

Radiación e índice ultravioleta solar al mediodía sobre superficies en diferentes posiciones

Enrique Albizzati¹

Resumen

Se calculan la radiación y el índice solar ultravioleta al mediodía para Santa Fe-Argentina, en días de cielo claro. Para los cálculos sobre superficies con diferentes inclinaciones, se aplican los modelos TUV de transferencia radiativa e isotrópico. El índice supera el valor 11 en el período noviembre-febrero, en planos con inclinaciones entre 0° y 30°, y orientados hacia el norte, este y oeste; también es extremo en diciembre y enero, sobre superficies igualmente inclinadas mirando al sur. La componente difusa horizontal de la radiación y del índice es mayor que la directa, en marzo- octubre y durante todo el año respectivamente.

Palabras clave: Radiación - Ultravioleta - Índice - Eritémica - Solar.

Abstract

Radiation and solar ultraviolet index are calculated at noon for Santa Fe-Argentina, in clear-sky days. For the computations on surfaces with different inclinations, are applied the models of radiative transfer TUV and isotropic. The index exceeds value 11 in the period November and february, in planes with inclinations between 0° and 30°, and facing north, east and west; it is also extreme in december and january over equally inclined surfaces facing south. The horizontal diffuse component of radiation and index are greater than the direct, in march-october and throughout year respectively.

1. Introducción

La radiación ultravioleta solar (RUV) incidente sobre nuestro planeta constituye aproximadamente el 5,0 % de la radiación de todo el espec-

1. Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral. albizzati@fiq.unl.edu.ar

tro solar. Antes de llegar a la superficie terrestre, las radiaciones solares sufren variaciones debido a la dispersión y absorción provocada por las moléculas de aire, polvo, ozono, dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases presentes en la atmósfera. Las radiaciones que se reciben dependen también de la distancia sol-tierra y de la posición del sol en el cenit [1].

Las RUV-B (290 nm-315 nm) y RUV-A (315 nm-400 nm) incidentes son fuertemente afectadas por la concentración de ozono estratosférico y por las condiciones climáticas y ambientales particulares de cada región. La denominada RUV-C, es absorbida completamente en la atmósfera por el gas ozono, por debajo de 290 nm.

En la actualidad es de gran interés el conocimiento de la RUV, por lo que se estudian tanto sus efectos perjudiciales sobre los seres vivos y los diversos materiales de uso corriente, como su aplicación beneficiosa en diversos procesos fotoquímicos [2-4].

Con respecto a los daños que en los seres humanos puede producir la RUV, son: quemaduras, dermatosis y envejecimiento en la piel, melanomas y carcinomas, inflamaciones y cataratas en los ojos, y alteraciones en el sistema inmunológico. El riesgo relacionado con la aparición de enrojecimiento e inflamación en la piel humana debido a la exposición a los rayos solares se determina el índice ultravioleta solar (IUV) que está relacionado con la llamada radiación eritémica [5].



En la región Litoral-Centro de la República Argentina, donde se encuentra la ciudad de Santa Fe (-31,65° S; -60,72° O), se han realizado una serie de estudios, mediciones y modelizaciones de las radiaciones solares ultravioleta y eritémica [6-9].

Dadas las dificultades que se presentan para realizar mediciones de las radiaciones ultravioleta y eritémica, tales como la confiabilidad, costo y mantenimiento del instrumental, resulta conveniente usar modelos con el fin de predecirlas. Estos modelos previamente verificados pueden ser considerados confiables y útiles para reemplazar a las mediciones en el plano horizontal y en superficies inclinadas [10,11].

En lo que respecta a las superficies inclinadas, debe considerarse que los modelos aplicados para las RUV en principio han sido desarrollados en el hemisferio norte, para planos orientados al sur y para todo el espectro solar. El modelo isotrópico propuesto por Liu-Jordan para las superficies inclinadas, es relativamente simple y ha dado satisfactorias predicciones de las RUV al compararlo con los resultados obtenidos sobre superficies en diferentes posiciones [12,13].

En este trabajo se hallan la RUV y el IUV solar al mediodía, en Santa Fe, a lo largo del año para días de cielo claro y sin nubes. En los cálculos de la RUV horizontal se utiliza el modelo de transferencia radiativa TUV (Trospheric Ultraviolet-Visible transfer model), desarrollado en la División de Química Atmosférica del Centro Nacional para la Investigación de la Atmósfera de los Estados Unidos [14].

