



EL APOCALIPSIS DEL OZONO: EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

Abraham Octavio Rodríguez de la Fuente, José Antonio Heredia Rojas,
Omar Heredia Rodríguez, María Esperanza Castañeda Garza, Laura Ernestina Rodríguez Flores.

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Ciencias Exactas y Desarrollo Humano. Autor de correspondencia abraham.rodriguez@uanl.edu.mx

RESUMEN

Nuestro planeta es constantemente bombardeado por una gran diversidad de radiaciones, que incluyen partículas y ondas electromagnéticas de diversas frecuencias, es la llamada radiación cósmica. Esta radiación incluye emisiones ionizantes y no ionizantes. Entre estas últimas, la luz ultravioleta (LUV) tiene una gran importancia dada sus implicaciones biológicas. Por su parte, el planeta tiene una defensa natural contra la radiación cósmica, en especial, la LUV es mayormente retenida por una banda atmosférica llamada "capa de ozono", localizada en la estratósfera terrestre. En los últimos 40 años, se han detectado oscilaciones de la capa de ozono que han puesto en alerta a la comunidad científica, en cuando a las repercusiones que esto puede tener sobre la vida en el planeta. En este artículo, se tratan en forma resumida las consecuencias de la alteración en los niveles de ozono estratosféricos en la diversidad de efectos biológicos dañinos de la LUV; además, en contraparte, se contemplan algunos de los usos benéficos que esta radiación no ionizante tiene.

INTRODUCCIÓN

Se define como radiación, a cualquier tipo de emisión y propagación de energía a través del vacío o de un medio material, en forma de onda electromagnética (luz), o en forma de partículas de naturaleza muy variada. Las radiaciones se dividen en dos grandes grupos: Ionizantes y no ionizantes. Las primeras, se caracterizan por tener una cantidad de energía tal, que son capaces de producir desplazamiento de electrones en los materiales con los cuales interactúa, formando así iones. Por otro lado, las no ionizantes no provocan la aparición de iones en los materiales impactados. Sin embargo, es necesario aclarar que a pesar de no generar ionización, tienen efectos biológicos, aunque por otros mecanismos, mismos que serán descritos a continuación y en particular para un tipo de radiación que hoy en día ha venido a ser una de las más importantes desde el punto de vista de la biofísica de radiaciones, la luz ultravioleta (LUV). Esta radiación no ionizante es un componente primordial de la radiación cósmica que nos llega del sol. En la actualidad, se sabe que ha habido un aumento considerable en los niveles de radiación cósmica que llegan a la superficie terrestre (Guerrero-Abreu y Pérez-Alejo, 2006).

Por otro lado, el planeta Tierra posee una defensa natural a manera de escudo, la así llamada "capa de ozono", que no permite el paso de una buena cantidad de radiación electromagnética, entre ellas la LUV. Sin embargo, en los últimos 25 años se ha notado una disminución, que si bien no ha sido constante, si provoca oscilaciones en la cantidad del ozono presente, lo que a final de cuentas favorece la penetración de la LUV hacia la superficie terrestre (Henriksen et al., 1990).

En el presente artículo, se tratará en forma breve el impacto que ha tenido la reducción de la capa de ozono en la vida, ya que al penetrar mayor cantidad de radiación ultravioleta, se producen también mayores efectos de esta radiación no ionizante en los sistemas biológicos. Por otro lado, se considerarán también los usos benéficos que esta radiación tiene para el ser humano y la vida en general cuando se maneja de forma controlada.



Palabras clave: Radiación, Ozono, Luz ultravioleta, genotoxicidad.
Keywords: Radiation, Ozone, Ultraviolet light, genotoxicity.

