

ANÁLISIS DE LA IRRADIANCIA SOLAR UV PARA LA SÍNTESIS DE PRE-VITAMINA D₃ EN LA PIEL, EN ROSARIO, ARGENTINA

ANALYSIS OF THE UV SOLAR IRRADIANCE FOR THE SYNTHESIS OF PRE-VITAMIN D₃ ON THE SKIN, IN ROSARIO, ARGENTINA

Adriana Ipiña^{*1}, Gamaliel López-Padilla², Ana Laura Fisanotti³, Montserrat Dávalos⁴, and Rubén D. Piacentini¹

¹Instituto de Física Rosario – Universidad Nacional Rosario – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 27 de Febrero 210BIS – (S2000EKF) Rosario – Argentina.

²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas – Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba S/N - Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza (66451) – México.

³Facultad de Ciencias Médicas - Universidad Nacional Rosario - Santa Fe 3100 (S2002KKT) Rosario - Argentina

⁴Investigadora Independiente, Monterrey (64810) - México

Recibido: xx/xx/xx; Aceptado: xx/xx/xx

En los últimos años, el estudio de la vitamina D ha aumentado debido al incremento en la incidencia de personas que presentan niveles deficientes de esta vitamina. Pocos alimentos contienen vitamina D₃ de manera natural, siendo la principal fuente de obtención la radiación solar ultravioleta (UV), la cual desencadena el mecanismo de la síntesis de la vitamina D en la parte superficial de la piel. En este estudio se determinó la irradiancia solar UV efectiva para la síntesis de pre-vitamina D₃ en la ciudad de Rosario, Argentina, utilizando tres métodos: a) Coeficiente de proporcionalidad, b) Ecuación de Herman y c) Modelo TUV. Los valores se compararon para condiciones de cielo despejado al mediodía solar. Se calcularon los Tiempos de Exposición Solar (TES) para obtener las dosis mínimas de radiación solar UV para sintetizar pre-vitamina D₃ y suficiente para producir eritema, en el periodo junio 2019 - mayo 2020. Se discute la variación de los TES para alcanzar una dosis mínima para la síntesis de pre-vitamina D₃ y aparición de eritema con una fotoexposición del 25 % de la superficie corporal (la cara, el cuello y los brazos).

Palabras Clave: radiación solar UV, vitamina D, eritema, tiempos de exposición solar, Argentina.

In the last years, the study of vitamin D has raised due to the increase in the incidence of people with deficient levels of this vitamin. Few foods contain it naturally, being the main source of obtaining the ultraviolet solar radiation, which triggers the mechanism of the synthesis of vitamin D on the surface skin. In this study, the effective UV solar irradiance for the synthesis of pre-vitamin D₃ was determined in Rosario city, Argentina, using three methods: a) Coefficient of proportionality, b) Herman equation and c) TUV model. The values were compared in clear sky conditions at solar noon. The Solar Exposure Times (TES) were calculated to obtain the minimum doses for the synthesis of pre-vitamin D₃ and enough to produce erythema, in the period June 2019 - May 2020. It is discussed the variation of the TES reaching the minimum dose of pre-vitamin D₃ and erythema with a photoexposure of 25 % of the body (face, neck and arms).

Keywords: UV solar radiation, vitamin D, erythema, solar exposure times, Argentina.

I. INTRODUCCIÓN

La vitamina D es una hormona que interviene en múltiples procesos en el cuerpo humano. Los más conocidos (denominados *clásicos*), tienen lugar en el metabolismo fosfocálcico, regulando los niveles en sangre de calcio y fósforo mediante distintos mecanismos. A medida que se fue avanzando con las investigaciones, se atribuyeron muchas más funciones a la vitamina D (denominadas *no clásicas*), tales como la inmunomodulación y el control de la presión ar-

terial, entre otras.¹⁻³ Además, su deficiencia se asoció a diferentes enfermedades, como la sarcopenia, el Parkinson, el Alzheimer y la artritis reumatoidea.³⁻⁶ Incluso se la ha asociado a formas más graves de la enfermedad por COVID-19.⁷

La principal fuente de vitamina D es la síntesis en la piel producida por la radiación solar UV, ya que muy pocos alimentos la contienen de manera natural.⁸ La radiación solar UV que llega a la superficie terrestre varía en función de la composición atmosférica (especialmente O₃ estratosférico y troposférico), la ubicación geográfica, la hora del día y los días del año.