Luego, en base al referido modelo isotrópico, se calculan la RUV y el IUV sobre planos inclinados entre 0° y 90°, posicionados hacia el norte, este, oeste y sur. Posteriormente se obtienen y analizan los respectivos cocientes entre las RUV y los IUV sobre las referidas superficies y el plano horizontal.

2. Radiación e índice solar ultravioleta

La radiación solar global sobre la superficie horizontal en una dada longitud de onda (I_{λ}), es la suma de la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es la radiación directa normal ($I_{bN,\lambda}$) multiplicada por el coseno del

ángulo cenital (θ_z).

$$I_{\lambda} = I_{bN,\lambda} \cos \theta_z + I_{d,\lambda} \quad (1)$$

La radiación difusa ($I_{d,\lambda}$) se obtiene como la suma de la componente de dispersión de las moléculas o de Rayleigh, la dispersión de los aerosoles, y la componente de la múltiple reflexión entre el aire y el suelo. En los cálculos se considera un día típico que representa cada mes del año, al mediodía solar.

El modelo TUV es usado para computar las radiaciones solares ultravioleta directa, difusa y global horizontales. Los elementos para el cálculo se encuentran en http://cprm.acd.ucar.edu/Models/TUV/Interactive_TUV. Una vez hallados los valores de las radiaciones correspondientes a cada longitud de onda, integrándolos se obtiene la RUV solar integrándolos en el rango del espectro 290 nm-400 nm.

Para determinar la radiación solar total sobre las superficies inclinadas se multiplica la radiación global horizontal antes obtenida (I) por un factor R [1]:

$$IT = R I \quad (2)$$

La radiación solar total que alcanza la superficie inclinada (IT) es la suma de la radiación directa, la radiación difusa recibida desde el cielo, y la radiación reflejada por el suelo.

En el modelo propuesto por Liu-Jordan, la superficie recibe desde el cielo radiación difusa e isotrópica. La superficie inclinada un ángulo B respecto del plano horizontal tiene un factor de visión del cielo igual a $(1 + \cos B)/2$, y el factor de visión del suelo es $(1 - \cos B)/2$.

Entonces, la expresión para obtener R es:

$$R = [(1 - I_d/I)] R_b + (I_d/I) [(1 + \cos B)/2] + p [(1 - \cos B)/2] \quad (3)$$

En la ecuación (3) I_d es la radiación difusa horizontal, y p es un coeficiente que indica la fracción de la radiación solar que es reflejada difusamente por el suelo. R_b es la relación entre la radiación solar directa en el plano inclinado y la radiación solar directa en el plano horizontal, siendo:

$$R_b = \cos \theta / \cos \theta_z \quad (4)$$

El ángulo de incidencia de la radiación (θ) que aparece en la ecuación (4), depende de la declinación solar, la latitud, la posición de la superficie y el ángulo horario [1].

Para conocer el IUV, previamente se encuentra la radiación solar eritémica. Ésta es el producto de la radiación ultravioleta solar por un factor (F_{λ}), que según Mc Kinlay y Diffey, representa el efecto sobre la piel humana provocado especialmente por las RUV-B (Tabla 1). Luego el valor del IUV se calcula multiplicando por cuarenta (40) el valor de la radiación solar eritémica expresada en W/m².

La escala empleada para el IUV, aprobada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se muestra en la Tabla 2. Valores crecientes del IUV indican un aumento del riesgo por exposición humana al Sol.

Tabla 1. Factor de Mc Kinlay y Diffey [5].

Longitud de onda λ	$\lambda < 299 \text{ nm}$	$299 \text{ nm} \leq \lambda \leq 328 \text{ nm}$	$(\lambda > 328 \text{ nm})$
Factor F_{λ}	1	$10^{0,094(298-\lambda)}$	$10^{0,015(139-\lambda)}$

Tabla 2. Exposición a las radiaciones solares.

Categoría	Baja	Moderada	Alta	Muy alta	Extrema
IUV	2 y menos de 2	3, 4 y 5	6 y 7	8, 9 y 10	11 y más de 11

3. Resultados del cálculo

En el procedimiento aplicado para hallar la RUV en el plano horizontal es necesario definir un día típico del mes, que se muestra en la Tabla 3 [1].

El ángulo cenital calculado al mediodía solar ($\theta_{z,m}$) varía entre 8,60° y 54,74° y el espesor de la capa de ozono se recupera de la base de los datos medidos en el año 2013 por el Ozone Monitoring Instrument (http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/ozone_overhead_current_v8.md).

