



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA



#### TESIS

#### ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR

#### ULTRAVIOLETA EN LA CIUDAD DE PUNO

#### PRESENTADA POR:

**MATIAS HUILLCA ARBIETO**

#### PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAGISTER SCIENTAE EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PUNO, PERÚ**

**2023**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RADIACIÓN  
SOLAR ULTRAVIOLETA EN LA CIUDAD D  
E PUNO.docx**

AUTOR

**MATIAS HUILLCA ARBIETO**

RECUENTO DE PALABRAS

**22198 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**117672 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**128 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**6.2MB**

FECHA DE ENTREGA

**Oct 30, 2023 10:47 AM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Oct 30, 2023 10:50 AM GMT-5**

● **18% de similitud general**


El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Cro.

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)



  
Dr. Geyman Belizario Quispe  
DOCENTE - UNA - PUNO



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA



#### TESIS

#### ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RADIACIÓN SOLAR

#### ULTRAVIOLETA EN LA CIUDAD DE PUNO

#### PRESENTADA POR:

**MATIAS HUILLCA ARBIETO**

#### PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

#### MAGISTER SCIENTAE EN INGENIERÍA AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO

PRESIDENTE

.....  
Dr. JOSE JUSTINIANO VERA SANTA MARIA

PRIMER MIEMBRO

.....  
Dr. JUAN REYNALDO PAREDES QUISPE

SEGUNDO MIEMBRO

.....  
M.Sc. ROBERTO ALFARO ALEJO

ASESOR DE TESIS

.....  
Dr. GERMAN BELIZARIO QUISPE

ÁREA : Ciencias de la Ingeniería

TEMA: Estimacion del indice de Radiacion Solar Ultravioleta en la ciudad de Puno

LÍNEA: Recursos Naturales y Medio Ambiente

Puno, 20 de julio de 2021



## DEDICATORIA

Por una cuestión de **fe**, a lo que trasciende más allá de nuestra existencia, porque nos dio el libre albedrío de buscar un propósito, en este intervalo de tiempo que denominamos vida.

A mi linda Mamá, hermanos y familia con quienes interactúo con buenas y malas noticias como parte de la vida; a la memoria de mi Papá Luciano y mi hermana María que mis ojos ya no ven. También que sea un motivo de ejemplo para mi esposa María Paz y mi princesa Analía.

*Lo que los humanos buscamos en la historia de la creación es una manera de experimentar el mundo que nos abra a lo trascendente, que nos informe y al mismo tiempo nos forme dentro de ella. Esto es lo que quiere la gente. Esto es lo que nos pide el alma.*

**Joseph Campbell**



## AGRADECIMIENTO

Expreso mi sincera gratitud y especial al Dr. Germán Belizario Quispe, asesor de tesis por la orientación invaluable en el desarrollo del trabajo de investigación.

Al laboratorio de física de la E.P de Cs. Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano por los datos proporcionados.

Finalmente, a la Maestría de Ciencias de la Ingeniería Agrícola, mención Ingeniería Ambiental, que me permitió evolucionar en mi saber mediante la catedra de los docentes.



## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

### CAPÍTULO I REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	3
1.1.1. El Sol	3
1.1.1.1. Estructura del sol	3
1.1.2. Emitancia y espectro de la radiación solar	4
1.1.3. La constante solar	5
1.1.4. Factores moduladores de la radiación solar sobre la superficie Terrestre	8
1.1.5. Factores geométricos	8
1.1.5.1. Declinación solar $\delta$	10
1.1.5.2. Ángulo cenital $Z$	11
1.1.5.3. Ángulo horario $\omega$	12
1.1.5.4. Ecuación del tiempo	14
1.1.6. Factor atmosférico	15
1.1.6.1. Gases atmosféricos	15
1.1.6.2. Ozono	17
1.1.6.3. Nubes	18
1.1.6.4. Aerosoles	19
1.1.6.5. Albedo	20

1.1.6.6. Altura sobre el nivel del mar	21
1.1.7. El espectro de acción eritemático	24
1.1.8. El índice ultravioleta (IUV)	26
1.1.9. Modelo espectral del índice de radiación ultravioleta	27
1.1.9.1. Transmitancia por dispersión de Rayleigh $T_{r\lambda}$	28
1.1.9.2. Transmitancia por extinción de aerosol $T_{a\lambda}$	30
1.1.9.3. Transmitancia por absorción de ozono $T_{o\lambda}$	31
1.1.9.4. Irradiancia difusa $I_{d\lambda}$	34
1.1.9.5. Irradiancia difusa debido a la dispersión de Rayleigh	34
1.1.9.6. Irradiancia difusa debido a la dispersión de Aerosoles	34
1.1.9.7. Irradiancia múltiple $I_{dm\lambda}$	34
1.1.10. Otros modelos de estimación	36
1.2. Antecedentes	37
1.2.1. Antecedentes a nivel internacional	37
1.2.2. Antecedentes a nivel nacional	39
1.2.3. Antecedentes a nivel locales	40

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	41
2.2. Enunciados del problema	42
2.2.1. Problema general	42
2.2.2. Problemas específicos	42
2.3. Justificación	42
2.4. Objetivos	43
2.4.1. Objetivo general	43
2.4.2. Objetivos específicos	43
2.5. Hipótesis	43
2.5.1. Hipótesis general	43
2.5.2. Hipótesis específicas	44



### **CAPÍTULO III**

#### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1	Lugar de estudio	45
3.1.1	Ubicación geográfica	45
3.1.2	Ubicación política	46
3.1.3	Territorio	47
3.1.4	Aspectos sociales	47
3.1.5	Aspectos socio-económicos	47
3.2	Población	47
3.3	Muestra	47
3.4	Métodos de investigación	47
3.5	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	48

### **CAPÍTULO IV**

#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Comportamiento del IUV y la Rad durante el periodo de medidas	54
4.2	Variabilidad de la capa de ozono	57
4.3	Análisis estadístico	58
4.4	Tipos de días	60
4.5	Comportamiento horario del IUV	62
4.6	Relación del IUV a partir de la radiación solar global para cielos sin presencia de nubes	66
4.7	Estimación del IUV para cielos sin presencia de nubes	72
4.8	Estimación del IUV para cielos parcialmente nublados	77
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>90</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>91</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>92</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>103</b>





## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Categoría de exposición a la radiación ultravioleta	26
2. Comportamiento de los indicadores estadísticos del IUV	58
3. Clasificación de los días Tipo A, Tipo B y Tipo C	60
4. IUV horario acumulado del mes de enero	63
5. IUV horario acumulado durante le periodos de estudios.	64
6. Datos del IUV y Rad del 01 de junio del 2016.	67
7. Ecuaciones empíricas y su coeficiente de determinación para cielos claros.	69
8. Coeficiente de correlación lineal de los años 2016, 2017 y 2018	70
9. Comportamiento horario del IUV, día 19 de noviembre 2016	72
10. Procedimiento para calcular el IUV	73
11. Determinación de los parámetros A y B para cada hora	82
12. Equivalencia entre la hora (LAT) y el $\cos Z$	84
13. Indicadores estadísticos del modelo para cielos parcialmente despejados	88



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Estructura del Sol	4
2. Espectro de radiación solar	5
3. Distribución espectral de la radiación	7
4. Espectro de la radiación ultravioleta tipo B	8
5. Órbita de la Tierra alrededor del Sol	9
6. Factor de corrección	10
7. Declinación solar	11
8. Comportamiento de la declinación solar	11
9. Angulo cenital y altura solar.	12
10. Irradiación extraterrestre	13
11. Ecuación del tiempo	14
12. Dispersión de Rayleigh y Mie	16
13. Esquema de la transmitancia atmosférica	24
14. Espectro de acción eritemático	25
15. Exposición al IUV	27
16. Masa relativa óptica	29
17. Transmitancia de Rayleigh	30
18. Transmitancia de los aerosoles en este intervalo	31
19. Masa óptica del ozono en función del ángulo cenital	32
20. Transmitancia del ozono en función de la longitud de onda	33
21. Producto de las tres transmitancias	33
22. Crecimiento de dos tipos plantas (Zhang, 2014)	38
23. Alteración en la piel de los peces (Sweet, 2012)	39
24. Ubicación de la ciudad de Puno	46
25. Estación meteorológica ubicada en la UNA-PUNO	50
26. Consola donde se almacenan los datos reportados por la estación	50
27. Salida visual de los datos mediante el Software Weatherlink	51
28. Almacenamiento de los datos en el Software Weatherlink	51
29. IUV y la Rad durante enero 2016 a diciembre del 2018	54
30. Valores $IUV_{max}$ y el $Rad_{max}$ durante el periodo de medidas	55
31. Declinación solar con el IUV max diario	56
	vii



32. Capa de ozono y el IUV <sub>máx</sub> diario	57
33. Comportamiento de los indicadores estadísticos	59
34. Número de días de cielos claros	61
35. Número de días de cielos nublados	61
36. Comportamiento mensual del IUV	62
37. IUV promedio horario acumulado del mes de enero	63
38. IUV promedio horario acumulado de enero a diciembre	64
39. Isolíneas del IUV y representación gráfica en 3 dimensiones	65
40. IUV mensual acumulado de enero a diciembre	66
41. IUV, Rad del día 01 de junio del 2016 sin presencia de nubes	68
42. IUV, Rad años 2016, 2017 y 2018	70
43. IUV medido, estimado y el IUV total, tipo B y tipo A	74
44. Comparación de los valores calculados y estimados del IUV	75
45. Comparación de los valores calculados y estimados del IUV	75
46. Estimación del modelo utilizando el Matlab	76
47. Comparación de diversos modelos para estimar el IUV	77
48. Input del SMARTS para el IUV	79
49. Input del SMARTS para la Rad	80
50. Distribución del CMF <sub>IUV</sub> en función del CMF <sub>Rad</sub>	81
51. Cálculo de los parámetros A y B para cada hora	82
52. Cálculo de a, b, c y d, a partir de los parámetros A y B y el $\cos Z$	84
53. IUV estimado vs IUV medido, 9 de noviembre del 2017 ( $R^2= 0.94917$ )	85
54. IUV estimado vs IUV medido, 11 de noviembre del 2017 ( $R^2= 0.99203$ )	86
55. IUV estimado vs IUV medido, 12 de noviembre del 2017 ( $R^2= 0.98766$ )	86
56. IUV estimado vs IUV medido, 13 de noviembre del 2017 ( $R^2= 0.98723$ )	86
57. Día 20 de marzo y 27 de abril del 2018	87
58. IUV estimado vs IUV medido, 7 ene y 2 feb del 2018	87



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Certificado de Calibracion de la estacion metereolgica	103
2. Expresiones para parametros estadisticos	105
3. Códigos fuente de la ecuación (2.75) para estimar el IUUV	108
4. Registro de datos con cielo nublado del año 2018	112

## RESUMEN

Según la Organización Mundial de la Salud. El índice ultravioleta superiores a 12 son muy nocivos para el ser humano, siendo interés mundial, conocer y modelar su comportamiento. La ciudad de Puno debido a su geografía, tiene altos valores en ciertas estaciones del año. El objetivo es estimar el índice ultravioleta a partir de los factores atmosféricos y geométricos respecto a la Tierra. Los datos del índice ultravioleta y la irradiación solar global fueron proporcionados por la estación meteorológica marca Davis. En la metodología se utilizó el indicador estadístico el coeficiente de determinación, mientras que, para validar el modelo, se aplicó el MBE, MABE y RMSE. Los datos muestran que el factor geométrico declinación solar, ángulo azimutal y el factor atmosférico de la capa de ozono, inciden directamente en el comportamiento anual del índice ultravioleta. El análisis estadístico de los datos en la estación de invierno muestra estabilidad, debido a que predominan cielos sin presencia de nubes, así mismo se observa un compromiso aceptable entre el índice ultravioleta y la irradiación solar global, siendo el coeficiente de determinación del índice ultravioleta e irradiación solar global, para cielos sin nubes, en los años 2016, 2017 y 2018 fue de 0.998, 0.982 y 0.990 respectivamente. Mientras que el modelo estimado para cielo sin presencia de nubes fue 0.988, mientras que para cielos parcialmente nublados es aproximadamente 0.97 y los parámetros estadísticos MBE: -1.15%, MABE: 8.78% y RMSE: 12.99%. Estos resultados indican que el modelo subestima las mediciones y se clasifica como bueno

**Palabras clave;** cielos claros, cielos parcialmente nublados, índice ultravioleta, irradiación solar.

## ABSTRACT

According to the World Health Organization. Ultraviolet indexes greater than 12 are very harmful to humans, and it is of global interest to know and model their behavior. The city of Puno, due to its geography, has high values in certain seasons of the year. The objective is to estimate the ultraviolet index from atmospheric and geometric factors with respect to the Earth. Ultraviolet index and global solar irradiation data were provided by the Davis weather station. In the methodology, the statistical indicator the coefficient of determination was used, while, to validate the model, the MBE, MABE and RMSE were applied. The data show that the geometric factor solar declination, azimuthal angle and the atmospheric factor of the ozone layer directly affect the annual behavior of the ultraviolet index. The statistical analysis of the data in the winter season shows stability, due to the predominance of skies without the presence of clouds. Likewise, an acceptable compromise is observed between the ultraviolet index and global solar irradiation, with the coefficient of determination of the ultraviolet index being global solar irradiation, for cloudless skies, in the years 2016, 2017 and 2018 it was of 0.998, 0.982 and 0.990 respectively. While the estimated model for sky without the presence of clouds was 0.988, while for partially cloudy skies it is approximately 0.97 and the statistical parameters MBE: -1.15%, MABE: 8.78% and RMSE: 12.99%. These results indicate that the model underestimates the measurements and is classified as good.