¹ipina@ifir-conicet.gov.ar

El rango UV es el más energético por fotón incidente (280-400 nm). Este rango espectral desencadena las reacciones fotoquímicas fundamentales en los precursores de la vitamina D. En el caso de los vegetales, se sintetiza vitamina D₂ (ergocalciferol) a partir del ergosterol, mientras que en los seres humanos se forma vitamina D₃ a partir del 7-dehidrocolesterol (7-DHC) que se encuentra en las membranas plasmáticas de los queratinocitos de la epidermis y en los fibroblastos de la dermis.⁹⁻¹¹ Cuando este último interactúa con los rayos UV sufre cambios conformacionales, dando como resultado la pre-vitamina D, la cual rápidamente se transforma a vitamina D₃ (colecalfiferol) y se une a una proteína transportadora de la sangre. Sin embargo, para ejercer sus efectos la vitamina D debe sufrir dos hidroxilaciones. La primera se da en el riñón, formando la 25-hidroxi-vitamina D (calcidiol), y la segunda tiene lugar en el hígado, donde finalmente obtenemos la 1-25-dihidroxi-vitamina D (calcitriol) o, en otras palabras, la vitamina D activa.¹²

Por otro lado, la sobreexposición solar UV también puede producir efectos nocivos a largo plazo, que van desde el fotoenvejecimiento, fotodermatitis hasta cánceres de piel y cataratas.^{13,14} Por esta razón es importante conocer los Tiempos de Exposición Solar (TES) para iniciar la síntesis de la vitamina D, sin provocar un daño a la piel (*e.g.* eritema). Para calcular los TES que producen un efecto biológico específico, se utiliza la definición de la dosis efectiva:

$$Dosis = \int_{t_1}^{t_2} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} d\lambda dt = \int_{t_1}^{t_2} E_t dt \quad (1)$$

donde E_{λ} es la irradiancia solar espectral a nivel del suelo y S_{λ} es el espectro de acción, que puede ser para: la síntesis de la pre-vitamina D₃ o generación de eritema. La irradiancia efectiva E_t , representa la irradiancia de pre-vitamina D₃ (E_{vitD}) o la irradiancia eritémica (E_{er}) según sea el caso. La integral de estas irradiancias de un tiempo t_1 a t_2 , define las Dosis en unidades de J/m². La Dosis Eritémica Mínima (MED por sus siglas en inglés) tiene un valor en la clasificación de Fitzpatrick de 250 J/m² para un fototipo de piel II.¹⁵ De manera análoga, la Dosis Mínima para generar los niveles adecuados de vitamina D₃ (MDD por sus siglas en inglés) es de 34 J/m² con una exposición de cuerpo completo y de 136 J/m² con una exposición del 25 % del cuerpo (brazos, cuello y cara).^{16,17} Adicionalmente, la MDD se puede aproximar en términos de $\frac{1}{4}$ MED (63 J/m²) para un fototipo II.¹⁸ En este trabajo se presenta la estimación de la E_{vitD} , mediante tres métodos: Coeficiente de proporcionalidad,¹⁶ Ecuación de Herman¹⁹ y Modelo TUV.²⁰ En particular, se utiliza el modelo TUV en la determinación de los TES (t_2-t_1) para acumular 1MED, $\frac{1}{4}$ MED y 1MDD en la ciudad de Rosario, Argentina.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de la columna total de ozono (O₃) provienen de la Colección 3, OMTD3 v8.5, en Unidades

Dobson (DU), medidos por el Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) para las coordenadas de la ciudad de Rosario, Argentina. A bordo del satélite AURA-NASA, OMI realiza observaciones diarias en una superficie de 13x24 Km² en el nadir, disponible en disc.gsfc.nasa.gov. Para las mediciones *in situ* de E_{λ} se utilizó un espectroradiómetro Optronics OL756 con esfera integradora y para el índice UV, la estación meteorológica Davis. Ambos instrumentos se encuentran ubicados en el Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR), en la ciudad de Rosario.

