

^(a)DOCENTE DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
^(b)FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
^(c)UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO – PERÚ

Artículo recibido: 05 de Enero del 2012
 Aceptado para publicación: 18 de Junio del 2013

MODELO DE LA RADIACIÓN SOLAR UV-B PARA LA CIUDAD DE PUNO

Matías Huillca ^{a b c}

RESUMEN

En el presente trabajo se ha seleccionado el Método Paramétrico de la radiación solar ultravioleta, tipo B para determinar la radiación UV-B directa y difusa en la ciudad de Puno para un día claro y sin nubes, se ha considerado como dato de referencia 01 de enero y a las 12 horas, también su ubicación **latitud** -15.83° , **longitud** -70.03° y la **altura** de 3,824 km, Cuando $\alpha = 1,5$; $\beta = 0,1$, los resultados obtenidos para la irradiancia global fue $7,57 \text{ W/m}^2$, considerado como un valor muy alto para la región. Si consideramos las recomendaciones para los coeficientes de $\alpha = 1,25$ y $\beta = 0,73$ se obtiene una **irradiancia global de** $4,6158 \text{ W/m}^2$; estos valores nos sugieren la posibilidad de modificar los parámetros de α y β para ajustar el modelo, como se muestra en las comparaciones con los valores medidos para diferentes días, notándose una buena correlación entre el **modelo** y las **mediciones**. Para los cálculos de las ecuaciones paramétricas se ha recurrido a la programación en **Fortran**.

Se ha notado una influencia muy notoria en la disminución de la irradiación debido a la transmitancia de los aerosoles y la del ozono

Palabras clave: radiación, cielo claro

SOLAR RADIATION MODEL FOR UV-B PUNO

ABSTRACT

This paper was selected parametric method of direct and diffuse radiation, to determine UV-B in Puno for a clear day, it was considered as reference data for the model on January 1 and half day (12 hours), also its location latitude -16° , longitude -70° and height, when ;, the results obtained for the direct irradiance was high, whereas for the diffuse irradiation was, making an overall irradiation considered as a very high value for our region. If we follow the recommendations of Wright Gilmore [8] for the coefficients and obtain a global irradiance, these values suggest the possibility of modifying these parameters and to obtain the correct parameters measurements are needed in our environment when radiation. For calculations of the parametric

equations have been used to programming in Fortran. It has been noticed a very noticeable influence on the decrease in the transmittance due to irradiation aerosols. Ozone also decreases radiation but is much less compared with aerosols

Keywords: irradiance, transmittance

INTRODUCCIÓN

La radiación solar ultravioleta tipo B (UV-B) es muy nocivo para el ser humano, la exposición prolongada puede generar cáncer en la piel, cataratas, envejecimiento prematuro [5]. Debido a posición geográfica la ciudad de Puno alcanza valores muy altos la radiación solar UV-B, particularmente, cuando el cielo es claro y sin nubes

En la actualidad no se dispone de un modelo, que permita estimar y alertar sobre los efectos

de la radiación, el objetivo es proponer un modelo de la radiación solar, UV-B para la ciudad, en el desarrollo de este trabajo se muestra una serie de parámetros que se deben ser ajustados, según las mediciones efectuadas, varios autores ([3],[2],[8]) han propuesto diferentes modelos de para obtener la **Irradiancia directa normal, difusa y global**

MATERIALES Y MÉTODOS

La medición de la irradiancia solar tipo UV-B se realizó en la azotea del pabellón nuevo de la Ingeniería Civil ubicado dentro del campus de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, también en el mega laboratorio, dichas mediciones fueron realizadas con el instrumento marca **DELTAOHM** modelo **HD 2102.2** foto radiómetro (sensor) **LP 471 UVB**, rango (280-315)nm, como se muestra en la figura siguiente.



Figura 2.1 Lugar de medición Pabellón nuevo - Ingeniería Civil-UNAP.