**Keywords:** clear skies, partly cloudy skies, ultraviolet index, solar irradiation

## INTRODUCCIÓN

La fuente de energía que proviene del sol a su paso por la atmosfera terrestre, es atenuada por el proceso de **absorción y dispersión**, es importante para la biodiversidad, debido a que regula el clima de nuestro planeta, también ejerce de manera significativa sobre el medio ambiente. El rango de longitud de onda de 100 nm – 400 nm, se define como radiación ultravioleta y son muy nocivos para el ser humano debido a que son muy energéticos. Esta radiación que llega a la atmosfera extraterrestre representa el 8% (Santos, 2011) y es ampliamente estudiada debido a que induce en diversos procesos físicos y biológicos (Foyo, 2003; Gray, 2010; Keppler, 2012).

Por otro lado, la radiación ultravioleta se divide en tres intervalos en relación con sus efectos biológicos: radiación solar ultravioleta tipo C (UV-C) de 100 nm – 290 nm, radiación solar ultravioleta tipo B (UV-B) de 290 nm – 315 nm (Vanicek, 1999) y radiación solar ultravioleta tipo A (UV-A) de 315 nm – 400 nm (Wang, 2014).

Los principales factores atmosféricos y geométricos involucrados en la atenuación de la radiación son: nubosidad, capa de ozono estratosférico y los aerosoles (Di Sarra, 2002) (Wenmin, 2022), la declinación solar y el ángulo cenital,

Actualmente la literatura muestra los efectos de la radiación ultravioleta sobre la vida acuática (Jacquet, 2003), plantas (Paoletti, 2005; Sweet, 2012), vegetación (Kunz, 2006; Li, 2010), animales (Pahkala, 2003; Sinha, 2002), ecosistemas terrestres y marinos (Rozema, 2002), conservación y durabilidad de materiales como el plásticos y la pintura (Allen, 2008; Johnson, 1996; Liu, 2002; Verbeek, 2011). La radiación ultravioleta, también tiene la capacidad de causar daño directo e inmediato a la salud humana, como el cáncer de piel y las cataratas (Gallagher, 2006; Santos, 2011) (Meunier, 2023) (Rivas, 2020). Pero no toda la radiación es perjudicial, por ejemplo, en el trabajo de Fioletov se estudió la relación de UV-A con la vitamina D (Fioletov, 2009) (Grifoni, 2022).

El índice ultravioleta (UVI) es una cantidad que se deriva de la radiación ultravioleta, consiste en 17% de UV-A y 83% de UV-B en la superficie de la Tierra (Bilbao, 2010). El IUV se considera como una estimación de la efectividad para producir efectos nocivos en la piel humana, donde una unidad del IUV es igual a 25 mW/m<sup>2</sup>; generalmente se considera al mediodía solar local, justo cuando el Sol está en el cenit (Marín, 2005).

El parámetro IUV se obtiene como una integración del factor ponderado por el espectro de acción relacionado con la susceptibilidad de la piel del Cáucaso a las quemaduras

solares (eritema), fue propuesta por (McKinlay and Diffey, 1987) y adoptada como estándar por la Comisión Internacional de Eclairage (Comisión Internacional de Iluminación); el IUV puede ser modelado por modelos de transferencia radiactiva y validada con las mediciones. Los datos experimentales de IUV son útiles para desarrollar la climatología de la radiación UV y establecer la distribución geográfica que, son esenciales en muchos campos, incluida la salud humana.

Por ejemplo en el trabajo de Di Sarra (2002) se tomaron datos en el área mediterránea para posteriormente estudiar los efectos de diferentes factores (Di Sarra, 2002). Muchos autores de España analizaron la radiación solar ultravioleta (UVER) en diferentes regiones del país: (Cañada, 2008; Foyo, 1998; Serrano, 2006), entre otros. Para estudios del UVER en Eslovaquia Pribullová (2008) propuso los mapas de Isolina (Pribullová, 2008). Mientras que Badarinath (2008), examinó la influencia de las actividades naturales y antropogénicas en los rayos UV sobre una región tropical en la India (Badarinath, 2008). La Organización Meteorológica Mundial (WHO, 2003), recomienda la **instalación** y **mediciones** periódicas del IUV, pero son muy pocas las estaciones radiométricas que miden periódicamente y como consecuencia no se tiene un registro continuo de datos, también, los datos no son numerosos como para proporcionar una climatología global. En cuanto a las mediciones, particularmente su calidad y las incertidumbres de los sensores Hülsen (2007), sugirieron la calibración periódica de los sensores UV (Hülsen, 2007). A pesar de la importancia del IUV, muy pocas estaciones radiométricas están instaladas en nuestro país; por tanto, no se puede proporcionar una climatología global de la radiación UV-B y el IUV.

El objetivo de este trabajo es analizar estadísticamente la consistencia de los datos del IUV y la radiación solar global (Rad), posteriormente se propone un modelo que permita la estimación del IUV para cielos sin presencia de nubes o parcialmente nublados, también observar cómo influyen los factores atmosféricos y geométricos en el comportamiento del IUV. Este trabajo constituye un primer análisis para la elaboración de un modelo empírico del IUV en la ciudad de Puno (Mateos, 2010).

En los siguientes capítulos de este trabajo, se proporciona la metodología; posteriormente se describe el análisis estadístico de los valores del IUV, Rad por hora, día y mes, así mismo, se explica la variabilidad interanual y la atenuación solar IUV en la atmósfera.



## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

##### 1.1.1. El Sol

El Sol es la estrella del sistema planetario en el que se encuentra el planeta Tierra; es la más cercana a la Tierra y es el astro con mayor brillo aparente; que se formó hace unos 5 mil millones de años y permanecerá aproximadamente otros 5 mil millones de años. Su presencia o su ausencia en el cielo determinan, respectivamente, el día y la noche en nuestro planeta. La energía radiada por el Sol es aprovechada por los seres fotosintéticos, que constituyen la base de la cadena trófica, siendo así la principal fuente de energía de la vida. También aporta la energía que mantiene en funcionamiento los procesos climáticos (Calvin, 2009; Iqbal, 1983).

##### 1.1.1.1. Estructura del sol

Diversas investigaciones referentes al Sol muestran cierta característica; por ejemplo, tiene una estructura en capas esféricas, siendo las diferencias físicas y químicas difíciles de establecer. Actualmente la astrofísica dispone de un modelo de estructura solar que explica satisfactoriamente la mayoría de los fenómenos observados (figura 1) según este modelo, el Sol está formado por (Calvin, 2009):

Núcleo, zona radiante, zona convectiva, fotosfera, cromosfera, corona y viento solar

Algunas características de sol son:

Diámetro	1 391 016 km( $\sim 1.4 \times 10^9$ m)
Diámetro relativo ( $d_s/d_T$ )	109
Superficie	$6.0877 \times 10^{12}$ km <sup>2</sup>
Volumen	$1.4123 \times 10^{18}$ km <sup>3</sup>
Masa	$1.9891 \times 10^{30}$ kg
Densidad	1 411 kg/m <sup>3</sup>
Gravedad en la superficie	274 m/s <sup>2</sup> (27.9 g)
Temperatura efectiva de la superficie	5 778 K (5505 °C)
Temperatura del núcleo	$\sim 1.36 \times 10^7$ K

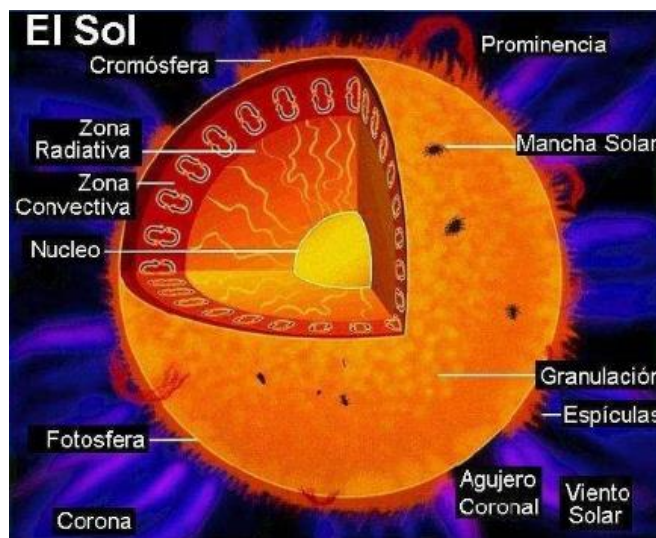


Figura 1. Estructura del Sol

Fuente: UNI (2004). <https://pt.slideshare.net/PamelaPeafielO/sol-14898346/4>

### 1.1.2. Emitancia y espectro de la radiación solar

Todos los objetos emiten radiación electromagnética por tener una temperatura mayor al cero absoluto. Esta radiación se conoce como emisión de energía calorífica; por otro lado, se sabe que la densidad de potencia de emisión electromagnética de cualquier cuerpo depende de su temperatura (Varo, 2006).

El espectro de radiación solar se divide en tres intervalos según sus características: Ultravioleta UV (100-400 nm), Visible (400-720 nm) e Infrarrojo cercano IR (720 – 3 000 nm). El intervalo visible es perceptible por el ojo humano, y corresponde a la franja del espectro solar con los valores más altos de irradiancia, siendo el máximo del espectro extraterrestre a 475 nm (Azul). El espectro infrarrojo abarca las longitudes de onda menos energéticas del espectro solar y su interacción con ciertos

gases presentes en la atmosfera es absorbida, por ejemplo, en la banda centrada alrededor de 1 400 nm, es absorbida por el vapor de agua y el CO<sub>2</sub> como se muestra en la figura 2. Por otro lado la radiación solar ultravioleta se divide a su vez en tres intervalos (Varo, 2006):

El ultravioleta tipo C en el intervalo [100-285] nm

El ultravioleta tipo B en el intervalo [285-315] nm

El ultravioleta tipo A en el intervalo [315-400] nm

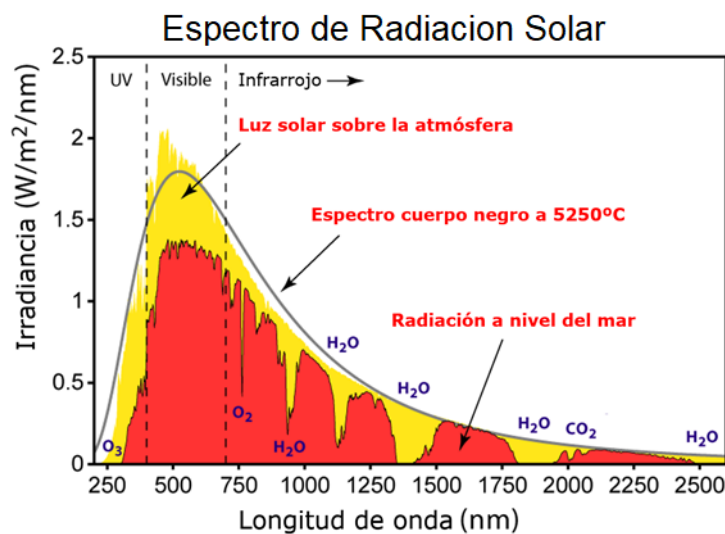


Figura 2. Espectro de radiación solar

Fuente: Román (2010). <https://edu.phineal.com/lessons/la-radiacion-solar/>

### 1.1.3. La constante solar

La radiación que proviene del Sol se emite en todas las direcciones y llega a la capa extraterrestre con un valor aproximadamente constante. Por tal motivo, se define la constante solar  $I_{SC}$ , como la potencia recibida por unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, la distancia promedio de la Tierra al Sol, debido a la órbita elíptica de la Tierra no es constante, no obstante su valor varía anualmente muy próximo al 3 % (Varo, 2006).

En la actualidad se consideran dos medidas adoptadas para la constante solar, uno de ellos realizadas por la NASA, en el periodo 1968-1971 dicha medida se realizó desde un avión volando a gran altitud, para atenuar los efectos atmosféricos, por otro lado el World Radiation Center (WRC) en Davos (Suiza) realizó las medidas. Ambas medidas difieren en sus resultados; el valor obtenido por la NASA fue  $1\,353\text{ W/m}^2$ ,

comparado a  $1395 \text{ W/m}^2$  obtenido por el WRC, actualmente éste último valor es el más aceptado (Varo, 2006).