LA CAPA DE OZONO

Como anteriormente se mencionó, las variaciones en la capa de ozono de los últimos años han provocado que una cantidad mayor de LUV llegue a la superficie terrestre, sobre todo aquélla de longitud de onda muy corta, y por consecuencia de mayor energía, la catalogada como UVC. Se sabe que toda radiación electromagnética por debajo de 287 nm es retenida por esta capa de ozono, formada de oxígeno tri-atómico (O_3), y que se localiza a 20 Km de altitud en la zona de la estratósfera terrestre. Además del riesgo para la salud que esto implica, debe considerarse el efecto que esta radiación tiene en el fenómeno de calentamiento global, dado que, al llegar a la superficie de la tierra, ésta suele convertirse en radiación de longitud de onda más larga, por ejemplo, del tipo infrarrojo, que son las llamadas ondas de calor (arriba de los 700 nm de longitud de onda) y que aumentan la temperatura global del planeta (Diffey, 2002).

Desde hace aproximadamente 40 años, se ha venido realizado un monitoreo de los niveles de ozono en la estratósfera terrestre, sobre todo por parte del Instituto Max Planck de Alemania. Se ha encontrado una drástica disminución de sus niveles, sobre todo en zonas del planeta como los polos, y más severamente en la parte sur, correspondiente al Antártico. Cabe destacar que en las investigaciones, sobre la reducción de la capa de ozono y sus causas, participó el científico mexicano José Mario Molina Enríquez quien fue corresponsario junto con Paul Crutzen y Frank Sherwood del premio Nobel de Química en 1995, por la dilucidación del papel de los gases clorofluorocarbonos (CFCs) en la destrucción catalítica de la capa de ozono. Los trabajos del mexicano Molina Enríquez y su grupo, concluyeron también que otros contaminantes atmosféricos tales como los óxidos de nitrógeno, cloro y bromo, aparte de los CFCs, tienden a formar compuestos estables con el ozono promoviendo su destrucción, compuestos que pueden llegar a tener una vida media de 50 a 150 años. Los resultados obtenidos sobre el tema, condujeron a la proclamación del llamado "Protocolo de Montreal" de las Naciones Unidas, que en opinión de la comunidad científica experta en el tema, salvó al mundo de una catástrofe ecológica derivada de la gran cantidad de radiación cósmica que potencialmente podría

llegar al planeta sin la presencia de este escudo de ozono (Henriksen, 1990). En la Figura 1, se aprecia una imagen que muestra el espectro de ozono estratosférico, registrada por científicos alemanes, donde claramente se ve el cambio que ha habido en los niveles de este gas desde hace 40 años. Por su parte, la Figura 2 muestra el "agujero de ozono" inicialmente detectado en el hemisferio sur, sobre la Antártida, y que fue evaluado objetivamente por imágenes espectroscópicas del ozono con ayuda del más grande satélite de observación terrestre jamás construido, el Envisat, lanzado el 1° de marzo de 2002 por la Agencia Espacial Europea.

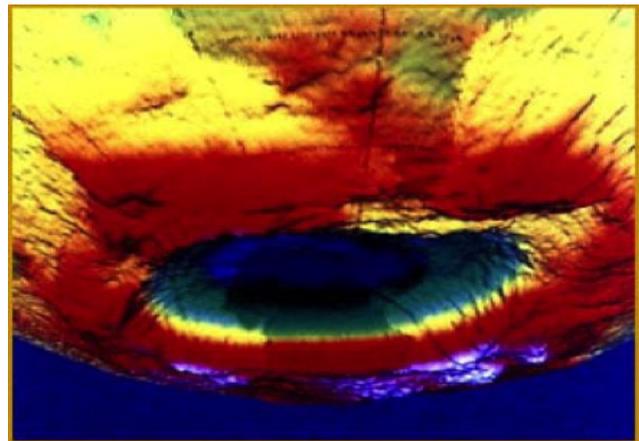
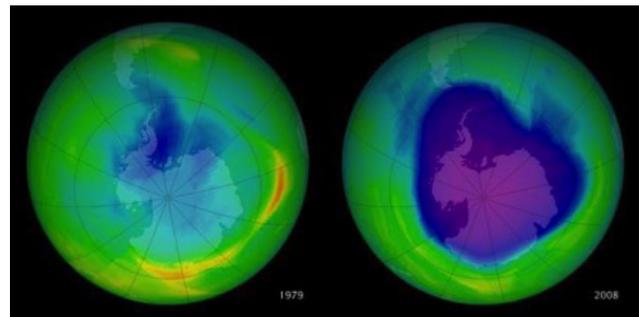