Se ha registrado los datos para un determinado día claro cada 30 minutos y en otros días cada 5 minutos en un plano horizontal. A partir de la integración de la ecuación (21) en un rango [280.315]nm, se obtuvieron los valores estimados de la irradiancia solar UV-B global, estos posteriormente fueron comparados con valores

medidos. Se relata una serie de expresiones tomadas básicamente IQBAL ([8]-1983) y otros autores, con las que se ha formulado el modelo paramétrico para estimar la irradiancia de la componente directa y difusa, para luego obtener la irradiancia global como la suma apropiada de ambas componentes

2.1 Método Paramétrico de la Radiación UV-B directa

La irradiancia directa en una superficie horizontal a nivel del suelo, para un espectro de longitud de onda que abarca la región UV (280-315) no son afectados por el agua, y, debido a que en esta región del espectro solar no ocurre la absorción de la radiación UV, la expresión para la irradiancia directa es:

$$I_h = I_{0n} E_0 T_R T_a T_{o3} \cos(sza) \quad (1)$$

Donde

I_{0n} es la constante solar espectral a la distancia media Tierra – Sol

E_0 es el factor de corrección para la distancia Tierra-Sol

T_R Es la transmitancia de Rayleigh

T_a es la transmitancia de los aerosoles

T_{o3} es la transmitancia del ozono

E_0 se obtiene de la siguiente expresión (Spencer, 1971)

$$E_0 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) \quad (2)$$

Donde Γ se conoce como el ángulo del día, y esta dado por

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (3)$$

Donde d_n es el día juliano, variando 1 para el primero de enero y 365 para el 31 de diciembre, ϕ es el ángulo cenital del lugar, en grados, el cual se obtiene de la siguiente forma:

$$\cos(sza) = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega \quad (4)$$

Donde :

ϕ es la latitud geográfica, en grados, sur negativo

ω es el ángulo horario solar, cero el mediodía y en la mañana positivo

δ , es la declinación, es la posición angular del

sol al mediodía solar con respecto al plano del Ecuador, sur negativo, en grados. Se obtiene de la siguiente relación (Spencer, 1971)

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos(\Gamma * \pi / 180) + 0.070257 \sin(\Gamma * \pi / 180) - 0.006758 \cos(2 * \Gamma * \pi / 180) + 0.000907 \sin(2 * \Gamma * \pi / 180) - 0.002697 \cos(3 * \Gamma * \pi / 180) + 0.00148 \sin(3 * \Gamma * \pi / 180) \quad (5)$$

La presión local, esta dado por la siguiente expresión:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{z}{7.19}\right) = 1013.25 \exp\left(-\frac{z}{7.19}\right) \quad (6)$$

z es la altura por ejemplo para la ciudad de Puno $z = 3,825 \text{ km}$

2.1.1 La Masa relativa, según **Kasten [16]** es:

$$m_r = \frac{1}{\cos(sza) + 0.15(93.885 - sza)^{-1.253}} \quad (7)$$

2.1.2 La Masa de aire óptico m_a

esta dado por

$$m_a = m_r \left(\frac{P}{1013,25}\right) \quad (8)$$

Donde P es la presión local,

2.1.3 Transmitancia debido al Ozono

Se tiene la siguiente expresión para la transmitancia del Ozono (**[3] Iqbal, 1983**)

$$T_{o3} = 1 - \left[0.1611 U_3 (1 + 139.48 U_3)^{-0.3035} - \frac{0.00275 U_3}{1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2} \right] \quad (9)$$

Siendo $U_3 = m_r l$ donde l es el espesor de la capa de ozono en cm

2.1.4 Transmitancia de los Aerosoles

parametrizada por machler [18] viene expresada en función de m_a y de los coeficientes de **angstrom [1]** como:

$$T_{a\lambda} = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.125\alpha) \exp[-\beta m_a (1.089\alpha + 0.5123)] \quad (10)$$