La radiación emitida por el Sol se puede calcular utilizando el modelo de la radiación emitida por el *cuerpo negro*. Un cuerpo negro es cualquier objeto que absorbe toda la radiación que llega a su superficie. La representación más frecuente, es un cuerpo que tiene una cavidad oscura. En estado estacionario el cuerpo negro reemite toda su radiación en diferentes longitudes de onda, para mantener la energía interna y la temperatura aproximadamente constantes. Para obtener la constante solar se utiliza la siguiente expresión de Planck (Escamilla, 2010):

$$I_{cs} = \int_{0\mu m}^{3\mu m} \left( \frac{R_{sol}}{D_{Tierra-sol}} \right)^2 \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (1.1)$$

Donde:

$\lambda$  : En  $\mu m$  ( $1\mu = 10^{-6} m$ )

$T \approx 5800 \text{ K}$ , es la temperatura del sol

$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ , es la constante de Planck

$k = 1.3805 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ , es la constante de Boltzman

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , es la velocidad de la luz

$R_{sol} = 6.95890 \times 10^5 \text{ km}$ , es el radio del Sol

$D_{Tierra-sol} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$ , es la distancia tierra Sol

La relación

$$\frac{hc}{k\lambda T} = \frac{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.3805 \times 10^{-23} \times \lambda \times 5800} \frac{\text{J.s}}{\text{J(K)}^{-1}} \frac{\text{m}}{\text{Ks}} = \frac{2.48 \times 10^{-6}}{\lambda} \frac{\text{m}}{\mu m} = \frac{2.48 \times 10^{-6}}{\lambda} \frac{\text{m}}{10^{-6} \text{m}} \Rightarrow$$

Simplificando

$$\frac{hc}{k\lambda T} = \frac{2,48}{\lambda} \quad (1.2)$$

Mientras que

$$\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} = \frac{2 \times \pi \times 6.62 \times 10^{-34} \times 9 \times 10^{16}}{\lambda^5} \frac{\text{J.s}}{(\mu m)^5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{374.35 \times 10^{-18}}{\lambda^5 (10^{-6} \text{m})^4 (\mu m)} \text{Wm}^2 = \frac{374.35 \times 10^6}{\lambda^5 (\mu m)} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Es decir

$$\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} = \frac{374.35 \times 10^6 \text{ W}}{\lambda^5 (\mu\text{m}) \text{ m}^2} \quad (1.3)$$

Por otro lado

$$\left( \frac{R_{sol}}{d_{T-sol}} \right)^2 = \left( \frac{6.96 \times 10^5 \text{ km}}{1.5 \times 10^8 \text{ km}} \right)^2 = 21.5296 \times 10^{-6} \quad (1.4)$$

Reemplazando (1.4), (1.3) y (1.2) en (1.1) tenemos la siguiente expresión:

$$I_{cs} = \left( \int_{0 \mu\text{m}}^{3 \mu\text{m}} \frac{8 \ 057.058}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{e^{\frac{2.48}{\lambda}} - 1} \right) \frac{W}{m^2} = 1 \ 354.13 \text{ W} / m^2 \quad (1.5)$$

El comportamiento de la expresión (1.5) se muestra en siguiente figura 3

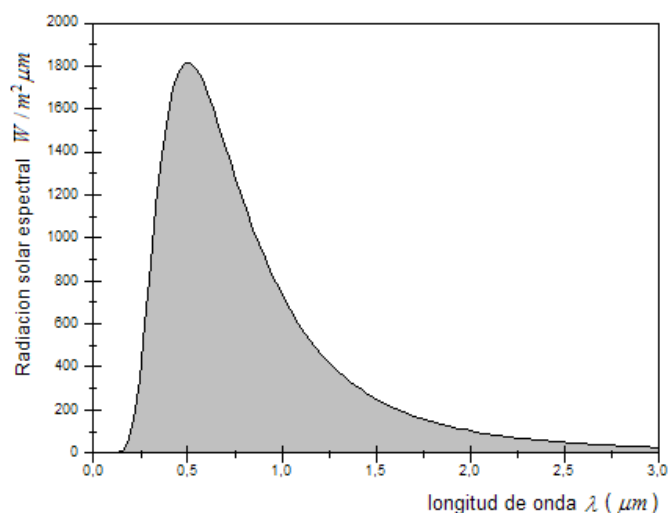


Figura 3. Distribución espectral de la radiación

Si integramos en un rango mayor se obtiene un valor aproximado a

$$I_{cs} = 1 \ 367 \text{ W} / m^2$$

De esta misma figura podemos estimar la radiación solar para el intervalo de longitudes de onda de  $[280 - 315] \text{ nm}$  que corresponde a la irradiación UV-B como mostramos en la siguiente figura.4

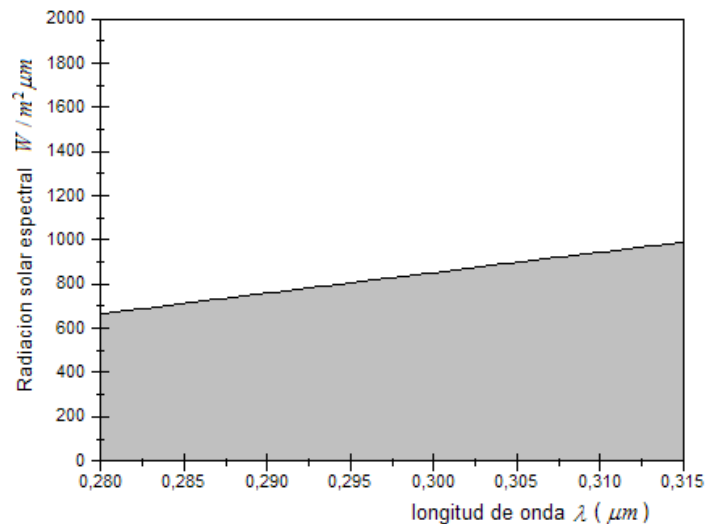


Figura 4. Espectro de la radiación ultravioleta tipo B

#### 1.1.4. Factores moduladores de la radiación solar sobre la superficie Terrestre

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está regulada por dos factores; geométricos y atmosféricos. Los primeros causan variaciones en la radiación solar extraterrestre, mientras que los segundos modifican la radiación solar extraterrestres durante su paso por la atmosfera (Román, 2010).

#### 1.1.5. Factores geométricos

El factor geométrico distancia Tierra-Sol varía diariamente debido a la órbita elíptica que describe la Tierra alrededor del Sol, este factor de corrección de la excentricidad  $E_0$  (Iqbal, 1983) indica que la radiación del sol disminuye con el cuadrado la distancia, En la figura 5 puede observarse que varía entre un valor mínimo de 0.983 UA cuando la órbita terrestre está más próximo al Sol, denominado perihelio (aproximadamente el día 3 de enero) y un valor máximo de 1.017 UA cuando la órbita terrestre más alejado del Sol denominado afelio, (aproximadamente el 4 de julio). Estas variaciones originan una oscilación anual de un  $\pm 3\%$  en la cantidad de radiación solar recibida por la Tierra.

Ante estas circunstancias se han desarrollado una serie de expresiones matemáticas de diversa complejidad que permiten determinar el factor de corrección de la excentricidad de forma simple. Concretamente, Spencer (1971) desarrolló una ecuación, para el cálculo de la distancia media Tierra-Sol con un error menor del

0.01% aplicando las series de Fourier, la expresión es la siguiente: Spencer (1971) citado por Iqbal (1983)

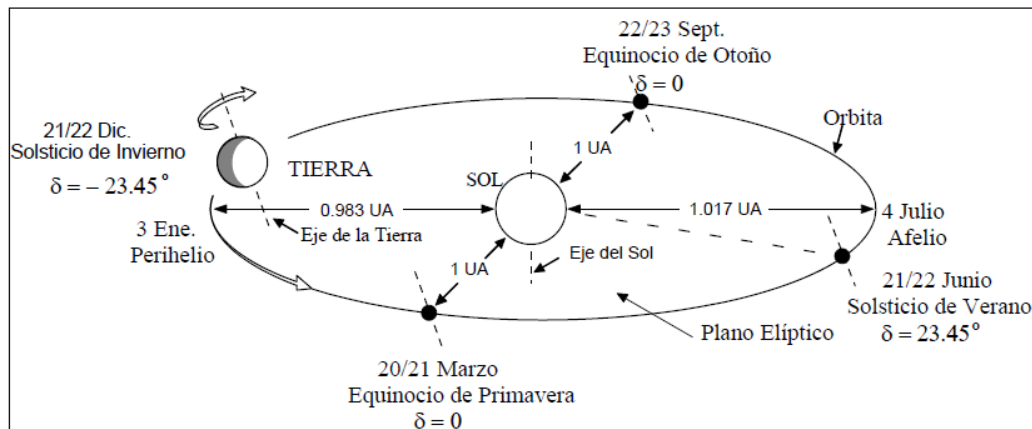


Figura 5. Órbita de la Tierra alrededor del Sol

Fuente: Iqbal (1983)

$$E_0 = \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \operatorname{sen} \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \operatorname{sen} 2\Gamma \quad (1.6)$$

Donde:

$r$  : Es la distancia Tierra-Sol

$r_0 = 1.495979 \times 10^8 \text{ km} = 1 \text{ UA}$  (Unidad Astronómica) es el valor medio

En esta ecuación  $\Gamma$  se denomina ángulo diario, expresado en radianes y puede calcularse a partir de la siguiente relación:

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (1.7)$$

Donde  $d_n$  corresponde al número del día juliano del año  $1 \leq d_n \leq 365$  variando desde 1 para el primero de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre. El comportamiento del factor de corrección se muestra en la siguiente figura 6 (Escamilla, 2010).

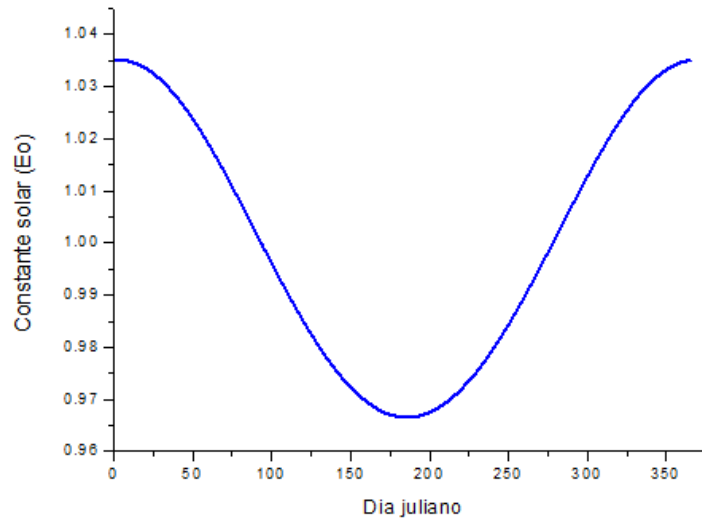


Figura 6. Factor de corrección

Los valores máximos del factor de corrección se dan el 1 de enero y 31 de diciembre, mientras que los valores mínimos son el día 4 y 5 de julio, puede notarse que el factor de corrección de la excentricidad varía de 0.965 hasta 1.035.

#### 1.1.5.1. Declinación solar $\delta$

Este factor geométrico es el ángulo que forma la línea que une los centros del Sol y la Tierra con el plano ecuatorial, diversos autores han estudiado técnicas para el cálculo de la declinación, siendo la expresión de Spencer (1977) citado por (Iqbal, 1983) la más aceptable, cuya relación es:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \operatorname{sen} \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \operatorname{sen} 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.001480 \operatorname{sen} 3\Gamma \quad (1.8)$$

La figura 7 muestra el ángulo de declinación y la figura 8 muestra el comportamiento anual de la declinación.