Figura 1. Densidad de ozono en la estratósfera terrestre. Las zonas oscuras, de color azul hacia el morado, representan regiones con muy baja densidad de este gas. Estos datos resultaron de observaciones hechas por el Instituto Max Planck de Alemania, y por el satélite Envisat (Environmental Satellite) de la Agencia Espacial Europea. Durante 10 años este satélite estuvo brindando información sobre los niveles de ozono estratosférico. Se puede fácilmente apreciar la marcada reducción en los niveles de ozono en 40 años de registros.

Figura 2. Imagen que muestra claramente el "agujero de ozono" (color azul oscuro y negro) detectado por el satélite Envisat de la Agencia Espacial Europea. De acuerdo a cálculos estimados, sólo en 2006, se perdieron 40 millones de toneladas de ozono (cifra récord para un año de mediciones).

ASPECTOS FÍSICOS DE LA LUZ ULTRAVIOLETA

La LUV es una onda electromagnética con longitudes de onda entre 400 nm y los 15 nm. Este tipo de radiación no llega a ser visible para el ser humano, ya que el máximo alcance de la visión es hasta el violeta del espectro visible (400 nm). La LUV se puede dividir en tres clases a) radiación UVA tiene longitudes de onda entre 315 nm y 400 nm, b) la radiación UVB rangos de 280-315 nm, y c) UVC tiene longitudes de onda más cortas entre 100 y 280 nm. La principal característica de la radiación UV al interactuar con los materiales, incluyendo los sistemas biológicos, es la posibilidad de producir excitaciones en los átomos, que provocan reacciones químicas. En éstas se basan los diferentes efectos, que son dependientes de la energía, es decir, de la longitud de onda de la luz. (Diffey 2002).

Las fuentes de LUV pueden ser de origen natural y artificial. Las fuentes de origen natural pueden ser producidas por los rayos durante tormentas eléctricas, pero la más abundante es la que proviene de nuestra estrella más cercana, el sol. Ahora se sabe, que el espectro de radiación solar incluye: 45% de luz visible, 45% de radiación infrarroja u ondas de calor, y 10% de LUV (Figura 3). Eventualmente, el sol emite también radiaciones ionizantes, como son los rayos X (Aschwanden, 2006).

Por otra parte, la LUV puede ser producida de manera artificial, mediante lámparas fluorescentes o de luz negra, estas lámparas emplean solo un tipo de fósforo (P) en lugar de los varios usados en las lámparas fluorescentes normales y, en lugar del vidrio claro, se usa uno de color azul-violeta, llamado cristal de Wood (Figura 4). El vidrio de Wood contiene óxido de níquel, y bloquea casi toda la luz visible que supere los 400 nanómetros, permitiendo solo ondas electromagnéticas de longitud de onda más corta (Miller et al., 2013).

En cuanto a su modo de acción, la LUV presenta propiedades fotoquímicas, ya que posee energía suficiente para extraer electrones externos de algunos átomos, redistribuir los átomos de las moléculas en nuevas moléculas o acelerar ciertas reacciones químicas. Una de las acciones fotoquímicas de interés es la realizada sobre el oxígeno. La LUV produce la separación de los dos átomos que forman la molécula de oxígeno; deja libre oxígeno atómico, que tiene una existencia muy breve, y se recombina rápidamente para formar oxígeno molecular (O_2) u ozono (O_3). Dado lo anterior, en cuanto a las reacciones con el oxígeno, se entiende que la misma LUV es capaz de contribuir a la capa de ozono ya que induce su formación. Estas reacciones se mantuvieron casi inalteradas por muchos años, sin embargo, hoy en día, el uso de sustancias químicas como los mencionados clorofluorocarbonos, que destruyen la capa de ozono por actividad antropogénica, ha desbalanceado