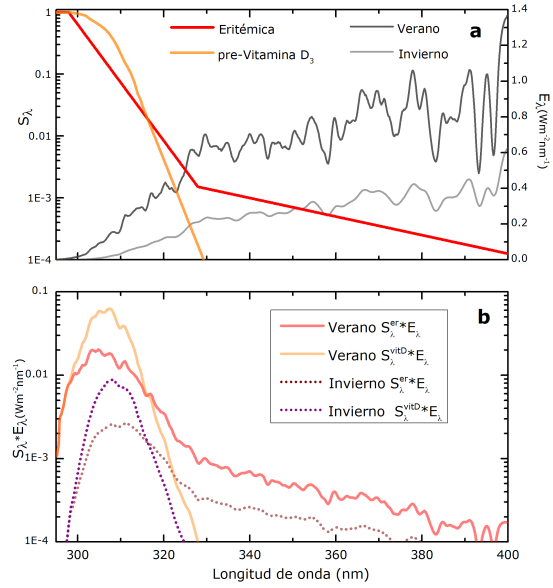


Figura 1: a) Espectros de acción de pre-vitamina D₃ y eritémica, e irradiancia espectral solar medida en cielo despejado, cerca de los solsticios de verano (28/Dic/2011) e invierno (23/Jun/2011), en la ciudad de Rosario. b) Irradiancia ponderada por cada espectro de acción y estación del año.

III. Coeficiente de proporcionalidad

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) y la World Meteorological Organization (WMO) reportaron la siguiente relación:

$$E_{vitD} = k \cdot E_{er} \quad (2)$$

donde k tiene dos valores distintos en verano e invierno para una ciudad del hemisferio sur.¹⁶ En este trabajo, los valores de k fueron obtenidos calculando E_{er} y E_{vitD} por medio de la Ec. 1 y las mediciones de E_{λ} realizadas bajo cielo despejado en verano e invierno (Figura 1). Posteriormente, la sustitución de E_{er} y E_{vitD} en la Ec. 2 determina $k=1.6$ en invierno y de $k=2$ en verano. Finalmente los valores diarios de E_{vitD} para ambas épocas del año (21/Jun/2019 - 20/Sep/2019 invierno y 21/Dic/2019 - 20/Mar/2020 verano) se estimaron a partir de la E_{er} . Esta irradiancia eritémica se deriva del índice UV medido al

Tabla 1: Coeficientes¹⁹ para obtener $U(\theta)$; $RAF(\theta) = \frac{a+c\theta^2+e\theta^4}{1+b\theta^2+d\theta^4+f\theta^6}$

	U	RAF
a	0.9659616883022778	1.349378286522954
b	0.0001089314449687077	-0.0002926808443875372
c	-0.0002681987275053843	-0.0003059282407232034
d	1.410783665933483E ⁻⁸	2.879164470755759E ⁻⁸
e	1.894213900598701E ⁻⁸	1.920553492457117E ⁻⁸
f	1.695104643516458E ⁻¹²	-8.580442654658103E ⁻¹³

mediodía solar en cielo despejado por la estación Davis. El índice UV es internacionalmente reconocido como medida de riesgo, en una escala de 0 a 20 (o más) y resulta de multiplicar E_{er} por 40 m²/W.