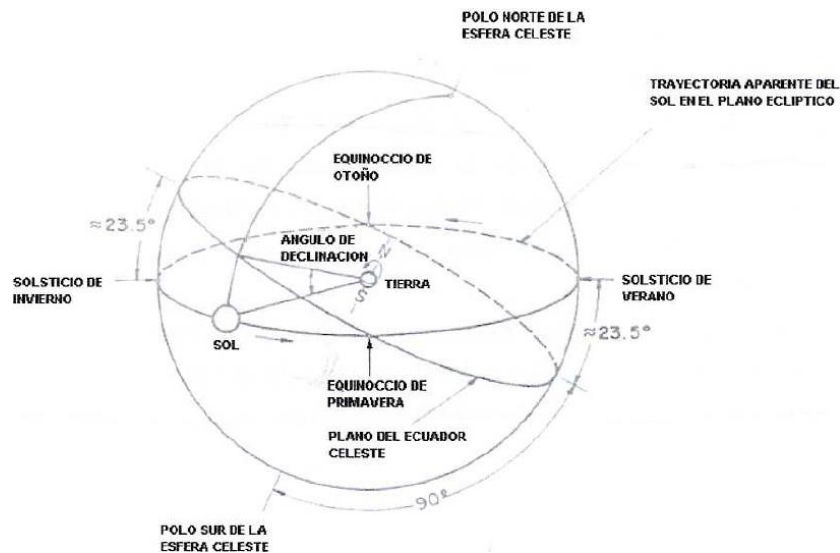


Figura 7. Declinación solar

Fuente: (Iqbal M. , 1983)

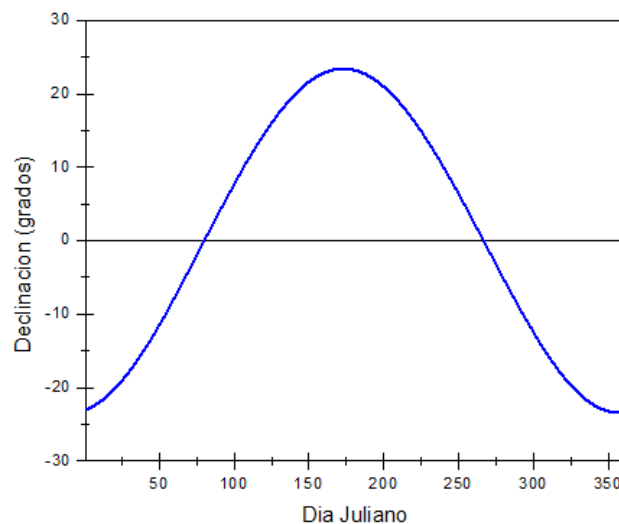


Figura 8. Comportamiento de la declinación solar

Según la expresión la declinación solar para la ciudad de Puno, tiene el valor mínimo de  $-23.45^\circ$  grados el 1 de enero y 31 de diciembre, su valor máximo de  $23.45^\circ$  grados se presenta el 22 de junio (cambio estacional al invierno), y el valor de cero el 21 de marzo y 23 de setiembre (cambio estacional primavera).

### 1.1.5.2. Ángulo cenital Z

Es el factor geométrico principal que controla la variación de la radiación solar durante el día, el ángulo cenital Z se mide desde el cenit y es el

complemento de la altura solar  $h$ , ambos representados en la Figura. 9 (Anton, 2007).

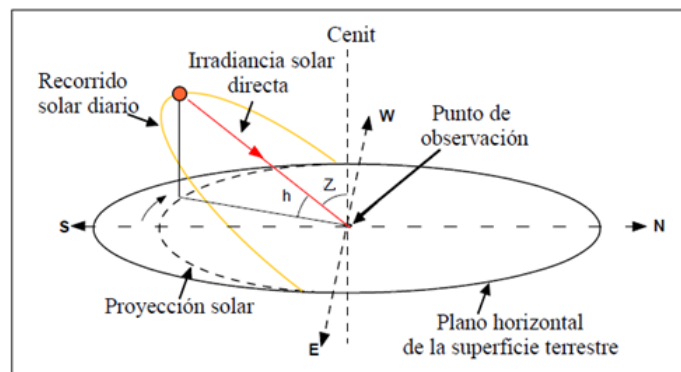


Figura 9. Ángulo cenital y altura solar.

Fuente: (Iqbal, 1983)

Puede notarse que cuando menor sea el ángulo  $Z$ , menor inclinación tendrá el Sol, y los rayos solares llegarán más perpendiculares sobre la superficie horizontal terrestre obteniéndose mayor flujo radiactivo. Mientras que a medida que crece el ángulo  $Z$ , el flujo de radiación que llega al plano terrestre es menor, siendo el límite cuando  $Z$  sea igual a  $90^\circ$ , es decir, cuando el sol está en el ocaso por el horizonte (Anton, 2007).

La fórmula para determinar el ángulo cenital es la siguiente:

$$\cos Z = \text{sen} \delta \text{ sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (1.9)$$

Donde:

$\delta$  : Es el ángulo de declinación,

$\phi$  : Es latitud local

$\omega$  : Es el ángulo horario.

### 1.1.5.3. Ángulo horario $\omega$

Es el ángulo que forma con respecto al polo norte celeste, el meridiano local y el meridiano solar. Por tanto, es igual a cero en el mediodía solar, y aumenta  $15^\circ$  por cada hora, siendo positivo por la mañana y negativo por la tarde, se determina a partir de la siguiente ecuación (Iqbal, 1983):

$$\omega = \pm 15^\circ (12 - LAT) \quad (1.10)$$

Donde  $LAT$  es el tiempo solar ( $0 \leq LAT \leq 24$ ).

Finalmente, la irradiación solar ultravioleta  $I_{UVB}$  extraterrestre (límite superior de la atmosfera) está regulada por él  $\cos(Z)$ , el factor de corrección  $E_o$  y la constante solar debido a la radiación ultravioleta  $I_{UVBo}$  que es aproximadamente  $9.569 \text{ W/m}^2$  (Bird, 1986), la expresión es:

$$I_{UVB} = I_{UVBo} E_o \cos(Z) \quad (1.11)$$

Por ejemplo, para la ciudad de Puno, si consideramos el 1 de enero, declinación es  $\delta = -23.06^\circ$ ;  $\phi = -15.83^\circ$  (Latitud en Puno), utilizando la expresión (1.9), (1.10) y considerando para cualquier ángulo horario  $\omega$ , tenemos la siguiente expresión:

$$I_{UVB} = 9.569 \text{ W/m}^2 * 1.03505 * (0.1079 + 0.8844 * \cos\omega)$$

Simplificando

$$I_{UVB} = 9.9044 * (0.1079 + 0.8844 * \cos\omega) \text{ W/m}^2 \quad (1.12)$$

Graficando esta última expresión observamos el comportamiento extraterrestre, como se muestra en la figura 10.

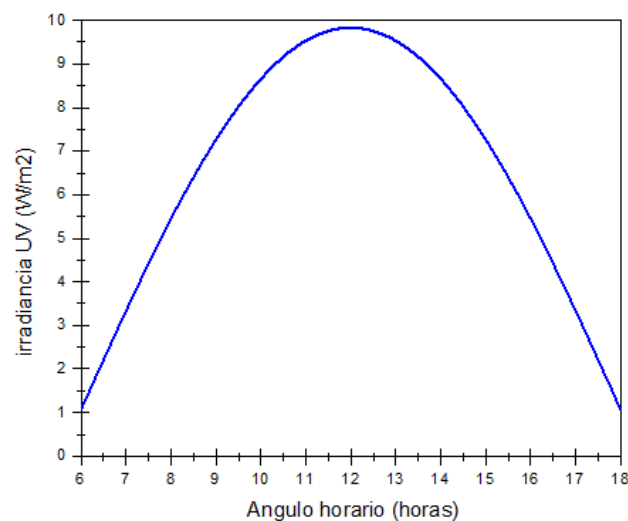


Figura 10. Irradiación extraterrestre

Esta es aproximadamente la **irradiación UVB que llega del sol a la atmosfera extraterrestre, el 1ero de enero** en ciudad de Puno, puede notarse que a medida que el ángulo horario varia también varía la irradiancia. La figura 10 muestra un aumento progresivo en la mañana y la máxima

irradiación se produce al mediodía, posteriormente hay un descenso en horas de la tarde. Según la fórmula anterior la máxima irradiancia es:

$$I_{UVB_{\max}} = 9.9044 * 0.9923 = 9.828 \text{ W / m}^2 \quad (1.13)$$

Que corresponde a un ángulo horario  $\omega = 0^\circ$  y para un ángulo cenital  $Z = 7.06^\circ$

#### 1.1.5.4. Ecuación del tiempo

Esta expresión está dada por la fórmula:

$$E_t = 0.000075 + 0.001868 * \cos \Gamma - 0.032077 * \text{sen} \Gamma - 0.014615 * \cos 2\Gamma - 0.04089 * \text{sen} 2\Gamma \quad (1.14)$$

Su comportamiento se muestra en la siguiente figura 11

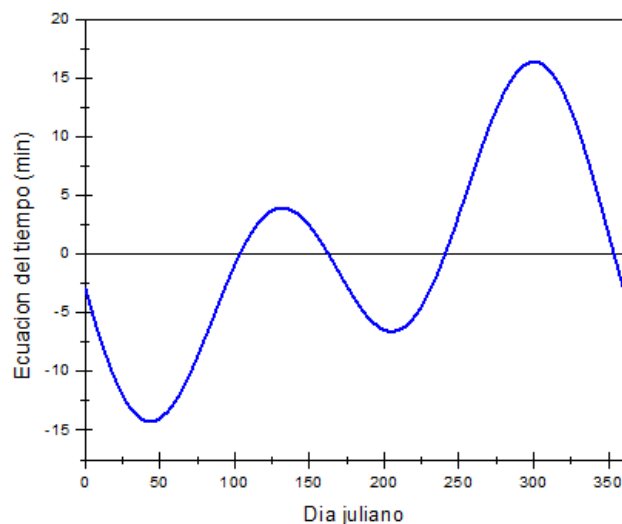


Figura 11. Ecuación del tiempo

Se observa que la expresión de la ecuación del tiempo (min) varía cada día, notándose el mínimo (-14.27 min) para el día 14 de febrero, mientras que el valor máximo (16.39 min) es el día 2 de noviembre; los ceros de la ecuación del tiempo son los días 16 de abril, 15 de junio, 2 de setiembre y 25 de diciembre (Varo, 2006).

A continuación escribimos la relación entre la **hora solar local TSM** y la **hora solar verdadera LAT**, la expresión es la siguiente (Iqbal, 1983):

$$LAT = TSM + 4(L_s - L_L) + E_t \quad (1.15)$$

Donde

$LAT$  : Es la hora solar verdadera

$TSM$  : Es la hora local u hora solar media, se expresa en horas

$L_s = 75^\circ$  : Es el meridiano para el Perú

$L_L = 78.08^\circ$  : Es el meridiano (longitud) del lugar para la ciudad de Puno

Esta última relación es importante, ya que la irradiación solar está dada para la hora solar verdadera, su aplicación se muestra en el capítulo IV.

### 1.1.6. Factor atmosférico

El planeta Tierra está rodeado por una capa gaseosa llamada atmósfera que, junto con las masas de agua, la hidrosfera, constituyen el sistema de capas fluidas, cuyas dinámicas están íntimamente relacionadas. La atmósfera se mantiene atrapada en la Tierra por la fuerza de atracción gravitacional (Santos, 2011).

La importancia de la atmósfera terrestre es que impide la llegada de parte de los rayos ultravioletas, debido a la absorción del ozono; por otro lado, reduce las diferencias de temperatura entre el día y la noche. Se considera que aproximadamente el 75% de la atmósfera se encuentra a una altura de 11 km medido desde la superficie terrestre, mientras que a una altura de 30 km se encuentra el 99%. Otra factor importante en la atmosfera, es que la evaporación de agua regula la temperatura en la superficie terrestre, la ausencia de la atmosfera implica un aumento de la temperatura en 100 °C (Román, 2010).

#### 1.1.6.1. Gases atmosféricos

La energía procedente del sol atraviesa la atmósfera terrestre hasta llegar a la superficie, sufriendo una variación en su espectro debido a fenómenos atmosféricos como la absorción por gases y efectos de dispersión (Santos, 2011).

La dispersión que sufre la radiación solar es mediante el fenómeno conocido como *scattering (dispersión) de Rayleigh*, tiene su fundamento en la teoría electromagnética de la luz. Esta dispersión es causada por gases (moléculas de aire) y partículas en suspensión cuando su diámetro  $d$  es tal que  $d/\lambda \ll 1$ . Al incidir un haz de luz sobre un gas el haz es dispersado según

indica la figura 12, notándose una simetría, la cantidad dispersada es inversamente proporcional a  $\lambda^4$ . Por esta razón la radiación *UV*, al ser la de menor longitud de onda, se ve más afectada por el scattering de Rayleigh, este efecto atenúa los niveles de radiación *UV*, ya que una parte es redireccionada hacia el espacio. El fenómeno también es el responsable de que aproximadamente el 50% de la radiación *UV* que llega a la superficie es de componente difusa, también explica la coloración azul del cielo (Iqbal, 1983).