Figura 3. El espectro de la radiación solar incluye una diversidad de radiaciones. En forma global, se considera que el 45% corresponde al espectro visible de la luz, 45% a ondas de calor, conocidas también como infrarrojas, y un 10% a luz ultravioleta de diversas longitudes de onda, como se explica en el texto. Cada 11 años, el sol tiene períodos de actividad en la corona solar que emite rayos X. De no ser por la capa de ozono, una gran cantidad de radiación llegaría a la superficie terrestre y haría imposible la vida en el planeta tal y como la conocemos.

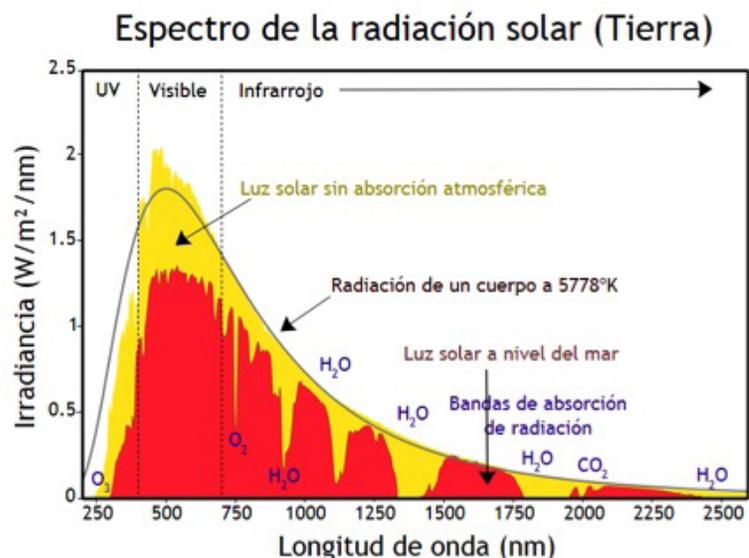




Figura 4. Lámparas de luz ultravioleta usadas principalmente como agentes germicidas. Las ventajas de eliminar microorganismos con este agente físico, es que no se dejan residuos químicos en los materiales irradiados.

este delicado equilibrio de formación-destrucción del ozono estratosférico y esto ha provocado la disminución de este escudo protector (Henriksen et al, 1990).

RIESGOS A LA SALUD POR LA LUV

La radiación ultravioleta envejece a las células de la piel y pueden dañar el ADN, como más adelante se detallará. Estas radiaciones están asociadas a daño dérmico a largo plazo, tal como las arrugas, pero también se considera que desempeñan un papel en algunos tipos de cáncer de piel. La insolación desmedida, y el uso indiscriminado de camas bronceadoras que emiten grandes cantidades de esta radiación, se asocian con el riesgo de padecer cáncer de piel (De Vries et al., 2012).

Los rayos UVB tienen un poco más de energía que los rayos UVA, y éstos pueden dañar directamente al ADN de las células de la piel, y son los principales causantes de quemaduras de sol. Asimismo, se cree que causan la mayoría de los procesos carcinogénicos de la piel (Uehara et al., 2014).

Por su parte, los rayos UVC tienen más energía que otros tipos de rayos UV, aunque si la capa de ozono tiene la densidad adecuada, no pueden penetrar nuestra atmósfera y por lo tanto, se considera que no debieran estar presentes en la luz solar.