IV. Ecuación de Herman

Herman¹⁹ estableció una ecuación general de E_{vitD} para cualquier lugar geográfico:

$$E_{vitD} = U \left(\frac{O_3}{200} \right)^{-RAF} \quad (3)$$

donde el O_3 es la columna total de ozono, RAF es el Factor de Amplificación de Radiación y U es una función de ajuste, estos dos últimos dependientes el ángulo cenital solar (θ). La E_{vitD} en esta ecuación depende de la columna total de O_3 en el sitio en cuestión y de las funciones RAF y U, que a su vez dependen del ángulo cenital (relacionado a la hora del día). Los coeficientes de U y RAF se muestran en la Tabla 1, los cuales fueron obtenidos ejecutando el modelo TUV.

V. Modelo TUV

El modelo Tropospheric Ultraviolet Radiation (TUV)²⁰ emplea la ecuación de transferencia radiativa para obtener la E_λ a nivel del suelo, en los rangos ultravioleta, visible e infrarrojo cercano. El modelo incorpora el perfil de aerosoles cuya profundidad óptica (AOD) es de 0.34 a 340 nm (desde 5.24 km al espacio) y un perfil de O_3 correspondiente a la atmósfera estándar de EE. UU. Entre los datos de entrada más relevantes se encuentran las coordenadas del lugar (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar), AOD a 550 nm, reflectividad del suelo, albedo de dispersión simple, coeficiente de Angstrom, fecha y hora del día. La columna total de O_3 toma la medición diaria del instrumento OMI. Cabe destacar que esta medición satelital podría estar subestimada en ciudades muy contaminadas (*e.g.* Santiago de Chile) y tener diferencias significativas con respecto a las mediciones terrestres.

Con el modelo TUV también se calcularon los valores de E_{vitD} y E_{er} para las coordenadas de la ciudad de Rosario (32.95°S, 60.62°W, 25 m snm). Las estimaciones se realizaron diariamente al mediodía solar local (entre las 12:00 - 13:00 h) en el periodo junio 2019 - mayo 2020.

VI. Cálculo de los TES

Los valores de E_{vitD} y E_{er} derivados del modelo TUV fueron utilizados como base para calcular los TES. La Ec. 1 fue resuelta sistemáticamente por un código en *Python* comenzando a la hora de máxima intensidad solar (t_1) y terminando (t_2) al alcanzar: 1MED, $\frac{1}{4}$ MED y 1MDD. Este proceso se repitió día a día, determinando el intervalo de tiempo ($t_2 - t_1$) para generar las dosis a lo largo de todo el periodo.

VII. RESULTADOS

La irradiancia pre-vitamina D₃ calculada al mediodía solar empleando los tres métodos se muestra en la Fig. 2. Como puede observarse, existe una alta similitud entre los resultados obtenidos con la Ec. de Herman y el modelo TUV. La diferencia relativa promedio fue de 3.6 % en verano y de 0.4 % en invierno, respecto al TUV. Mientras que las diferencias relativas en razón del Coeficiente de proporcionalidad con el TUV y la Ec. de Herman fueron de: 8.5 % y 8.4 % en invierno, así como de 20.8 % y 17.1 % en verano, respectivamente.

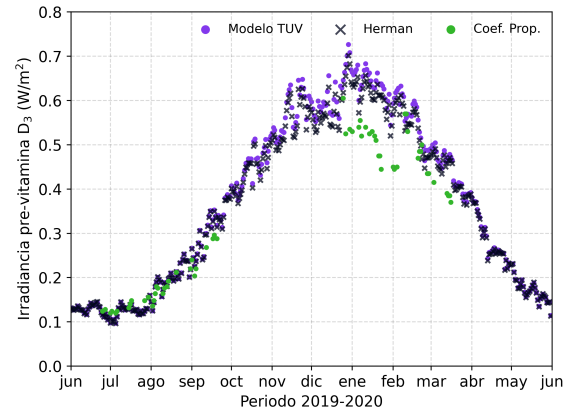


Figura 2: E_{vitD} para la ciudad de Rosario obtenida con el Coeficiente de proporcionalidad, Ec. de Herman y Modelo TUV.