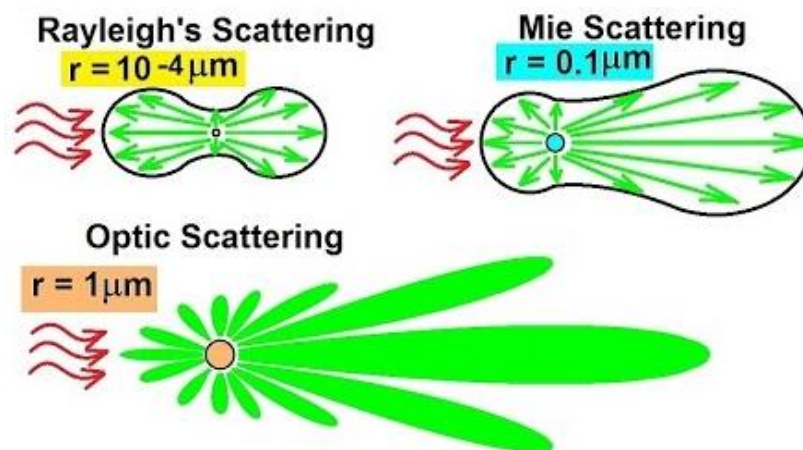


Figura 12. Dispersión de Rayleigh y Mie

Fuente: <https://www.google.com/search?q=mie%20scattering&tbm=isch&hl=es&sa=X&ved=0COCIQtI8BKAFqFwoTCOjIuP6emYIDFQAAAAdAAAAABAG&biw=1903&bih=963>

Cuando  $d / \lambda$  está en el rango de 0.1-10 se produce la **dispersión de Mie**; por ejemplo, partículas de humo, neblina, notando una asimetría y una mayor dispersión en la dirección de haz incidente. Finalmente, cuando  $d / \lambda \gg 10$  se observa una dispersión aún mucho mayor en la dirección del haz incidente, este efecto es provocado por el polvo y las nubes

También existen gases que absorben la irradiación ultravioleta, como el oxígeno y el ozono (Iqbal, 1983).

### 1.1.6.2. Ozono

Un componente gaseoso importante de la atmósfera terrestre lo constituye el ozono. La composición de la molécula de ozono  $O_3$ , se forma por tres átomos de oxígeno. Este gas se encuentra en dos regiones de la atmósfera. Según la literatura el 10% se ubica en la troposfera que es la capa próxima a la superficie terrestre (hasta los 10-16 km de altitud), siendo nocivo para salud de las personas, mientras el resto de la cantidad de ozono, el 90% se encuentra en la estratosfera, a 50 km de altitud, en esta capa externa de la atmósfera tiene una función muy importante ya que absorber una gran cantidad de irradiación solar UV de alta frecuencia perjudicial para la biodiversidad. Al de ozono estratosférico se le denomina “capa de ozono”(Escamilla, 2010).

Un gran porcentaje de la presencia del ozono en la tropósfera es de origen antropogénico, que está formado por hidrocarburos y gases contaminantes, por otro lado, la presencia del ozono en la estratosfera es el resultado de la interacción de la radiación solar y el oxígeno gaseoso. Siendo el resultado la generación y destrucción de ozono (reacciones de Chapman), esto trae como resultado una transformación de la irradiación UV (particularmente UV-C y UV-B) en forma de calor absorbida por la estratosfera. Las reacciones del ozono en la estratosfera son (Salas, 2001):

Formación del Ozono:



Destrucción del ozono:



El indicador más utilizado para medir la cantidad de ozono presente en la atmósfera se denomina columna total de ozono (TOC), que se define como el espesor de la columna vertical de ozono sobre una superficie, en condiciones normales. Comúnmente el espesor de la capa de ozono se expresa en unidades Dobson (DU), siendo la equivalencia  $1 \text{ atm-cm} = 1 \text{ 000 DU}$  ([https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad\\_Dobson](https://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_Dobson)).

### 1.1.6.3. Nubes

Comúnmente las nubes son masas muy pequeñas de agua que se presentan en estado líquido o en forma de cristales de hielo presentes en la atmósfera. La radiación solar que interactúa con las nubes experimenta el fenómeno de la dispersión de Mie, por tanto, no depende de la longitud de onda y dispersa la radiación solar en todas las direcciones, especialmente la luz visible del espectro, según la literatura las nubes atenúan más la irradiación solar global que la radiación UV.

Si bien las nubes atenúan los niveles de irradiación, hay evidencia, que debido a su distribución de las nubes, la medida de la radiación solar que llega a la superficie terrestre es mayor, respecto a la radiación que incidiría en condiciones de cielos despejados, este fenómeno se conoce como *efecto realce* (Sabburg, 2006, 2009). Este efecto se explica debido a múltiples reflexiones en las superficies de las nubes (Calbó, 2005).

El estudio de la radiación solar con presencia de nubes es un tema complejo debido a la configuración y la dinámica de estas masas, como por ejemplo la velocidad, tamaño, composición, pero, existen indicadores que se pueden utilizar para modelar la interacción. Una medida directa de las nubes es la observación visual de una fracción de cielo cubierto de nubes que suele medirse en octas (equivale a un octavo del área visible del cielo), este indicador se estima utilizando cámaras fotográficas, para registrar en una determinada hora la presencia de nubes en el cielo.

Un indicador muy utilizado se conoce como factor de modificación de las nubes (CMF: Cloud Modification Factor), que se define como el cociente de la radiación registrada en presencia de nubes y la radiación sin considerar la presencia de nubes. Este indicador CMF es equivalente a la transmitancia radiactiva de las nubes. También se puede utilizar para caracterizar las condiciones del cielo, y poder detectar el *efectos de realce* si  $CMF > 1$  (Foyo, 2001).

$$CMF_l = \frac{I_{medida}}{I_{s-n}} \quad (1.18)$$



Donde  $I_{med}$  es la irradiación medida. Según el intervalo del espectro puede ser (IUV, Rad, UVER, UV-B, etc.) y  $I_{s-n}$  es la irradiación calculada en condiciones de cielo sin presencia de nubes. En particular el  $CMF$  para el IUV y la Rad se puede expresar de la siguiente forma:

$$CMF_{IUV} = \frac{IUV_{med}}{IUV_{s-n}} \quad (1.19)$$

$$CMF_{Rad} = \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \quad (1.20)$$

A partir de la relación entre ambos factores de modificación de las nubes (1.19) y (1.20) se tiene:

$$IUV_{med} = (CMF_{Rad}) IUV_{s-n} \quad (1.21)$$

En el desarrollo del trabajo se ha seguido el modelo propuesto por (Lindfors, 2007) que se expresa de la siguiente manera:

$$IUV_{med} = f(CMF_{Rad}, Z) IUV_{s-n} \quad (1.22)$$

Siendo el objetivo, hallar la función  $f$  a partir del ajuste de datos del  $CMF_{IUV}$ ,  $CMF_{Rad}$  versus el  $\cos(Z)$ ; por tanto, la expresión que permite calcular el IUV para cielos parcialmente nublados es:

$$IUV_{cal} = A(CMF_{Rad})^B IUV_{s-n} \quad (1.23)$$

#### 1.1.6.4. Aerosoles

Los aerosoles son un conjunto de partículas sólidas o líquidas en suspensión que están presentes en la troposfera (Toledano, 2005). Estas partículas varían de tamaño desde unas milésimas de micras hasta 100  $\mu\text{m}$ . Pueden ser de origen orígenes naturales (erupciones volcánicas, polen, etc.) o antropomórficos (asociados a la combustión, gases debido a la contaminación ambiental). La medida de aerosoles está asociada al parámetro conocido como el espesor óptico de los aerosoles (AOD) que dependen de la longitud de onda de la radiación solar, este parámetro se ajusta a una función potencial mediante la relación (Toledano, 2005):

$$I_{\lambda-aero} = I_{on\lambda} \exp \left[ -\frac{AOD_{\lambda}}{\cos(Z)} \right] \quad (1.24)$$

Donde:

$I_{\lambda-aero}$  Es la irradiación que llega a la superficie terrestre debido a una atmosfera de aerosoles mientras que  $I_{on\lambda}$  es la irradiación extraterrestre.

Según el trabajo de Angstrom, obtiene la dependencia del  $AOD$  con otros parámetros como se muestra en la siguiente relación (Ångstrom, 1961; Ångström, 1929, 1964):

$$AOD_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1.25)$$

Donde **alfa** es un exponente adimensional y se relaciona con el **tamaño** de las partículas (Junge, 1955). Mientras que **beta** es adimensional y se relaciona con el grado de **turbidez** de las partículas. El  $AOD$  representa la disminución de la radiación solar incidente sin tomar en cuenta si es por dispersión o absorción, en la actualidad existen valores medidos del  $ADO$  para zonas urbanas, rurales o marítimas (Román, 2010)

#### 1.1.6.5. Albedo

El albedo en una superficie, se define como la división entre la radiación solar reflejada respecto al incidente. Su medida está estrechamente relacionada con la longitud de onda de la radiación incidente, el tipo de superficie y rugosidad; de la definición se puede inferir que el albedo es proporcional a la radiación solar incidente. Las superficies naturales como pradera verde, tierra y agua reflejan valores menores al 10%, mientras que otras superficies como la nieve, arena reflejan 90% y 25% respectivamente. De acuerdo con Koeke (2002) citado por Román (2010).

Por otro lado, en las superficies cubiertas con nieve, el albedo varía según el tipo de nieve y el tiempo que lleva en la superficie. También en los trabajos de investigación observaron un incremento en las medidas de la radiación ultravioleta en presencia de nieve, con respecto a las mismas medidas sin nieve en un 15-25% bajo cielos despejados y hasta un 80% de incremento cuando hay presencia de nubes (Kalliskota, 2000; Renaud, 2000).

### 1.1.6.6. Altura sobre el nivel del mar

Es de importancia el factor la altitud, que modifica los niveles de la irradiancia UV. Se ha reportado que a mayor altitud el camino óptico recorrido es menor y la radiación solar, es poco atenuada; por tanto, la radiación aumenta con la altitud. Se ha reportado en cielos sin presencia de nubes, incrementos de la radiación ultravioleta de 6–18% por cada kilómetro (Blumthaler, 1992, 1994; Frederick, 1993). Vanicek y colaboradores propusieron la siguiente expresión que relaciona la radiación solar ultravioleta eritematica (*UVER*) con la altitud  $\Delta h$  (m.s.n.m) para cielos despejados (Vanicek, 1999):

$$UVER = UVER_{mar} (1 + 0.08\Delta h) \quad (1.26)$$

En el trabajo de Koepke (2002), se ha notado un incremento de 8% a 23% de la *UVER* por kilómetro en diversas ciudades de Bolivia en condiciones de cielos despejado notando que no hay un valor fijo de *UVER*/km, debido a otros parámetros como aerosoles, albedo y la capa de ozono (Koepke, 2006).

Con respecto a la atenuación de la radiación solar debido a los factores atmosféricos que interactúan con la radiación solar, se puede mencionar que en un determinado lugar, la radiación solar llega, tanto en forma *directa*, *difusa* que llegan de todas las direcciones del hemisferio terrestre, es oportuno mencionar que la fracción de la radiación solar, tanto directa o difusa que llega a un determinado lugar, no es constante, sino que varía según su ubicación geográfica, clima. Así mismo se notado que en días totalmente nublados la radiación directa llegar a anularse (Blumthaler, 1994).

Para el modelo de irradiancia que llega a la superficie terrestre, se ha seguido el procedimiento de Varo (2006), que menciona una serie de condiciones; como, por ejemplo, considera una irradiancia **monocromática**,  $I_{n\lambda}$  que incide sobre un medio de densidad  $\rho$ . Al recorrer una distancia  $ds$ , su valor será  $dL_{n\lambda}$  (Varo, 2006).

$$dI_{n\lambda} = -I_{n\lambda} k_{\lambda} \rho(s) ds \quad (1.27)$$

Donde:

$k_\lambda$  : Es el coeficiente monocromático de atenuación del medio

Por otro lado, la irradiación en una dirección puede aumentar debido a los procesos de **dispersión múltiple y emisión**, que dan lugar en el interior del medio. Para describir este fenómeno se utiliza un coeficiente, que se denomina función fuente,  $j_\lambda$  con un significado físico similar a  $k_\lambda$

$$dI_{n\lambda} = j_\lambda \rho(s) ds \quad (1.28)$$

Teniendo en cuenta las expresiones anteriores, la irradiación al atravesar un espesor  $ds$  se puede escribir como una suma apropiada como (Varo, 2006):

$$dI_{n\lambda} = -I_{n\lambda} k_\lambda \rho(s) ds + j_\lambda \rho(s) ds \quad (1.29)$$

En la ecuación (1.29) se acostumbra a definirse la función fuente general como:

$$J_\lambda = \frac{j_\lambda}{k_\lambda} \quad (1.30)$$

Reemplazando (1.29) en (1.30) se tiene la ecuación fundamental para cualquier proceso de **transferencia radiactiva**. Observándose dos contribuciones de la irradiancia: una pérdida debida a la absorción y dispersión del medio y un aumento debido a la emisión del medio y a los procesos de dispersión de la irradiación desde otras direcciones (Varo, 2006).

$$dI_{n\lambda} = -I_{n\lambda} k_\lambda \rho(s) ds + J_\lambda k_\lambda \rho(s) ds \quad (1.31)$$

$$\frac{dI_{n\lambda}}{k_\lambda \rho(s) ds} = -I_{n\lambda} + J_\lambda \quad (1.32)$$