Para determinar la RUV solar se adopta el albedo igual a 0,06, dadas las características de la zona geográfica, y para la atmósfera sin nubes se adopta 0,380 como efecto del espesor óptico de aerosoles a la longitud de onda 340 nm. Por otra parte, en el cálculo de la RUV reflejada sobre los planos inclinados con distintas orientaciones, el valor de la reflectividad del suelo en los alrededores de las superficies es 0,10.

Tabla 3. Datos para cálculo de la RUV en el plano horizontal.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Día	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344
$\theta_{z,m}$ (°)	10,73	18,70	29,23	41,07	50,44	54,74	52,83	45,11	33,87	22,05	12,74	8,60
Ozono (uD)	267	266	261	265	257	278	256	281	292	286	273	275

Los cálculos efectuados para el plano horizontal (Figura 1) muestran las componentes directa y difusa en la RUV y en el IUV.

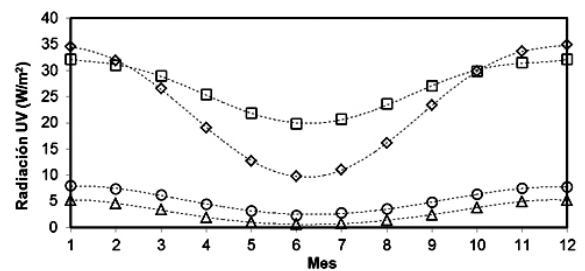
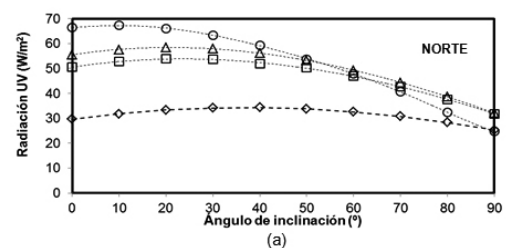


Figura 1. Radiación ultravioleta solar en plano horizontal (en W/m²) para cada mes del año -◇ componente directa, □ componente difusa. Índice ultravioleta solar en plano horizontal para cada mes del año -△ componente directa, O componente difusa.

Se observa que la RUV directa supera a la RUV difusa sólo en el período noviembre-febrero. Además en todos los meses del año la componente difusa del IUV supera a la componente directa. Con el modelo TUV también se determina que la componente difusa horizontal de la RUV-B es siempre mayor que la directa. En cambio cuando el ángulo cenital es menor que 20° aproximadamente, entre noviembre y febrero, la componente difusa es menor que la directa en el RUV-A. Estas observaciones justifican las tendencias representadas en la figura mostrada, sabiendo que el IUV es muy influenciado por la RUV-B.

En la Figura 2 se han representado los valores del RUV calculados para las diferentes superficies en el mediodía solar, en los meses de marzo, junio, setiembre y diciembre.



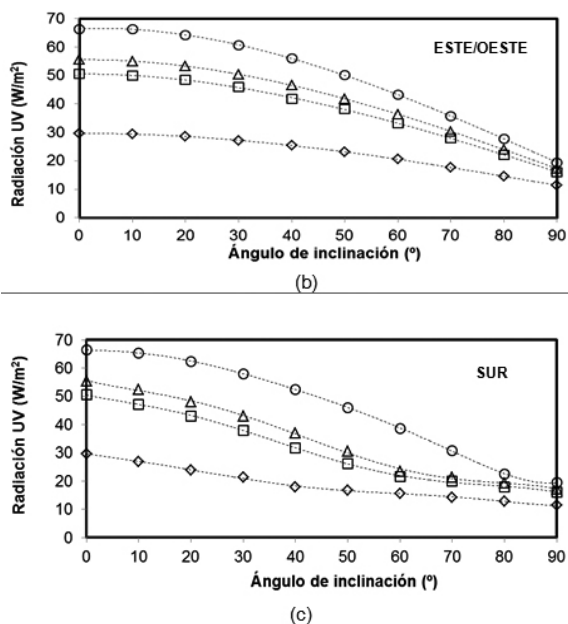


Figura 2. Radiación ultravioleta solar (en W/m²) en función de su orientación y del ángulo de inclinación de la superficie (°) - Δ marzo, \diamond junio, \square setiembre, \circ diciembre.

La influencia de los valores de la componente difusa de la radiación solar horizontal estudiada, se traslada al cómputo de la RUV y del IUUV en todas las orientaciones e inclinaciones de las superficies consideradas.