Un estudio²¹ sobre el porcentaje de conversión de 7-DHC a pre-vitamina D₃ en diferentes latitudes y épocas del año, reveló que a latitudes mayores de 40°[S-N] en invierno, esta conversión es extremadamente ineficiente. La magnitud de este porcentaje es inversamente proporcional a la latitud en ciudades del continente americano. El máximo porcentaje de

Tabla 2: TES en minutos para cada dosis (x : no alcanzada) y fototipos obtenidos por Cabrera 2005 y Diaz et al. 2011 (celdas grises). Análisis del presente trabajo (celdas blancas) en un día de verano e invierno para acumular 1MED, $\frac{1}{4}$ MED y 1MDD.

Ciudad	Diaz et al. 2011 fototipo II				Cabrera 2005 fototipo III		Presente fototipo II					
	1MED (250 J/m ²)		1SDD _{SA} (321 J/m ²)		1MED (210 J/m ²)		1MED (250 J/m ²)		$\frac{1}{4}$ MED (63 J/m ²)		1MDD (136 J/m ²)	
	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno
Santiago de Chile	21	119	12	73	10	56	16	52	4	14	4	14
Rosario	-	-	-	-	-	-	14	52	2	12	2	16
Punta Arenas	37	x	24	x	26	134	22	x	4	92	8	192

conversión a pre-vitamina D₃ en Buenos Aires y Ushuaia lo alcanzaron en diciembre. Este antecedente es semejante a los resultados obtenidos con los tres métodos de derivación de la E_{vitD} en Rosario, ya que el máximo valor ocurre en diciembre (Fig. 2).

Para una exposición a partir del mediodía solar, en el periodo junio 2019 - mayo 2020 se estimaron los TES hasta alcanzar las diferentes dosis (Fig. 3). En invierno los TES para alcanzar 1 MDD, se encuentran en promedio a los 14±5 minutos, mientras que para acumular $\frac{1}{4}$ MED a los 11±3 minutos y para la aparición de eritema (1 MED) a los 47±15 minutos. En verano, en promedio se requieren 4±1 min para alcanzar la dosis mínima de pre-vitamina D₃, para $\frac{1}{4}$ MED 4±1 min y 15±2 min para la eritémica. Los TES para obtener 1 MDD y $\frac{1}{4}$ MED tuvieron valores semejantes, con una diferencia promedio de 1 min en ambas temporadas.

Para extender el análisis a otras latitudes, se incorporaron los valores de los TES obtenidos por dos estudios.^{22,23} Estos TES se muestran en la Tabla 2 para los fototipos y dosis. Diaz et al. 2011 considera una SDD_{SA} (ponderada por el espectro de vitamina D₃), para una exposición del 9 % del cuerpo (sólo la cabeza). Los valores para las ciudades de Santiago de Chile y Punta Arenas, también fueron estimados con el modelo TUV en dos fechas particulares de verano e invierno. Los TES para acumular un MED, en los tres estudios mostraron una ligera concordancia. Sin embargo, en invierno Punta Arenas no alcanzó la dosis, excepto en lo obtenido por Cabrera, posiblemente porque la dosis considerada es menor a las otras. Los TES en Santiago de Chile para acumular un MDD, fueron más largos en el trabajo de Díaz et al. 2011 que en el presente estudio. El mismo trabajo reveló que 1 MDD para Buenos Aires en verano, es alcanzada a los 13 min. A pesar de que esta ciudad se encuentra a 300 km de Rosario, los TES se extienden también poco más del triple respecto al promedio obtenido con el modelo TUV (4±1 min). Esta diferencia se debe a que en nuestras estimaciones se considera un área de piel expuesta mayor (25 % del cuerpo).