Si se desprecia el aumento debido a la dispersión y la emisión del medio y considerando solo la atenuación de la irradiación solar, la ecuación anterior se reescribe como:

$$\frac{dI_{n\lambda}}{k_\lambda \rho(s) ds} = -I_{n\lambda} \quad (1.33)$$

Integramos sobre el espesor total del medio, la irradiación emergente será:

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} e^{-\int_0^s k_{\lambda} \rho(s) ds} \quad (1.34)$$

Considerando **medios homogéneos**,  $k_{\lambda}$  es independiente de  $s$ , luego la expresión anterior toma la siguiente forma:

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} e^{-k_{\lambda} \int_0^s \rho(s) ds} \quad (1.35)$$

En esta ecuación, resulta interesante definir la **masa óptica** de un componente atmosférico  $m$ , como una magnitud que expresa la masa de esta sustancia, por unidad de sección recta que encuentran los rayos solares en su camino (ecuación 1.35).

$$m = \int_0^s \rho(s) ds \quad (1.36)$$

De acuerdo con esta definición, **se obtiene la Ley de Beer-Bourger-Lambert** (ecuación 1.35) que permite estimar la irradiancia en una determinada dirección en función de la irradiancia incidente, la masa óptica y el coeficiente de extinción del medio y donde el término  $k_{\lambda} m$  se denomina espesor óptico monocromático ahora la expresión (1.36) es:

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} e^{-k_{\lambda} m} \quad (1.37)$$

Considerando que los procesos que atenúan la radiación solar son independientes unos de otros, el espesor óptico monocromático lo podemos expresar como (Gueymard, 2005):

$$k_{\lambda} m = \sum_{i=1}^{i=j} k_{i\lambda} m_i \quad (1.38)$$

Donde

$k_{i\lambda}$  : Es el coeficiente monocromático de atenuación para el proceso  $i$

$m_i$  : Es la masa óptica para el proceso  $i$

El proceso de atenuación sigue la siguiente figura 13

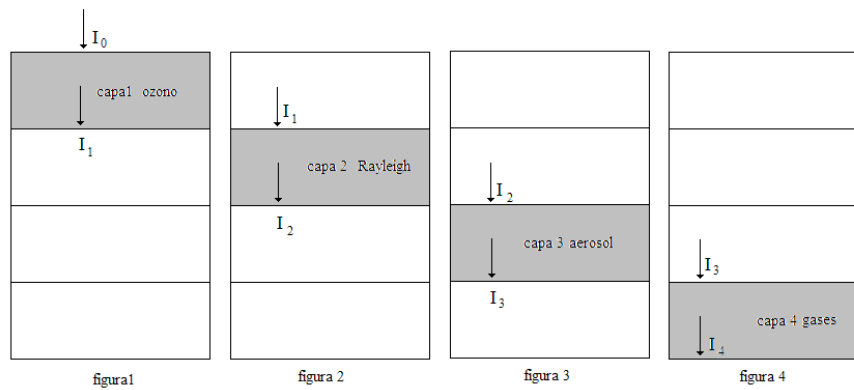


Figura 13. Esquema de la transmitancia atmosférica

La transmitancia  $T_{i\lambda}$  para las capas 1, 2, 3 y 4 es:

$$T_{o\lambda} = \frac{I_1}{I_0} \quad (1.39)$$

$$T_{R\lambda} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.40)$$

$$T_{a\lambda} = \frac{I_3}{I_2} \quad (1.41)$$

$$T_{g\lambda} = \frac{I_4}{I_3} \quad (1.42)$$

Multiplicando las expresiones anteriores tenemos  $T_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{g\lambda} = \frac{I_1}{I_0} \frac{I_2}{I_1} \frac{I_3}{I_2} \frac{I_4}{I_3}$

, simplificando

$$T_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{g\lambda} = \frac{I_4}{I_0} \Rightarrow I_4 = I_0 T_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{g\lambda}, \text{ en general}$$

$$I_{n\lambda} = I_{0n\lambda} T_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{g\lambda} \quad (1.43)$$

### 1.1.7. El espectro de acción eritemático

Para medir los efectos de la radiación solar ultravioleta se utilizan los espectros de acción eritemática. Este espectro de acción describe la efectividad de distintas longitudes de onda que generan un daño biológico. Son diseñados, como por ejemplo el espectro de activación de la vitamina D, la producción de cataratas (Madronich, 1998).

Uno de los efectos nocivos que produce la radiación UV sobre la salud de las personas es la quemadura solar de piel conocido como eritema. El espectro de acción de esta respuesta biológica (espectro eritemático, figura 14) fue definido por McKinley y Diffey (1987), citado por (Román, 2010) basado en el daño que provoca la radiación solar sobre la piel de los humanos. Si la radiación UV espectral recibida en superficie se multiplica con el espectro de acción y se integra desde 280 a 400 nm, se obtiene la radiación solar ultravioleta eritemática (*UVER*) según la siguiente ecuación:

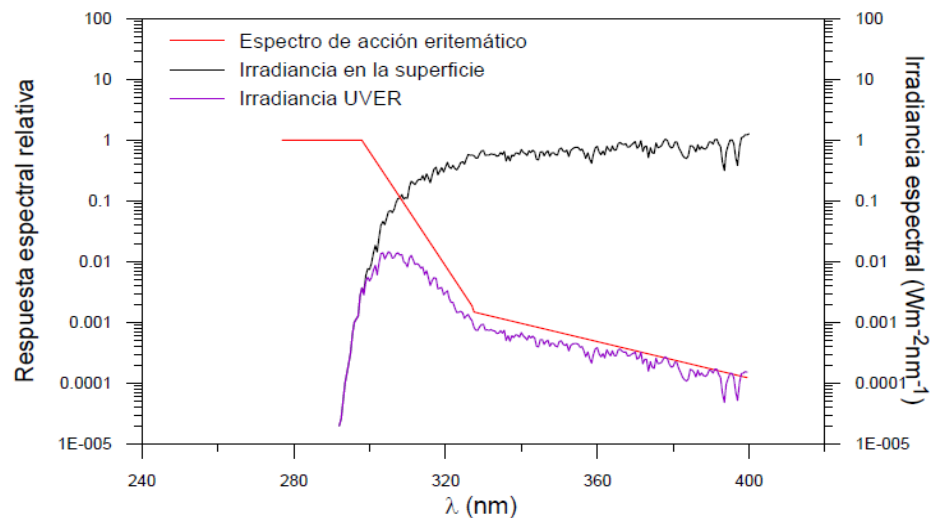


Figura 14. Espectro de acción eritemático

$$UVER = \int_{280}^{400} I_G \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (1.44)$$

Donde:

$$\varepsilon(\lambda) = \left. \begin{array}{ll} 250 < \lambda < 298 & \varepsilon = 1 \\ 298 < \lambda \leq 328 & \varepsilon = 10^{0.094(298-\lambda)} \\ 328 < \lambda \leq 400 & \varepsilon = 10^{0.015(139-\lambda)} \\ 400 < \lambda & \varepsilon = 0 \end{array} \right\} \quad (1.45)$$

Siendo  $I_G$  la irradiancia espectral ultravioleta proveniente del sol en la superficie terrestre.

La radiación solar UVER tiene las mismas unidades que la radiación ultravioleta tipo B o la radiación solar global.

## El índice ultravioleta (IUV)

El índice ultravioleta (IUV) es un indicador de la capacidad de la radiación UV para producir lesiones en la piel, basa en la radiación UVER (WHO, 2003) en colaboración con la Comisión Internacional sobre Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP), Organización Meteorológica Mundial (WMO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). El objetivo era la necesidad de informar a las personas, sobre en qué momento es más peligroso la exposición al Sol y como protegerse de éste. Desde su primera publicación en 1995, se han realizado varias reuniones internacionales con expertos, con la finalidad de mejorar su uso como instrumento educativo para fomentar la protección solar (WHO, 2003).

El índice UVI se calcula como la irradiancia UVER multiplicada por una constante de proporcionalidad de  $40 \text{ m}^2/\text{W}$ , y se muestra como un número entero (WHO, 2003).

$$IUV = \text{entero} (40 UVER) = \text{entero} \left[ 40 \int_{280}^{400} I_{G\lambda} \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda \right] \quad (1.46)$$

Varia aproximadamente entre 1 y 12 (llega a valores más altos según la geografía del lugar), lo cual es más amigable para el público cuando recibe esta información. En este aspecto existe el código de colores, que relaciona el daño eritemático con el UVI y con un color Tabla 1, figura 15 (WHO, 2003).

Tabla 1

*Categoría de exposición a la radiación ultravioleta*

Categoría de Exposición	Intervalo de valores del IUV
Baja	< 2
Moderada	3 a 5
Alta	6 a 7
Muy alta	8 a 10
Extremadamente alta	11 +

Fuente: OMS, 2003



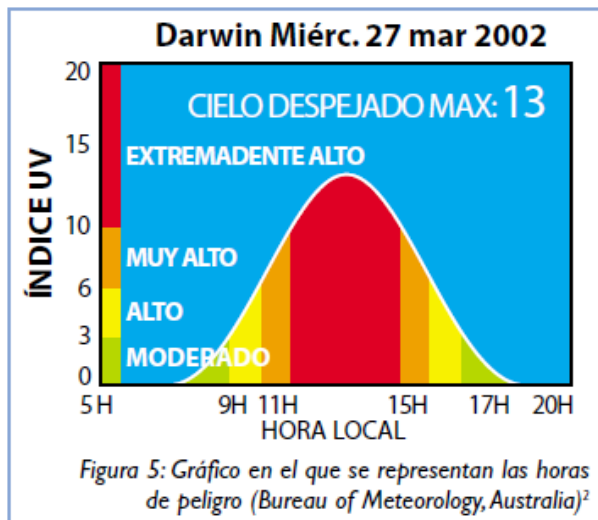


Figura 15. Exposición al IUUV

Fuente: OMS, 2003

### 1.1.8. Modelo espectral del índice de radiación ultravioleta

Numerosos estudios han sido realizados para el cálculo o estimación de las diferentes irradiancias sobre una superficie dada. La motivación de estos estudios ha sido muy distinta, también, las metodologías de trabajo. Algunos modelos solo analizan los cielos despejados con el fin de realizar calibraciones precisas en aparatos de medición, así como para obtener las curvas de irradiancia en una ubicación en particular para la instalación de una planta fotovoltaica (Escamilla, 2010).

En el trabajo de investigación nos proponemos a desarrollar el modelo físico de irradiancia directa, difusa y global que pasa a través de la atmósfera.

La irradiancia solar directa recibida en la superficie terrestre horizontal para a una determinada longitud de onda  $\lambda$ , está definida por la siguiente expresión (Bird, 1986; Iqbal, 1983).

$$I_{D\lambda} = I_{0\lambda} E_0 T_{r\lambda} T_{a\lambda} T_{0\lambda} * \cos(Z) \quad (1.47)$$

Dónde:

$I_{0\lambda}$  : Es la irradiancia solar extraterrestre UV a la distancia media Tierra-Sol, aproximadamente  $106 \text{ W/m}^2$  Irradiancia solar extraterrestre UV.

$E_0$  : Es el factor de corrección para distancia Tierra Sol.

$T_{r\lambda}$  : Es la transmitancia de Rayleigh.

$T_{a\lambda}$  : Es la transmitancia de aerosol.

$T_{0\lambda}$  : Es la transmitancia debido al ozono.

### 1.1.8.1. Transmitancia por dispersión de Rayleigh $T_{r\lambda}$

Según Iqbal (1983) está dado por la siguiente expresión:

$$T_{r\lambda} = \exp(-0.008735\lambda^{-4.08} * m_a) \quad (1.48)$$

Donde la **masa de aire corregida**  $m_a$ , está dada por la siguiente expresión:

$$m_a = m_r \frac{P}{P_0} \quad (1.49)$$

Donde la **masa de aire óptica relativa**  $m_r$  está dado por la siguiente expresión (Kasten, 1989):

$$m_r = \frac{1}{\cos(Z * \pi / 180) + 0.15(93.885 - Z)^{-1.253}} \quad (1.50)$$

Dónde:

$Z$ : está en grados, mientras que la conversión de  $Z * \pi / 180$  esta en radianes

Por ejemplo.