La potencia de los rayos UV que llega al suelo depende de un número de factores físicos, tales como: 1) Hora del día. Los rayos UV son más potentes entre 10 a.m.

y 4 p.m. en latitudes medias, 2) Temporada del año. Los rayos UV son más potentes durante los meses de la primavera y el verano para el hemisferio norte, aunque este es un factor menos importante cerca del ecuador, 3) Distancia desde el ecuador (latitud), ya que la exposición a LUV disminuye a medida que se aleja de la línea ecuatorial, 4) Altitud. Más rayos UV llegan al suelo en elevaciones más grandes, 5) Formación nubosa. El efecto de las nubes puede variar, ya que a veces la formación nubosa bloquea algunos rayos UV del sol y reduce la exposición a rayos UV; mientras que, algunos tipos de nubes pueden reflejar la radiación y pueden aumentar así la exposición a los rayos UV. Lo que es importante saber es que la LUV puede atravesar las nubes, incluso en un día nublado, 6) Reflejo de las superficies. Los rayos UV pueden rebotar en superficies como el agua, la arena, la nieve, o el pavimento, lo que lleva a un aumento en la exposición de los sistemas biológicos a esta radiación.

En lo que concierne al efecto negativo de la LUV de acelerar el envejecimiento de la piel, se acepta que la mayor parte del envejecimiento prematuro está causado por la exposición indiscriminada al sol. Entre las respuestas destacan: pecas, manchas seniles (también conocidas como "manchas hepáticas"), piel áspera, arrugas finas que desaparecen cuando son estiradas, tez llena de manchas, piel laxa y queratosis actínica (Diffey, 1998).

Se sabe también que la LUV es capaz de afectar la visión debido a la formación de cataratas o también llamadas opacidades lenticulares de la córnea. La exposición a la LUV afecta tanto el epitelio como el endotelio en la córnea, y el aumento de la exposición

provoca daños considerables al mecanismo de protección antioxidante corneal, lo que resulta en daños a ésta y a otras estructuras oculares. Esta radiación también afecta el cristalino, que pierde su transparencia debido a los cambios irreversibles en sus proteínas (Diffey, 1998).

Más recientemente, se ha observado que la LUV afecta el sistema inmunológico de los seres vivos produciendo inmunosupresión, lo que favorece el desarrollo de infecciones tanto virales como bacterianas. De ahí el comentario que se hacía en el pasado acerca de la aparición de "fuegos bucales" o también conocidos como aftas, luego de una insolación desmesurada. Asimismo, el efecto inmunosupresivo favorecería el desarrollo del cáncer de piel anteriormente mencionado (Gonzalez-Maglio et al., 2016).

También, se ha demostrado que esta radiación es capaz de generar los llamados radicales libres, que son moléculas muy reactivas que están involucradas en muchos procesos degenerativos de los tejidos biológicos, además de relacionarse con mutagénesis y carcinogénesis (Herrling et al., 2003).

EFFECTOS DE LA LUV EN EL ADN

A nivel molecular, desde mucho tiempo atrás se sabe que la LUV es una forma de radiación que actúa como un mutágeno, un agente que causa cambios heredables en el ADN. La exposición a la LUV provoca cambios químicos que alteran la forma del ADN, y por consecuencia se altera el código genético. La LUV de longitudes de onda entre 200 a 300 nm que se encuentra en la luz solar natural, lámparas de sol y camas de bronceado, es capaz de afectar marcadamente el ADN pues este ácido nucleico absorbe fuertemente la luz UV ya que la parte más intensa del espectro de absorción de ADN abarca longitudes de onda entre 250-260 nm. Debido a la componente de LUV en la luz solar, este tipo de radiación viene a constituirse en la fuente más común de los tipos de radiación que daña al ADN (Beani, 2014).

La forma en que la LUV afecta al ADN, es primordialmente al causar la formación de los

llamados dímeros de timina, esto es, dos bases de pirimidina orientadas una junto a la otra en la misma cadena y que se unen entre sí, en lugar de unirse a su pareja en la cadena opuesta. Ese efecto, produce un abultamiento en el ADN dondequiera que ocurra, por consecuencia las células no pueden leer más allá o copiar las regiones que contienen los dímeros de timina. Por su parte, la célula responde a este daño, ya que un proceso celular llamado reparación por escisión puede solucionar esto; una base del dímero se corta de la hebra del ADN dañado, y una nueva base sustituye a ésta, sin embargo, se inserta al azar y sólo hay una probabilidad de 1 en 4 de que la base sustituyente sea la misma que la que se eliminó, por lo que este proceso de reparación por escisión frecuentemente causa mutaciones al ADN (Ikehata y Ono, 2011).