VIII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El modelo TUV y la Ec. de Herman mostraron valores semejantes de E_{vitD} debido a que ambos métodos consideran el O₃ y el θ como principales elementos de influencia. Sin embargo, los aerosoles atenúan la radiación solar UV de manera importante entre

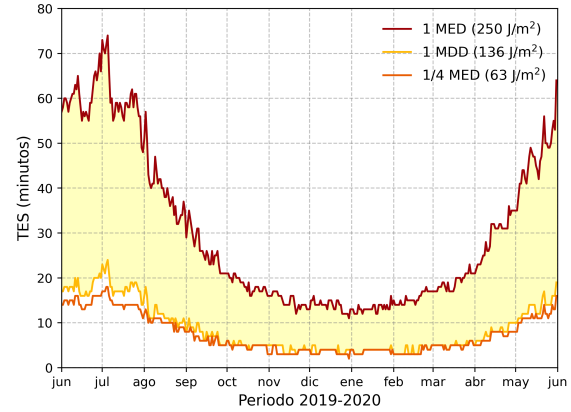


Figura 3: TES diarios para acumular $\frac{1}{4}$ MED, 1MDD y 1MED en una persona de un fototipo de piel II comenzando la exposición a partir del mediodía solar.

mayo y agosto, cuando suelen tener lugar incendios en el Delta del río Paraná frente a Rosario.²⁴ Respecto a los valores derivados del Coeficiente de proporcionalidad, aunque su aplicación es práctica, la aproximación depende del factor k de cada época del año.

El análisis comparativo de los TES para las MDD reveló que las principales diferencias se deben a las siguientes características: 1) la superficie expuesta del cuerpo (relacionada al valor de la dosis), 2) las condiciones de cielo (despejado o nublado) y 3) la presencia de contaminación atmosférica. Por otro lado, estimamos que un MED en Rosario se alcanza en promedio a los 15±2 min en verano, los cuales se encuentran en el rango esperado de acuerdo a la latitud. Los TES calculados para una MDD y $\frac{1}{4}$ MED indicaron una diferencia promedio entre ambos de 0.5 min en verano y 3 min en invierno. Por lo tanto, es posible derivar los TES con relativa precisión, a partir de la estimación de un MED.

El modelo TUV, la Ec. de Herman y el Coeficiente de proporcionalidad estiman valores de E_{vitD} para cielo despejado, en consecuencia estos TES podrían ser considerados como un límite de tiempo mínimo de la exposición al sol, mientras que los TES para acumular un MED pueden ser tomados como límite de tiempo superior. De esta manera, podríamos obtener niveles adecuados de vitamina D, evitando las consecuencias en la Salud que provoca su deficiencia, sin los efectos nocivos que conlleva la sobreexposición so-

lar. Este estudio podría extenderse en un futuro para analizar la contribución de los aerosoles troposféricos, así como la mezcla en altura con la capa límite atmosférica en eventos de quema de biomasa.