Para  $Z = 75^\circ$  se obtiene

$$m_r \cong 3.8 \quad (1.51)$$

Mientras que  $P$ , es presión del lugar y  $P_0$  es la presión a nivel del mar, la formula empírica es (Escamilla, 2010):

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{h}{8.62}\right) \quad (1.52)$$

Donde:

$h$ : Es la altitud del lugar en km

Para la ciudad de Puno la presión es aproximadamente

$$h = 3.825 \text{ km}$$

$$P_o = 1\ 013 \text{ mb}, \text{ luego} \quad (1.53)$$

$$P = 646.53 \text{ mb} \quad (1.54)$$

Reemplazando (1.54), (1.53) en (1.49) tenemos la masa de aire corregida

$$m_a = 0.638 m_r \quad (1.55)$$

La figura 16 muestra la relación entre masa relativa y el ángulo cenital

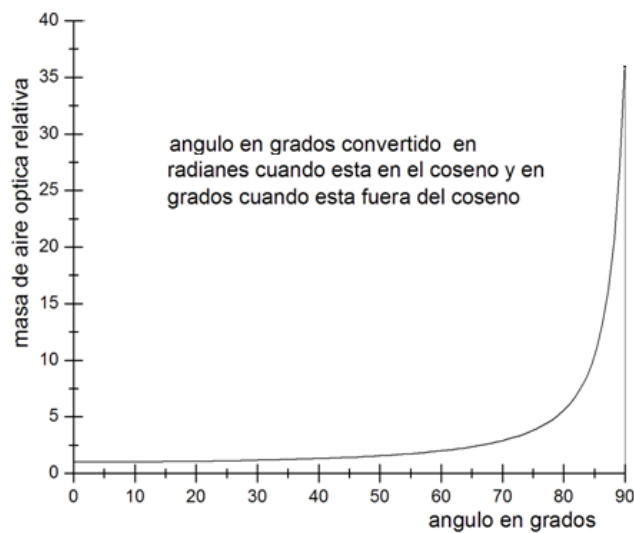


Figura 16. Masa relativa óptica

La transmitancia de Rayleigh en el intervalo  $[0.28-0.315] \mu\text{m}$  y una masa óptica corregida  $m_a = 1$ , se tiene el comportamiento como se indica en la figura 17.

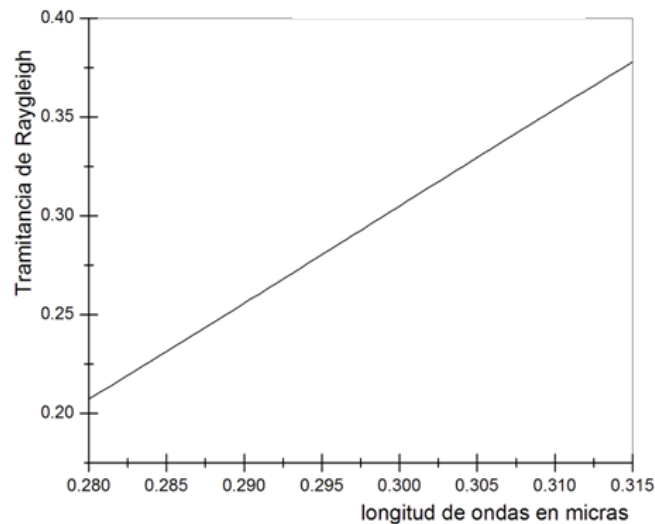


Figura 17. Transmitancia de Raleigh

Notándose un comportamiento casi lineal en este intervalo.

### 1.1.8.2. Transmitancia por extinción de aerosol $T_{a\lambda}$

La transmitancia por la extinción de aerosol se define a partir del espesor óptico de aerosol (Bird, 1986):

$$T_{a\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha} * m_a) \quad (1.56)$$

Donde:

$\alpha$  : Es un exponente estrechamente *relacionado con el tamaño y la forma de distribución* de las partículas, varía desde  $1.3 \pm 0.5$  o  $[0.8-1.8]$ .

$\beta$  : Es el llamado *coeficiente de turbiedad* de angstrom y proporcional a la cantidad de materia presente en una columna vertical de sección unitaria, varía de  $[0 - 0.4]$ .

Considerando  $\alpha = 1.25$ ,  $\beta = 0.2$  y  $m_a = 1$ , tenemos el comportamiento de la transmitancia debido a los aerosoles en el intervalo de  $[0.28-0.315]$   $\mu m$  que se muestra en la siguiente figura 18.

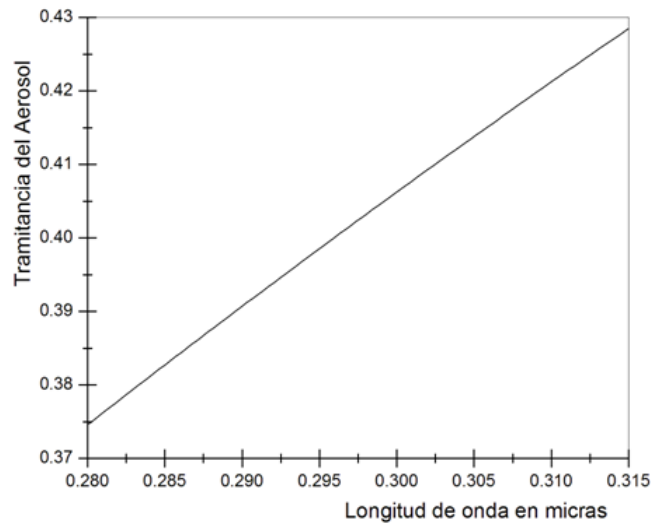


Figura 18. Transmitancia de los aerosoles en este intervalo

Notando se un comportamiento casi lineal en dicho intervalo de longitud de onda

### 1.1.8.3. Transmitancia por absorción de ozono $T_{o\lambda}$

La Transmitancia que describe la absorción debido al ozono se expresado por:(Gueymard, 2003):

$$T_{o\lambda} = \exp(-m_o u_o A_{o\lambda}) \quad (1.57)$$

Donde:

$m_o$  : Es la masa óptica de ozono de Robinson

$u_o (atm - cm)$  : Es el espesor de capa de ozono en unidades Dobson (DU)

$A_{o\lambda}$  : Es el coeficiente de absorción de ozono.

La transmitancia debido al ozono: (Iqbal, 1983):

$$T_{o\lambda} = \exp(-2.2968 \times 10^{18} * u_o * m_o * \exp(-\frac{\lambda}{0.00751})) \quad (1.58)$$

Mientras que la masa óptica de ozono de Robinson, está dado por la siguiente expresión (Wright, 2010):

$$m_o = \frac{1 + (\xi_3 / r_e)}{[\cos^2 z + 2(\xi_3 / r_e)]^{0.5}} \quad (1.59)$$

Donde:

$\xi_3 = 18.175 \text{ km}$ , es la altura de la capa de ozono desde la estación radiométrica ( $h = 3.825 \text{ km}$ ), hasta el borde superior de la atmosfera que es aproximadamente 22 km a nivel del mar.

$r_e = 6\,370 \text{ km}$ ; es el radio de la Tierra; teniendo en cuenta estos valores la expresión anterior es:

$$m_o = \frac{1 + (18.175 / 6\,370)}{[\cos^2 Z + 2(18.175 / 6\,370)]^{0.5}} \quad (1.60)$$

El comportamiento de la masa óptica del ozono en función del ángulo cenital se muestra en la siguiente figura 19.

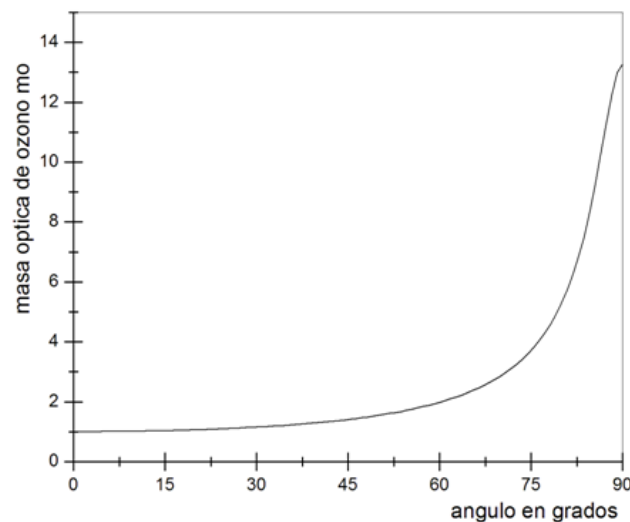


Figura 19. Masa óptica del ozono en función del ángulo cenital

Para realizar el comportamiento de la transmitancia del ozono, podemos considerar arbitrariamente  $u_o = 240 \text{ DU} = 0.24 \text{ atm-cm}$  y  $m_o = 1$ , luego se tiene la siguiente expresión:

$$T_{o\lambda} = \exp(-2.2968 \times 10^{18} * u_o * m_o * \exp(-\frac{\lambda}{0.00751})) \quad (1.61)$$

El comportamiento de la transmitancia debido al ozono en la región ultravioleta  $[0.28-0.315] \mu\text{m}$  se muestra en la siguiente figura 20

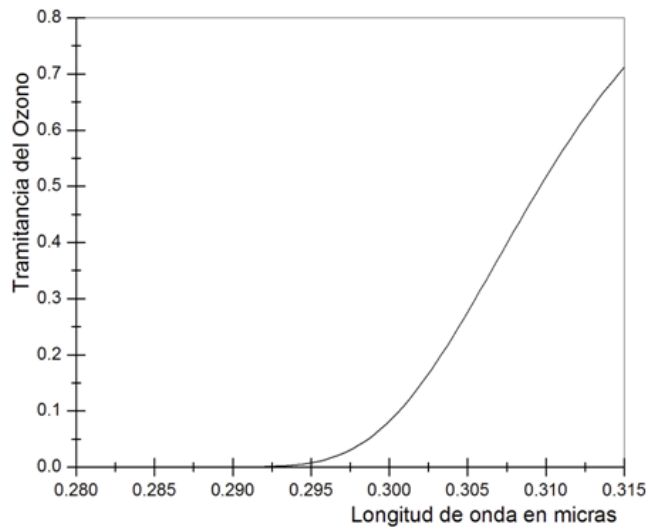


Figura 20. Transmitancia del ozono en función de la longitud de onda

El propósito es ahora observar el comportamiento de la transmitancia total debido a las 3 transmitancias descritas anteriormente, la expresión es la siguiente:

$$T = T_{r\lambda} T_{a\lambda} T_{o\lambda} = e^{-0.008735\lambda^{-4.08} * m_a} * e^{-0.2\lambda^{-1.25} * m_a} * e^{-2.2968 \times 10^{18} * u_o * m_o * e^{-\frac{\lambda}{0.00751}}} \quad (1.62)$$

Si consideramos arbitrariamente  $m_o = m_a = 1$ ,  $u_o = 0.25$  en el intervalo de  $[0.28-0.315] \mu m$  se tiene la siguiente figura 21.

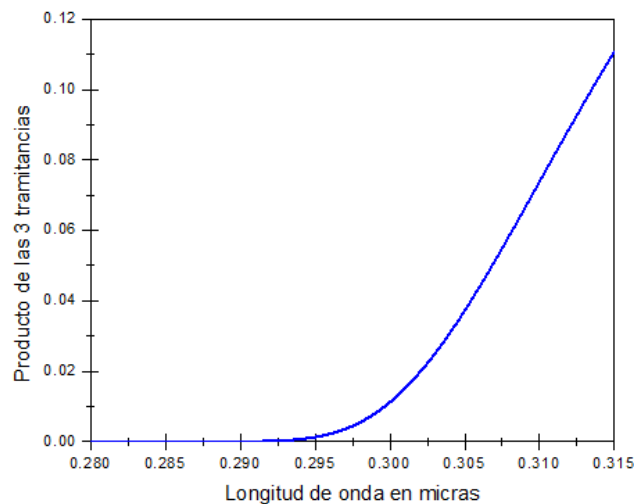


Figura 21. Producto de las tres transmitancias

Se observa que predomina fuertemente la transmitancia del ozono respecto a las otras dos transmitancias.