EFFECTOS Y USOS BENÉFICOS DE LA LUV

En contraparte a todo lo anteriormente expuesto, la LUV juega un papel importante en algunos procesos vitales. Una reacción de importancia biológica es la conversión de la provitamina D en vitamina D. Las provitaminas (ergosterol y 7-dehidrocolesterol) provienen de la alimentación; las que llegan a la piel por la circulación sufren la acción de la radiación UV (270-320 nm) y se transforman en vitamina D. La vitamina D entre otras acciones, es necesaria para la absorción intestinal del calcio procedente de los alimentos y es por eso que participa en la homeostasis del hueso. El déficit de vitamina D origina alteraciones óseas y raquitismo, también se ha relacionado el riesgo de padecer algunos tipos de cáncer, cuando el individuo tiene niveles sanguíneos bajos de esta vitamina (Holick, 2014).

Por otra parte, son bien conocidas las aplicaciones que involucran los efectos germicidas de los rayos UV. Las áreas de aplicación antimicrobiana de esta radiación no ionizante se dividen en tres grandes categorías: a) inhibición de microorganismos en las superficies que permite la disminución de carga microbiana de materiales de empaque, por ejemplo, contenedores, envoltorios o tapas de botellas, mediante la disposición de lámparas apropiadas sobre los transportadores. El éxito de esta aplicación

Figura 5. El uso de la radiación ultravioleta facilita el trabajo con más seguridad al manejar agentes infecciosos de alta virulencia en campanas de flujo laminar empleadas en los laboratorios

Figura 6. La Luz ultravioleta ha probado ser muy eficiente en la eliminación de una variedad de gérmenes en lugares donde una alta asepsia es requerida, como es el caso de las salas de quirófano de los hospitales.



depende de que las superficies del material estén limpias y libres de cualquier suciedad que absorba la radiación y proteja las bacterias; b) destrucción de microorganismos en el aire, en los hospitales, las lámparas UVC se han utilizado para crear una cortina o barrera de radiación por la que debe pasar el aire antes de llegar a pacientes sensibles a la infección. Además, la LUV se ha utilizado para disminuir la cantidad de bacterias transmitidas por el aire y que facilitan el trabajo en campanas de flujo laminar cuando se manejan microorganismos altamente

virulentos (Figura 5), también en quirófanos, donde se requiere una alta asepsia (Figura 6), y en salas de internamiento de pacientes infecciosos; c) esterilización de líquidos, el tratamiento con UVC es una de las formas más sencillas de destruir una amplia gama de microorganismos en el agua. Se ha utilizado para desinfectar efluentes de aguas residuales, agua potable y agua para piscinas. Además, la combinación de rayos UV y el ozono tiene una acción oxidante muy poderosa que puede reducir el contenido microbiano del agua a niveles extremadamente bajos.

CONCLUSIONES

Aunque la radiación ultravioleta no tiene la suficiente energía como para provocar ionización de átomos y moléculas con los que interactúa, es capaz de provocar efectos biológicos importantes, que pueden ser utilizados con fines prácticos, pero que también pueden llegar a ser perjudiciales para los sistemas biológicos.

La LUV es generada de manera natural por el sol, que emite entre distintos tipos de ondas electromagnéticas una cantidad considerable de LUV. Si esta radiación impactara directamente sobre la superficie terrestre, acabaría con las formas de vida existentes. Por su parte, la capa de ozono tiene un papel primordial para evitar que la LUV impacte sobre la superficie del planeta, sin embargo, en las últimas décadas se ha incrementado el agujero de la capa de ozono, lo que ha permitido el ingreso de mayor cantidad de radiación a algunas regiones del planeta.