IX. REFERENCIAS

1. Bikle D. Vitamin D Metabolism, Mechanism of Action, and Clinical Applications. *Chemistry & Biology*. 2014;21(3):319–329.
2. Zuluaga Espinosa NA, Alfaro Velásquez JM, Balthazar González V, Jiménez Blanco KE, Campuzano Maya G. Vitamina D: nuevos paradigmas. *Medicina y Laboratorio*. 2011;17(5-6).
3. Pozzo MJ. Vitamina D: Acciones no clásicas. *Actualizaciones en Osteología*. 2005;1:28–33.
4. Afzal S, Bojesen SE, Nordestgaard BG. Reduced 25-hydroxyvitamin D and risk of Alzheimer's disease and vascular dementia. *Alzheimer's & Dementia*. 2013;10(3):296–302.
5. Kravietz A, Kab S, Wald L, Dugravot A, Singh-Manoux A, Moisan F, Elbaz A. Association of UV radiation with Parkinson disease incidence: A nationwide French ecologic study. *Environmental Research*. 2017;154:50–56.
6. Ishikawa LLW, Colavite PM, de Campos Fraga-Silva TF, Mimura LAN, França TGD, Zorzella-Pezavento SFG, Chiuso-Minicucci F, Marcolino LD, Penitenti M, Ikoma MRV, Sartori A. Vitamin D Deficiency and Rheumatoid Arthritis. *Clinical Reviews in Allergy & Immunology*. 2016;52(3):373–388.
7. Mercola J, Grant WB, Wagner CL. Evidence Regarding Vitamin D and Risk of COVID-19 and Its Severity. *Nutrients*. 2020;12(11):3361.
8. Biesalski HK, Köhrle J, Schümann K, eds. *Vitamine, Spurenelemente und Mineralstoffe*. Georg Thieme Verlag. 2002.
9. WHO. Global Solar UV Index: A Practical Guide. *Tech. rep.* 2002.
10. Brunser, O. Radiación ultravioleta y vitamina D. chap. 11 Radiación ultravioleta y Salud, p. 295 pp. Ed. Universitaria Ed. Cabrera, S. Lissi, E. y Honeyman, J. 2005;.
11. Olds WJ, McKinley AR, Moore MR, Kimlin MG. In vitro model of vitamin D3 (Cholecalciferol) synthesis by UV radiation: Dose–response relationships. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2008;93(2):88–93.
12. Holick MF. *Phylogenetic and evolutionary aspects of vitamin D from phytoplankton to humans*. *Vertebrate endocrinology: fundamentals and biomedical implications*, vol. 3. FL: Academic Press. 1989.
13. Gilaberte Y, Aguilera J, Carrascosa J, Figueroa F, de Gabriel JR, Nagore E. La vitamina D: evidencias y controversias. *Actas Dermo-Sifiliográficas*. 2011;102(8):572–588.
14. Modenese A, Bisegna F, Borra M, Grandi C, Gugliermetti F, Militello A, Gobba F. Outdoor work and solar radiation exposure: Evaluation method for epidemiological studies. *Medycyna Pracy*. 2016;67(5):577–587.
15. Fitzpatrick TB. The validity and practicality of sun-reactive skin types I through VI. *Archives of Dermatology*. 1988;124(6):869–871.
16. CIE 209:2014. *Nomenclature for UV Doses and Effects on Humans*. 2014.
17. Fioletov V, McArthur L, Mathews T, Marrett L. Estimated ultraviolet exposure levels for a sufficient vitamin D status in North America. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2010;100(2):57–66.
18. Dowdy JC, Sayre RM, Holick MF. Holick's rule and vitamin D from sunlight. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*. 2010;121(1-2):328–330.
19. Herman JR. Use of an improved radiation amplification factor to estimate the effect of total ozone changes on action spectrum weighted irradiances and an instrument response function. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115(D23).
20. Madronich S. Intercomparison of NO2 photodissociation and U.V. Radiometer Measurements. *Atmospheric Environment (1967)*. 1987;21(3):569–578.
21. Lu Z, Chen T, Holick M. *Influence of Season and Time of Day on the Synthesis of Vitamin D3*, pp. 53–56. De Gruyter. 2019;.
22. Diaz S, Vernet M, Paladini A, Fuenzalida H, De-ferrari G, Booth CR, Cabrera S, Casiccia C, Dieguez M, Lovengreen C, Pedroni J, Rosales A, Vrsalovic J. Availability of vitamin D photoconversion weighted UV radiation in southern South America. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 2011;10(12):1854.
23. Cabrera, S. Radiación ultravioleta y vitamina D. chap. 7 Radiación ultravioleta y Salud, p. 88 pp. Ed. Universitaria Ed. Cabrera, S. Lissi, E. y Honeyman, J. 2005;7.
24. Ipiña A, Salum G, Crinó E, Piacentini R. Satellite and ground detection of very dense smoke clouds produced on the islands of the Paraná river delta that affected a large region in Central

Argentina. *Advances in Space Research*. 2012;
49(5):966 – 977.