Como muestra la Figura 2a, la máxima RUV es en diciembre, con la superficie mirando al norte e inclinada 10° (67,3 W/m²). En esa misma orientación, los máximos de la RUV se corresponden con inclinaciones que crecen en marzo, setiembre y junio respectivamente.

En las orientaciones este, oeste y sur, el valor máximo de la RUV se presenta cuando el plano es horizontal, decreciendo rápidamente al aumentar el ángulo de inclinación (Figuras 2b y 2c). Como es esperable, los valores de la radiación sobre las superficies son similares en cada mes, para ángulos de inclinación superiores a 80°

La Tabla 4 se ha elaborado con valores de las RUV en el plano horizontal y en las superficies inclinadas. Se ve en esa tabla que entre la radiación inclinada y la horizontal es mayor que la unidad sólo en algunas superficies que miran al norte, en los meses de marzo y setiembre si los ángulos de inclinación son bajos, y en junio

si estos ángulos tienen valores bajos o medios.

Tabla 4. Cociente entre las RUV sobre superficies inclinada y horizontal.

Mes	Inclinación(°)	Norte	Este/oeste	Sur
Marzo	30	1,042	0,908	0,774
	60	0,887	0,655	0,423
	90	0,579	0,310	0,310
Junio	30	1,152	0,917	0,716
	60	1,099	0,692	0,526
	90	0,854	0,384	0,384
Setiembre	30	1,064	0,909	0,753
	60	0,928	0,659	0,428
	90	0,629	0,319	0,319
Diciembre	30	0,954	0,914	0,875
	60	0,721	0,652	0,583
	90	0,372	0,293	0,293

En la Figura 3 se observa que el IUUV es mayor a 11 en el período noviembre-febrero, para el plano horizontal y para superficies orientadas al norte, este y oeste con inclinaciones menores a 30°. También el índice es extremo en superficies mirando al sur con estas mismas inclinaciones, durante los meses de diciembre y enero.

Por otra parte, el IUUV tiene valores menores a 6 entre mayo y agosto cualquiera sea la posición y orientación de la superficie. Ese período se amplía en el caso de superficies que tienen una inclinación mayor a 30° y miran al este, oeste y sur. Como era esperable en las superficies verticales (Figura 3d), el índice nunca es alto, muy alto o extremo.

Los resultados del cociente entre los IUUV sobre las superficies inclinada y horizontal de la Tabla 5 muestran una tendencia similar a los de la Tabla 4. Considerando para la comparación el mismo caso, los valores de la última tabla son superiores al cociente entre las RUV de la primera si la superficie mira al sur. Lo mismo sucede prácticamente siempre que la superficie esté orientada al este u oeste, y lo contrario se presenta si la superficie está hacia el norte.

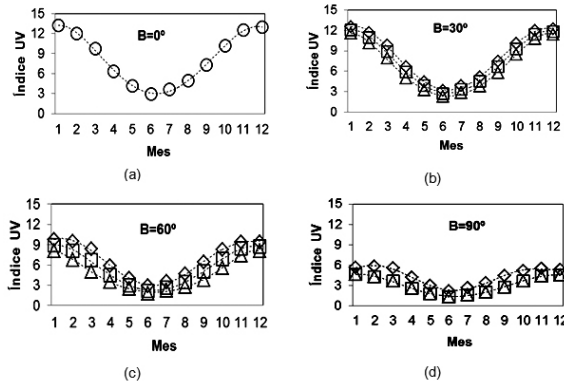


Figura 3. Índice ultravioleta solar para cada mes del año y diferentes inclinaciones de la superficie (O horizontal, ◇ norte, □ este/oeste, Δ sur).

Tabla 5. Cociente entre los IUUV sobre superficies inclinada y horizontal.

Mes	Inclinación(°)	Norte	Este/oeste	Sur
Marzo	30	1,015	0,916	0,818
	60	0,858	0,687	0,516
	90	0,571	0,374	0,374
Junio	30	1,070	0,926	0,783
	60	0,973	0,724	0,623
	90	0,736	0,448	0,448
Setiembre	30	1,031	0,917	0,804
	60	0,887	0,690	0,521
	90	0,608	0,381	0,381
Diciembre	30	0,943	0,913	0,883
	60	0,727	0,675	0,622
	90	0,410	0,349	0,349

4. Conclusiones

Analizando las predicciones de la RUV y del IUUV realizadas para Santa Fe, al mediodía solar y en condiciones de cielos sin nubes, se concluye que:

En el plano horizontal la contribución de la componente difusa de la RUV supera a la directa entre marzo y octubre, mientras que al computar el valor del IUUV aquella contribución es mayor en todo el año.