Según los reportes de la literatura $\alpha = 1.5$, $m_a = 0.5916$ tenemos la siguiente ecuación reducida

$$T_a = 0.2 + 0.8155 \exp(-1.27\beta) \quad (11)$$

Los trabajos de **Gueymard, [2]** nos proporcionan una **formula empírica de beta** en función de la **visibilidad**, que es la siguiente:

$$\beta = 0.55^\alpha \left(\frac{3.912}{V} - 0.01162 \right) (0.02472(V - 5) + 1.132) \quad (12)$$

2.1.5 Transmitancia de Rayleigh

Una expresión parametrizada entre otros por **Louche et al [4]**, así la transmitancia debida a la dispersión de Rayleigh se puede expresar como:

$$T_R = \exp(-0.0903 m_a^{0.84} (1 + m_a - m_a^{1.01})) \quad (13)$$

2.2 Método Parametrico de la Radiación UV-B Difusa

Siguiendo el modelo parametrizado de **M. Iqbal [3]** podemos expresar la irradiancia difusa recibida por un plano horizontal como:

$$I_{d\lambda} = I_{Rd\lambda} + I_{da\lambda} + I_{dm\lambda} \quad (14)$$

$I_{dR\lambda}$ Es la irradiancia UV-B difusa espectral producido por la dispersión de Rayleigh que llega al suelo después de su primer paso a través de la atmosfera

$I_{da\lambda}$: Es la irradiancia UV-B difusa espectral producido por lo aerosoles que llegan al suelo después de su primer paso a través de la atmosfera

$I_{dm\lambda}$: Es la irradiancia UV-B difusa espectral producido por las múltiples reflexiones entre el suelo y la atmosfera

2.2.1 La irradiancia UV-B difusa espectral producido por la dispersión de Rayleigh

se obtiene de la siguiente relación:

$$I_{Rd\lambda} = I_{0n\lambda} \text{Cos}(sza) T_{o3} [0.5(1 - T_{R\lambda}) T_{a\lambda}] \quad (15)$$

2.2.2 La irradiancia difusa dispersada por los aerosoles $I_{da\lambda}$

que llega al suelo después de su primer pasa a través de la atmosfera se obtiene a partir de la siguiente relación

$$I_{da\lambda} = I_{0n\lambda} \text{Cos}(sza) T_{ma\lambda} [F_c \omega_0 (1 - T_{a\lambda}) T_{R\lambda}] \quad (16)$$

F_c : Es el factor que se define como el cociente entre la energía dispersada en la dirección entrante y la energía dispersada total

ω_0 : Es la dispersión simple del albedo definido como el cociente entre la energía dispersada y la energía total atenuada por los aerosoles (sin dimensiones), para aerosoles no absorbentes se pueden asumir $\omega_0 = 0.5$ (**Iqbal.1983 [3]**)

Se utilizo la expresión de **Robinson (1962, [19])** que relaciona F_c y sza para cualquier hora del día

Esta expresión es la siguiente

$$F_c = 0,9003 + 0,00325(sza) - 0,0494 \times 10^{-5} x (sza)^2 \quad (17)$$

2.2.3 La irradiancia difusa espectral producido por múltiples reflexiones $I_{dm\lambda}$

se obtiene mediante la siguiente relación:

$$I_{dm\lambda} = Q_\lambda \left(\frac{\rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}} \right) \quad (18)$$

Donde:

Q_λ : es la irradiancia difusa resultante de múltiples reflexiones entre el suelo y la atmosfera Definida de la siguiente manera

$$Q_\lambda = (I_{dR\lambda} + I_{da\lambda}) + I_{n\lambda} \text{Cos}(sza) \quad (19)$$

Donde

$\rho_{a\lambda}$: es el albedo de la atmosfera, el cual constituye la componente difusa reflejada de nuevo al espacio, se obtiene en forma aproximada como:

$$\rho_{a\lambda} = T_{ma\lambda} [0,5(1 - T_{R\lambda})T_{a\lambda} + (F_c - T_{R\lambda})\omega_0(1 - T_{a\lambda})T_{R\lambda}] \quad (20)$$

