHO. Doc. WHO/EHG/95.17. Disponible en <https://apps.who.int/iris/handle/10665/58521>
- 12 Actas de la Reunión de las Partes en el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. Ed. por UNEP, 1999.
- 13 Norval M, RM Lucas, AP Cullen, FR de Gruijl, J Longstreth, Y Takizawaf, JC van der Leung. (2010) The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change. Cap. 2 (págs 31-81) en UNEP, Environmental Effects of Ozone Depletion: 2010 Assessment, United Nations Environment Programme. ISBN 92-807-2312-X
- 14 Ver Actas del I Taller sobre Capa de Ozono, Radiación UV y Salud, organizado por el Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación y la Organización Panamericana de la Salud, Ushuaia - Tierra del Fuego, 1996.
- 15 Pazmino A, S Godin-Beekmann, A Hauchecorne, C Claud, S Khaykin, F Goutail, E Wolfram, J Salvador, E Quel. (2018) Multiple symptoms of total ozone recovery inside the Antarctic vortex during austral spring. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 7557-7572. <https://www.atmos-chem-phys.net/18/7557/2018/acp-18-7557-2018.html>
- 16 Orte F, E Wolfram, E Luccini, R D'Elia, A Lusi, J Pallota, F Nollas, F Carmona, S Papandrea, et al. (2022). Saver-Net UV-total solar irradiance monitoring network in Argentina. *Revista Meteorológica, Argentina*, 47(2), e016, julio-diciembre 2022. <http://www.meteorologica.org.ar/wp-content/uploads/2022/09/orte.pdf>
- 17 <https://observatoriopio.cepal.org/es/tratado/convenio-viena-la-proteccion-la-capa-ozono>