La LUV es capaz de afectar la salud del humano, acelerando el proceso de envejecimiento de la piel,

la formación de cataratas, inmunosupresión, y la aparición de cáncer en la piel. El blanco principal de esta radiación no ionizante a nivel molecular es el ADN. El mecanismo mediante el cual la LUV afecta al ADN es por la formación de dímeros de timina. La célula afectada puede llevar distintos caminos, que van desde la reparación del ADN, la apoptosis o muerte celular programada, y la formación de mutaciones que pueden dar lugar a la formación de células cancerosas.

En contraparte, la LUV tiene también efectos benéficos a la salud, por ejemplo, en la síntesis endógena de vitamina D. Además, hay tecnología de uso benéfico que involucran el uso de LUV en lámparas de luz negra que son utilizadas para eliminación o disminución de carga microbiana en superficies, en el aire y en líquidos, la cual es una alternativa rápida y económica empleada actualmente utilizada en la industria alimentaria, laboratorios, y hospitales.



LITERATURA CITADA

Aschwanden, M. 2006. Physics of the Solar Corona: An Introduction with Problems and Solutions. Primera Edición. Springer. pp 32-36. <https://www.springer.com/la/book/9783540307655>

Beani, JC. 2014. Ultraviolet A-induced DNA damage: role in skin cancer. *Bull Acad Natl Med.* 198(2):273-95. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26263704>

De Vries, E., M. Arnold, E. Altsitsiadis, M. Trakatelli, B. Hinrichs, E. Stockfleth, J. Coebergh. 2012. Potential impact of interventions resulting in reduced exposure to ultraviolet (UV) radiation (UVA and UVB) on skin cancer incidence in four European countries, 2010-2050. *British Journal of Dermatology.* 167(2):53-62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2012.11087.x>

Diffey, B.L. 1998. Ultraviolet radiation and human health. *Clin. Dermatol.* 16:83-89. [https://doi.org/10.1016/S0738-081X\(97\)00172-7](https://doi.org/10.1016/S0738-081X(97)00172-7)

Diffey B.L. 2002. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods.* 28(1):4-13.

González Maglio, D.H., M.L. Paz, J. Leoni. 2016. Sunlight effects on immune system: Is there something else in addition to UV-induced immunosuppression? *Biomed Res Int.* :1934518. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1934518>

Guerrero Abreu, J., J.L. Pérez Alejo. 2006. Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana. *Revista Cub Med Milit.* 35(3): 1-7. <http://scielo.sld.cu/pdf/mil/v35n3/mil08306.pdf>

Herrling, T., J. Fuchs, J. Rehberg, N. Groth. 2003. UV-induced free radicals in the skin detected by ESR spectroscopy and imaging using nitroxides. *Free Radical Biology and Medicine.* 35(1) 59-67. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(03\)00241-7](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(03)00241-7)

Henriksen, T., A. Dahlback, S.H. Larsen, J. Moan. 1990. Ultraviolet-radiation and skin cancer. Effect of an ozone layer depletion. *Photochemistry and Photobiology.* 51: 579-582. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1990.tb01968.x>

Holick, M.F. 2014. Sunlight, ultraviolet radiation, vitamin D and skin cancer: how much sunlight do we need? *Adv Exp Med Biol.* 810:1-16. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-0437-2_1

Ikehata, H., T. Ono. 2011. The mechanisms of UV mutagenesis. *Journal of Radiation Research,* 52(2)115-125. <https://doi.org/10.1269/jrr.10175>

Miller, S., J. Linnes, J. Luongo. 2013. Ultraviolet Germicidal Irradiation: Future Directions for Air Disinfection and Building Applications. *Photochemistry and Photobiology.* 89: 777-78. <https://doi.org/10.1111/php.12080>

Uehara F, S. Miwa, Y. Tome, Y. Hiroshima, S. Yano, M. Yamamoto, E. Efimova, Y. Matsumoto, H. Maehara, M. Bouvet, F. Kanaya, R.M. Hoffman. 2014. Comparison of UVB and UVC effects on the DNA damage-response protein 53BP1 in human pancreatic cancer. *J Cell Biochem.* 115(10):1724-8. <https://doi.org/10.1002/jcb.24837>