El valor del albedo de la atmosfera $\rho_{a\lambda}$ es muy pequeño, se utiliza el albedo del suelo $\rho_{g\lambda} = 0,2$ Por tanto la irradiancia global es

$$I_G = I_{0n} E_0 T_R T_a T_{o3} \cos(sza) + I_{Rd\lambda} + I_{ad\lambda} + I_{md\lambda} \quad (21)$$

Finalmente se recurre al lenguaje de programación en **FORTRAN** para el modelo

RESULTADOS

Para nuestro modelo se ha considerado arbitrariamente el primero de enero $d_n = 1$, también la latitud, presión local. Utilizando la expresión (1) se obtiene:

$$I_G = 9,9044 * T_R T_a T_{o3} (0.1079 + 0.8844 \cos\omega) W / m^2 \quad (22)$$

Considerando $\alpha = 1.5$ $\beta = 0,1$, y espesor de ozono igual a 250 UD ; se determina partir de las relaciones anteriores, las respectivas transmitancias, para luego obtener la radiación global que llega a la superficie de la tierra el **1º de enero al medio día** cuyo valor es:

$$I_{UVB-G} = 7,5744 W / m^2 \quad (23)$$

DISCUSIÓN

Si consideramos el artículo de **Jaime Wright** que utiliza los valores de $\alpha = 1,25$

, $\beta = 0.73$ y $m_a = 0,5916$ se tiene la Irradiancia global en función del ángulo horario que llega a la superficie terrestre es:

$$I_{UVB-G} = 4,6158 * (0.1079 + 0.8844 \cos\omega) W / m^2 \quad (24)$$

Mientras que si consideramos los valores de $\alpha = 1,5$, $\beta = 0.1$ y la radiación global es:

$$I_{UVB-G} = 7,574466 * (0.1079 + 0.8844 \cos\omega) W / m^2 \quad (25)$$

La figura 4.1 resume lo dicho líneas arriba

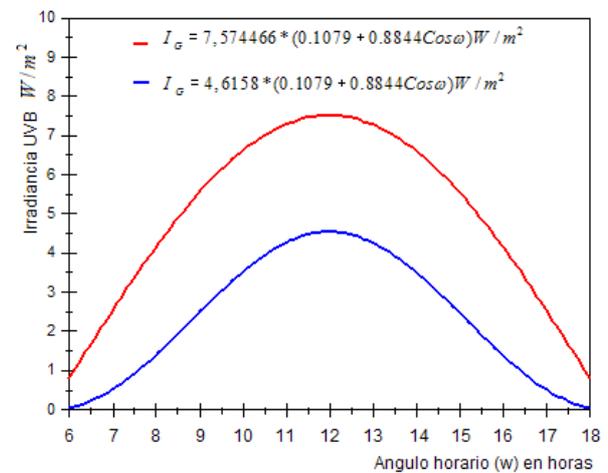


Figura 4.1 Variación de la Irradiancia UV-B debido a las transmitancias, para alfa 1.5 y beta 0.1; y alfa 1.25 y beta 0.73 en función del ángulo horario

Se observa también que la radiación solar máxima ocurre aproximadamente a las 12pm y tiene un descenso muy notorio al variar los parámetros α, β de los aerosoles

Para validar nuestro modelo se ha comparado los valores estimados con las mediciones, para diferentes días claros y sin nubes del año, como se muestra en las siguientes figuras

Las figuras 4.2; 4.3; 4.4; 4.5; 4.6; 4.8; 4.9; 4.10; 4.11; 4.12 muestran un buena correlación entre los valores medidos y calculados, se ha conside-

rado el ajuste desde las 10:00 hasta las 13:00, esto debido a que el **pico** de la radiación es aproximadamente a las **11:30 am**, es posible ampliar el intervalo el día, por ejemplo desde las **9:00** hasta las **14:00**, para ello se necesita un **factor de ajuste** para el modelo, siendo necesarios realizar más mediciones