El máximo de la RUV ($67,3 \text{ W/m}^2$) se presenta sobre una superficie inclinada a 10° y orientada al norte, en el mes de diciembre. Para esta orientación, los máximos de la RUV se observan para inclinaciones mayores en marzo, setiembre y junio.

Para las orientaciones este, oeste y sur, el

máximo de la RUV se presenta cuando el plano es horizontal, decreciendo al aumentar la inclinación. Los valores de la radiación, en todos los meses del año, tienden a igualarse si la inclinación es mayor a 80° .

El IUUV es mayor a 11 sobre una superficie horizontal, y para las que miran al norte, este y oeste cuya inclinación es menor a 30° , en el período noviembre-febrero. En los meses de diciembre y enero, el índice supera a 11 en superficies al sur, que tienen idénticas inclinaciones.

Cualquiera sea la posición y orientación de la superficie los valores del IUUV son menores a 6 en el período mayo-agosto. El período es mayor si las superficies poseen una inclinación superior a 30° y están orientadas al este, oeste y sur. El índice no es alto, muy alto o extremo sobre las superficies verticales.

Referencias

- [1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [2] B. L. Diffey, "Solar ultraviolet radiation effects on biological systems", *Physics in Medicine and Biology Review*, vol. 36. n° 3, pp. 299-328, 1991.
- [3] A. L. Andradý, H. Hamid and A. Torikai, "Effects of solar UV and climate change on materials", *Photochem. Photobiol. Sci.*, vol. 10, pp. 292-300, 2011.
- [4] S. Malato, J. Blanco, D. C. Alarcón, M. I. Maldonado, P. Fernández-Ibáñez and W. Gernjak, "Photocatalytic decontamination and disinfection of water with solar collectors", *Catalysis Today*, vol. 122, n° 1-2, pp. 137-149, 2007.
- [5] A.F. McKinlay and B. L. Diffey, "A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin", *CIE Journal*, vol. 6, n° 1, pp. 17-22, 1987.
- [6] E. Albizzati, G. Rossetti y O. Alfano, "Mediciones de la radiación solar UVB y predicción de la radiación solar UV eritémica bajo cielos claros y sin nubes", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, pp.1.25-11.30, 2002.
- [7] R. Piacentini y J. Herman, "Radiaciones solares ultravioletas sobre Sudamérica y sus mares adyacentes", *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 1, pp. 7-9, 1996.

[8] R. Piacentini, O. Alfano, E. Albizzati, E. Luccini y J. Herman, "Solar ultraviolet irradiance for clear sky days incident at Rosario, Argentina: measurements and model calculations", *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, vol. 107, pp. AAC 6-1–AAC 6-7, 2002.

[9] R. D. Piacentini y A. Cede, "Measurements of solar ultraviolet irradiance on inclined surfaces", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 6, pp. 819-823, 2004.

[10] C. Gueymard, SMARTS2 a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment, FSEC-PF-270-95, Fla. Solar Energy Cent., Cocoa, Fla, USA, 1995.

[11] P. Koepke, A. F. Bais, D. Balis, M. Buchwitz, H. de Backer, X. de Cabo, P. Eckert, P. Eriksson, D. Gillotay, T. Koskela, V. Lapeta, Z. Litynska, J. Lorente, B. Mayer, A. Renault, A. Ruggaber, G. Schaubberger, G. Seckmeyer, P. Seifert, A. Schmalwieser, H. Schwander, K. Vanicek and M. Weber, "Comparison of models used for UV index calculation", *Photochem. Photobiol.*, vol. 67, pp. 657-662, 1998.

[12] S. Madronich, UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, in *Environmental Effects of UV Radiation*, ed. M. Tevini, Lewis Publisher, Boca Raton, Fla, USA, 1993.

[13] D. Serrano, M. J. Marín, M. P. Utrillas, F. Tena y J. A. Martínez-Lozano, "Medida y modelización de la irradiancia solar eritémica global sobre planos inclinados", *Tethys*, vol. 7, pp. 57-66, 2010.

[14] M. P. Utrillas, M. Marín, A. R. Esteve, V. Estellé, F. Tena, J. Cañada and J. A. Martínez-Lozano, "Diffuse ultraviolet erythemal irradiance on inclined planes: a comparison of experimental and modeled data", *Photochemistry and Photobiology*, vol. 85, pp. 1245–1253, 2009.