También las figuras nos muestran los picos de radiación; para el mes de **noviembre** fue **5.6 w/m²** mientras que para el mes de **octubre** es **4,586 W/m²**, notándose un **incremento** en el mes noviembre. Esto se puede explicar debido al acercamiento de la tierra respecto al sol y probablemente también a otros efectos climáticos, se espera que en el mes de diciembre y enero se tenga valores muy elevados de la radiación UVB

A partir de estos valores de los picos de radiación UVB se puede calcular, mediante una fórmula sencilla, los **índices de radiación ultravioleta (IUV)**, siendo estos valores **superior a 14**, muy por encima a los permitidos por la **OMS** y por ende **muy peligrosa para la salud**, siendo necesario alertar a la población de los efectos nocivos, como la vista, cáncer a la piel, etc.

Con los resultados de este trabajo se puede determinar (cálculo del **eritema de la piel**); esto para que las personas eviten la exposición directa en cielos claros el **intervalo de tiempo de exposición** [10:00 hasta las 3:00]

En la figura 4.7 para el día 10 de noviembre **no** se observa una **buena correlación**, esto debido a que el cielo fue parcialmente nublado, esto quiere decir que el **modelo nos es válido para cielos parcialmente o totalmente nublados**

Para validar el modelo parametrico en la ciudad de Puno, es necesario **realizar mediciones** al menos **durante un año**, también se recomienda realizar las mediciones en otras localidades de la región Puno

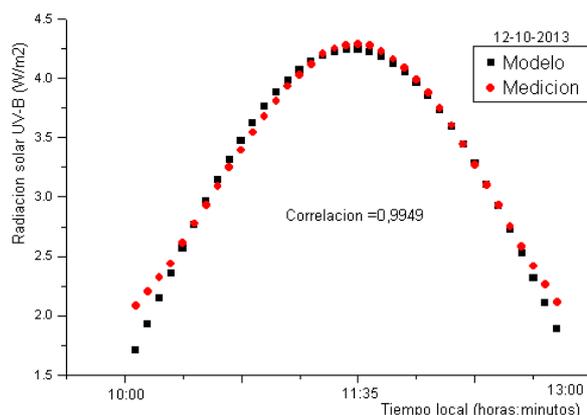


Figura4.2 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 12 de Octubre

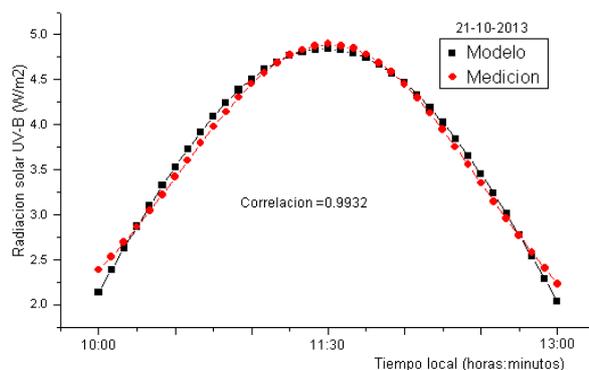


Figura4.3 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 21 octubre

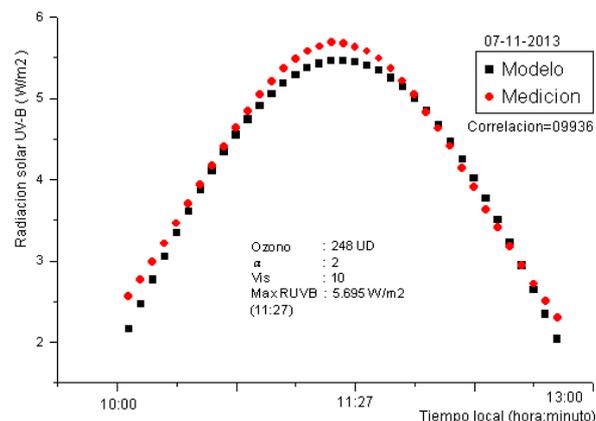


Figura: 4.4 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 07 de noviembre

MODELO DE LA RADIACIÓN SOLAR UV-B PARA LA CIUDAD DE PUNO

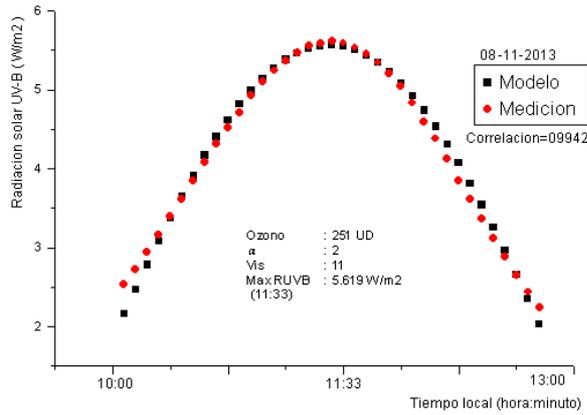


Figura: 4.5 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 08 de noviembre

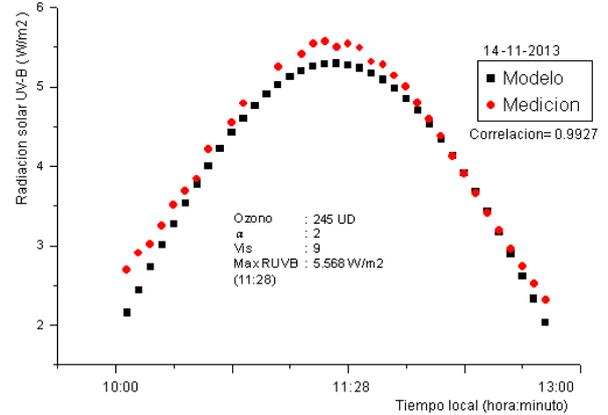


Figura: 4.8 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 12 de noviembre

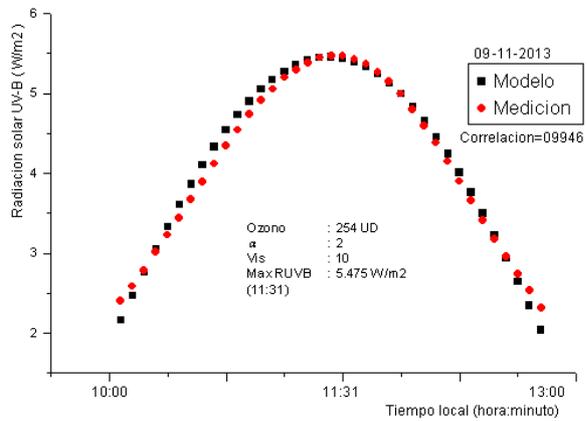


Figura: 4.6 variación diaria de la radiación UV-B Observada y estimada 09 de noviembre

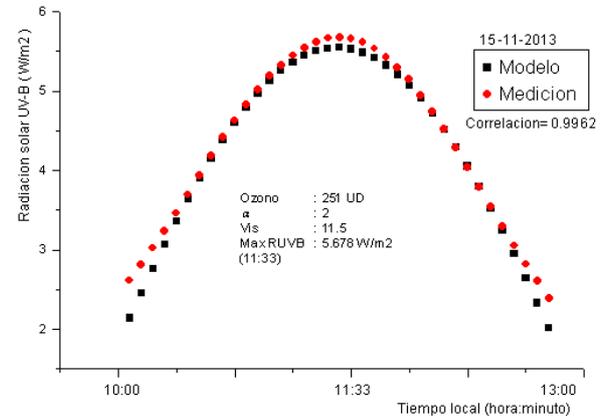


Figura: 4.9 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 12 de noviembre

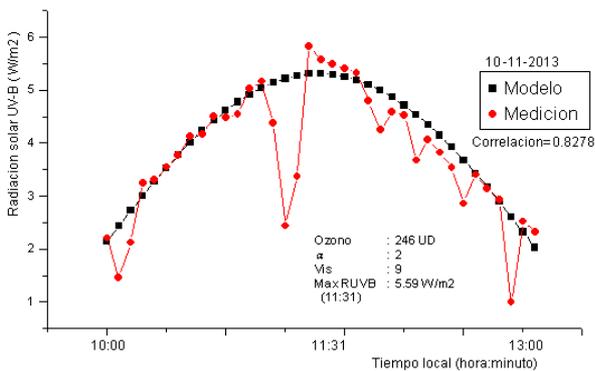
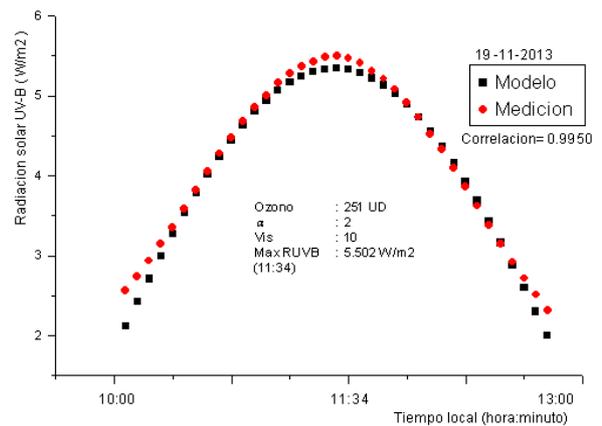


Figura 4.7 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 10 de noviembre cielo parcialmente nublado



FigFigura: 4.10 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 12 de noviembre

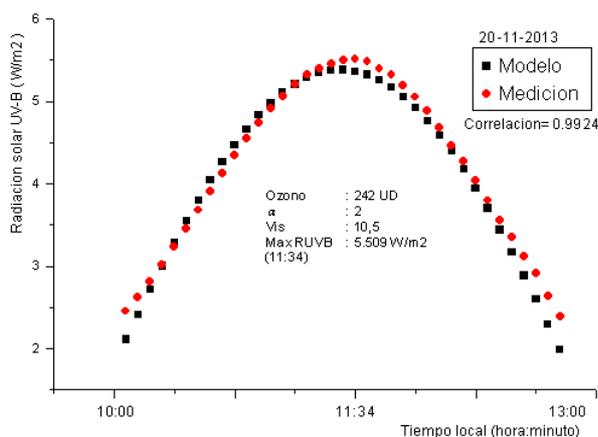


Figura: 4.11 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 20 de noviembre

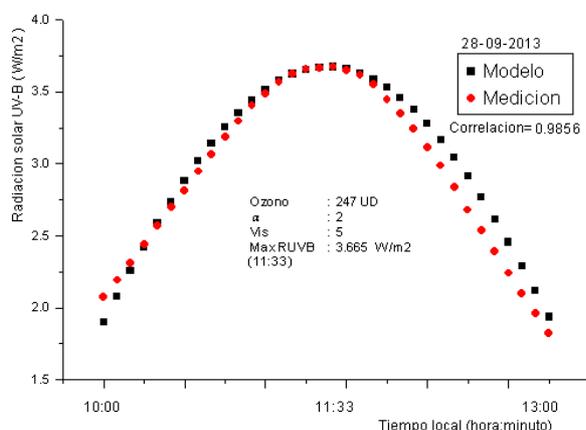


Figura: 4.12 variación diaria de la radiación UV-B observada y estimada 28 de setiembre

AGRADECIMIENTO

Al Lic. **Ciro W. Taípe** por la programación del modelo, también al Lic. Guido Quispe L, finalmente al laboratorio de física de la E.P de físico-matemáticas, por las facilidades brindadas en los equipos de medición

CONCLUSIONES

Para el modelo se asumió arbitrariamente el 1ero de enero, las 12 horas y los valores de **alfa 1.5** y **beta 0.1** obteniéndose una **Irradiación global máxima** de $7,57 \text{ W/m}^2$, mientras que para los valores de **alfa =1,25** y **beta =0,73** se

obtiene una **Irradiación global máxima** de $4,6158 \text{ W/m}^2$. Esto indica que podemos variar dichos parámetros para ajustar nuestro modelo a los valores medidos. Para tener un modelo **viable** en la ciudad de **Puno**, se debe realizar mediciones durante periodos largos de tiempo, esto para realizar los ajustes de los valores calculados con los valores medidos.

El modelo paramétrico de irradiación solar tiene una buena correlación entre las 10am hasta las 13 pm siendo necesario ampliar el intervalos de tiempo.

Con los valores medidos para diferentes fechas del día claro y sin nubes, los valores medidos para los meses de setiembre, octubre y noviembre se observa un aumento de la radiación solar máxima, esto se puede explicar como el acercamiento de la tierra respecto al sol, probablemente también a otros efectos climáticos. En intervalo de tiempo [10:30-12:30] los valores son muy elevados y nocivos para la salud, recomendando evitar la exposición directa

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ångström, A (1961). Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus* 13, 214-223.
- [2] Gueymard C. A. (2003). Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 355-379.
- [3] Iqbal M. (1983) *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- [4] Louche A.,Maurel M.,Simonnot O, Peri G e Iqbal M. (1987). Determination of Angstrom's turbidity coefficient from direct solar irradiance measurements. *Solar Energy* 38, 89-96.
- [5] Pedrós R., Utrillas M., Martínez-Lozano J. y Tena F. (1999). Values of broadband

- turbidity coefficients in a mediterranean coastal site. *Solar Energy* 66, 1, 11-20.
- [6] Pinazo J., Cañada J. y Bosca J. (1995). A new method to determine Angstrom turbidity coefficient: its application for Valencia. *Solar Energy* 54, 219-226.
- [7] Yang K., G. W. Huang y Tamai N. (2001). A hibrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy* 70, 1, 13-22
- [8] Jaime Wright Gilmore (2010) medición y predicción de la radiación solar global UV-B bajo cielos claros y sin nubes Departamento de Física, Universidad Nacional Heredia Costa Rica 2010- UNICIENCIA 24 pp. 111-121
- [9] G. M. Saluma, y R. D. Piacentini (2007) desarrollo de un algoritmo para la modelización de la radiación solar global y del control de datos – Octubre
- [10] Raúl Escamilla Canales (2010) Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales, Universidad Politécnica de Cataluña
- [11] Jose V. Bosca, Jose M. Pinazo, Javier Cañada (1993) obtención del coeficiente de turbidez atmosférica de Angstrom de Valencia y Sevilla Utilizando medida de radiación solar directa Departamento de termodinámica aplicada Universidad politécnica de Valencia – España
- [12] Spencer J. W (1971) Fouries series representation of the position of the sun *Search* 2(5), 172
- [13] Leckner, B. (1978) The spectral distribution of solar of solar radiation at the earth surface- elements of model. *Solar Energy* 38, 89-96
- [14] R.E. Bird and R.L. Hulstrom (1981) A simplified clear sky model for direct and difusse insolation on horizontal surfaces. SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute, Golden Colorado
- [15] F.Tena; J.A. Martines-Lozano y M.R Utrillas (1998) radiación solar ultravioleta y prevención de eritema, *revista española de física*
- [16] F.A. Kasten (1966) A new tabla and aproxímate formula for relative optical air mass. *Arch Meteorol Geophys Bioklimatol, Ser B14,206-223*
- [17] Curite W. Sellers (1985) Atmospheric turbidity at Tucson Arizona 1956-83: variations and their causes *Appl. Meteorol.* 24,725-735.
- [18] M.A Machtler Parametrization of solar irradiation under clean skies *M.A. Sc. Thesis, university of British Columbia Vancouver*
- [19] Robinson, N. (1962) *Solar Radiation. American Elsevier, NewYork*