#### 1.1.8.4. Irradiancia difusa $I_{d\lambda}$

Para determinar la irradiancia solar difusa hemos seguido el modelo expuesto por Bird que considera tres procesos de difusión fundamentales, como la dispersión de Rayleigh, dispersión aerosol y del albedo terrestre respectivamente, la expresión es (Bird, 1986):

$$I_{d\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_{dm\lambda} \quad (1.63)$$

#### 1.1.8.5. Irradiancia difusa debido a la dispersión de Rayleigh

La irradiancia UV difusa espectral producido por la dispersión de Rayleigh que llega después haber sufrido procesos absorción en la atmósfera se determina de la ecuación:(Bird, 1986); (Iqbal, 1983)

$$I_{dr\lambda} = I_{0n\lambda} \cos(Z) T_{\max} [0.5(1 - T_{ray}) T_{aer}] \quad (1.64)$$

#### 1.1.8.6. Irradiancia difusa debido a la dispersión de Aerosoles

La irradiancia difusa dispersada por los aerosoles que llega al suelo después de su primer pasó a través de la atmósfera, se obtiene a partir de la siguiente ecuación (Bird, 1986; Justus, 1985; Wright, 2010):

$$I_{da\lambda} = I_{0n\lambda} \cos(Z) T_{\max} [F_c w_o (1 - T_{aer}) T_{ray}] \quad (1.65)$$

#### 1.1.8.7. Irradiancia múltiple $I_{dm\lambda}$

La irradiancia múltiple está dada por (Iqbal, 1983)

$$I_{dm\lambda} = Q_{\lambda} (\rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda} / 1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda})$$

Donde  $Q_{\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_D$

Que se puede expresar también como:

$$I_{dm\lambda} = (I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_D) \left( \frac{\rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}} \right) \quad (1.66)$$

Reemplazando (1.66) en (1.63)



$$I_{d\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + (I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_D) \left( \frac{\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}} \right)$$

Homogenizando y distribuyendo

$$I_{d\lambda} = \frac{(I_{dr\lambda} + I_{da\lambda}) - (I_{dr\lambda} + I_{da\lambda})\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda} + (I_{dr\lambda} + I_{da\lambda})\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda} + I_D\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}$$

, Simplificando

$$I_{d\lambda} = \frac{I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_D\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}} \quad (1.67)$$

Finalmente la irradiación global  $I_{G\lambda}$  se expresa como una suma apropiada de la irradiancia directa y difusa, es decir (Bird, 1986):

$$I_{G\lambda} = I_{D\lambda} + I_{d\lambda} \quad (1.68)$$

Reemplazando (1.67) en (1.68)

$$I_{G\lambda} = I_{D\lambda} + \frac{I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_D\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}, \text{ homogenizando y distribuyendo}$$

$$I_{G\lambda} = \frac{I_{D\lambda} - I_D\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda} + I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_D\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}$$

Simplificando

$$I_{G\lambda} = \frac{I_{D\lambda} + I_{dr\lambda} + I_{da\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}} \quad (1.69)$$

Como:

$$I_{D\lambda} = I_{n\lambda} \cos(Z) = E_o I_{on\lambda} \tau \cos(Z) = E_o I_{on\lambda} T_{r\lambda} T_{a\lambda} T_{o\lambda} \cos(Z) \quad (1.70)$$

$$I_{dr\lambda} = I_{on\lambda} \cos(Z) T_{o\lambda} [0.5(1 - T_{r\lambda}) T_{a\lambda}] \quad (1.71)$$

$$I_{da\lambda} = I_{on\lambda} \cos(Z) T_{o\lambda} [F_c w_o 0.5(1 - T_{a\lambda}) T_{r\lambda}] \quad (1.72)$$

Reemplazando (1.70), (1.71) y (1.72) en (1.69)

$$I_{G\lambda} = \frac{I_{0n\lambda} T_{o\lambda} [E_o T_{r\lambda} T_{a\lambda} + 0.5(1 - T_{r\lambda}) T_{a\lambda} + F_c W_o (1 - T_{a\lambda}) T_{r\lambda}] \text{Cos}(Z)}{1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}}$$

Integrando la expresión anterior desde 280 a 400 nm se tiene:

$$I_{G\lambda} = 40 \sum_{280}^{400} \frac{[E_o T_{r\lambda} T_{a\lambda} + [0,5(1 - T_{r\lambda}) T_{a\lambda}] + [F_c \omega_0 (1 - T_{a\lambda}) T_{r\lambda}]] T_{0\lambda} I_{0n\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}} \Delta\lambda \text{Cos}(Z) \quad (1.73)$$

Esta expresión es la que se programa en código **fortran**, **Matlab**. Etc. Obteniéndose los *IUV* estimados y compara los datos obtenidos por la estación radiométrica.

### 1.1.9. Otros modelos de estimación

Se han realizado gran número de modelos de estimación de radiación solar incidente con el uso de diferentes variables meteorológicas. Entre los más utilizados y validados por la comunidad científica se encuentran:

Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (**SMARTS**) (Gueymard, 2005). Es un modelo espectral de dispersión simple escrito en código fortran, predice la radiación solar directa, difusa y global en una superficie, con cualquier orientación sobre la tierra, cubre la totalidad del espectro de onda corta (280 nm a 4000 nm). Está disponible en la siguiente página web <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/smarts.html>

Trospheric Ultraviolet and Visible Radiation model (**TUV**). Este modelo fue desarrollado en la división de química atmosférica del centro nacional para la investigación de la atmosfera en Estados Unidos (Madronich, 1997) está escrito en código fortran, el modelo permite realizar cálculos en el rango de longitudes de onda de (121 a 759 nm), utiliza el algoritmo DISORT, se encuentra disponible en la siguiente página web <https://www2.acom.ucar.edu/modeling/tuv-download>.

Santa Barbara Disort Atmospheric Radiative Transfer (**SBDART**), es un modelo de transferencia radiactiva de dispersión múltiple que considera la atmosfera, como una aproximación plano paralelo. El programa está escrito en código fortran, está disponible de forma gratuita en la red.

<https://paulschou.com/tools/sbdart/>

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Antecedentes a nivel internacional

Debido a su importancia a nivel mundial, hay muchos países que desarrollan modelos para la estimación del *IUV*, la radiación ultravioleta tipo B, la dosis mínima del eritema (*MED*). Estos modelos permiten informar oportunamente a la población sobre los efectos que pueden causar en la salud.

En el trabajo de Gandía se correlaciono los valores diarios de la radiación UV-B y la radiación solar global (300–2800 nm) para el periodo 2000-2008 en 16 lugares diferentes de España; estos resultados del modelo se compararon con las medidas entre los años 2009-2011. Obteniéndose los coeficientes de determinación  $R^2$  por encima a 0.88 y aumentan a 0.94 cuando se utiliza una regresión cuadrática. (Gandia, 2015).

Wang realiza una investigación de la variabilidad la radiación ultravioleta y su relación con la radiación solar global en la ciudad de Fukang en China, en el periodo 2004 a 2012 para diversos tipos de cielo. Utilizo el índice de claridad (*Kt*) para caracterizar las condiciones del cielo y el desarrollo del modelo UV, en donde se observó que, los cielos despejados eran mayores (48.72%), seguidas de los cielos parcialmente nublados (32.56%) y nublados (18.72%). El modelo se evaluó a través de los indicadores estadísticos, como el error de sesgo medio (*MBE*), error de sesgo absoluto promedio (*MABE*) y error cuadrático medio (*RMSE*) cuyos valores fueron 1.27%; 4.64% y 6.26% respectivamente (Wang, 2014).

Miguel publicó en el 2011, registros sobre las irradiaciones solares ultravioleta (*UVER*, 280–400 nm) y global (300–3000 nm) y posteriormente se analizaron en un área rural de Valladolid (España) durante un período entre junio de 2002 a diciembre de 2008. Las mediciones diarias de *UVER* siguen el comportamiento del ángulo de elevación solar, resultando irradiancias promedio máximas por hora, que ocurren en el mes de julio, cuyo valor es  $0.20 \text{ W/m}^2$  y mínimas es de  $0.03 \text{ W/m}^2$  en diciembre al mediodía. El *UVER* acumulado a lo largo de un año alcanza  $1470 \text{ kJ/m}^2$  y su distribución de la radiación ultravioleta eritemal, tiene un 25% de claridad, un 57% parcialmente nublado y un 18% de días nublados (Miguel, 2011).

Existen también diversas investigaciones en esta parte del continente como el trabajo realizado por Luccini en el año 2007 en la península antártica en Argentina. La investigación muestra la presencia de nubes *estratocúmulos* en algunos días donde la radiación ultravioleta aumenta por encima del valor esperado, conocido como *efecto realce* (Luccini, 2007).

Además, la radiación ultravioleta tiene incidencia en la flora y fauna. Por ejemplo durante la década de los años 70-90 se realizaron diversos estudios sobre la exposición de las plantas a niveles elevados de radiación ultravioleta tipo B (Briggs, 2006; Caldwell, 1971; Krizek, 2004; Runeckles, 1994; Teramura, 1991; Vu, 1984).

Cabe resaltar el trabajo de Zhang donde se expuso durante 90 días dos tipos de plantas a irradiaciones ultravioletas tipo A y B, notando un alargamiento de 45 % mayor en un tipo de planta que no estuvo expuesta; mientras que, el otro tipo de planta fue un 58% mayor comparado con la expuesta a dicha radiación (figura 22) (Zhang, 2014).

Michael Sweet desarrolló un trabajo en la costa este de Australia entre agosto de 2010 y febrero de 2012; se ha reportado que peces silvestres desarrollan melanosis y melanoma (cáncer de piel), en un tipo de pez conocido y de importancia comercial como es la trucha coral (*Plectropomus leopardus*). En dicho trabajo se tomaron muestras 136 peces y luego se fotografiaron, 20 de los cuales mostraron signos de anomalías en la piel (Figura 23) (Sweet, 2012).

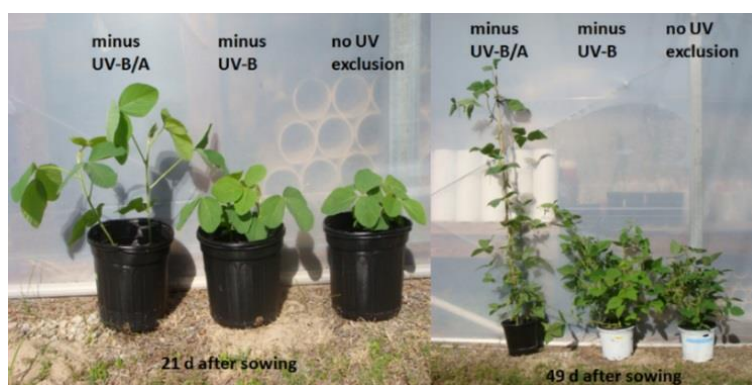


Figura 22. Crecimiento de dos tipos plantas (Zhang, 2014)



*Figura 23.* Alteración en la piel de los peces (Sweet, 2012)

### **1.2.2. Antecedentes a nivel nacional**

En nuestro país se realizan algunas investigaciones relacionadas con la radiación solar ultravioleta en diversas instituciones del estado, como:

Ccora realiza en el mes de abril del 2016 un monitoreo en la región sur del país, donde observó que la tendencia de la intensidad de la radiación ultravioleta tipo B, se mantuvo supeditada a factores geográficos (altitud) y astronómicos (distanciamiento de la tierra respecto al sol). Notándose la presencia de anomalías negativas de la radiación en onda larga, especialmente en la selva sur y parte de la sierra; esto permitió la formación de nubes de mediano desarrollo vertical, son generadoras de precipitación fhluvial, y permiten que los niveles de radiación UV registrados sean menores en el mes de marzo (Ccora, 2020).

Mimbela en el año 2016, desarrolla un análisis sobre el comportamiento estacional de la radiación ultravioleta en diferentes sectores de la región Piura como la costa norte del Perú. Desde un aspecto cualitativo, emplea la escala de valores del Índice UV, definida de 1 a 14 según la organización mundial de la salud. Los resultados, demuestran la variabilidad del índice de radiación ultravioleta en función de los factores atmosféricos y geométricos, concluyendo que la región de Piura presenta niveles de radiación ultravioleta entre altos a extremos durante todo el año (Mimbela, 2016).

Suarez (2002), emplea un modelo de transferencia radiactiva TUV, con los parámetros apropiados para las condiciones atmosféricas de la ciudad de Huancayo. El análisis determino la buena correlación entre los datos y los cálculos efectuados

por el modelo de 0.88, esto permitió validar el modelo para pronosticar el eritema en la ciudad de Huancayo (Suárez, 2012).

### **1.2.3. Antecedentes a nivel locales**

En el año 2013 se aplica un modelo para la ciudad de Puno a partir de ecuaciones paramétricas para estimar la radiación solar ultravioleta tipo B y su relación con los factores atmosféricos y geométricos (Huillca, 2013). Posteriormente en el año 2015 se compara el modelo paramétrico aplicado con los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para el distrito de Upina en la provincia de Carabaya, región Puno, notándose una buena performance cuyo coeficiente de determinación fue 0.97 para días sin presencia de nubes (Huillca, 2015). En el año 2017 se aplica un modelo espectral del IUV y se compara con las mediciones de 6 días arbitrarios, de cielos sin presencia de nubes para la ciudad de Puno. Los datos fueron proporcionados por la estación meteorológica ubicado en la ciudad universitaria de la Universidad Nacional del Altiplano, mostraron un coeficiente de determinación de 0.98. Así mismo la aplicación del modelo empírico permitió estimar el porcentaje de radiación ultravioleta tipo B en un 76.4% respecto a un 23.6% correspondiente a la radiación ultravioleta tipo A (Huillca, 2017).

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Identificación del problema

La ciudad de Puno debido a su ubicación geográfica y su altitud de 3820 msnm, goza de afluencia de turismo nacional e internacional; sin embargo en los Andes peruanos se presenta altos índices de radiación ultravioleta (Suárez, 2017), por tanto, la población y la diversidad de los recursos naturales, está expuesta a valores muy altos del IUV en ciertas estaciones del año. La literatura acerca del IUV indica que la exposición prolongada puede dar como resultados problemas agudos y crónicos sobre la piel y los ojos (Fabo, 2004). Dentro de los problemas agudos se puede contar con efectos degenerativos sobre la piel y los vasos sanguíneos causando envejecimiento prematuro de la piel y reacciones de tipo alérgicas, como foto-queratitis (CIE, 2002). Otro de los problemas de salud se encuentra el cáncer a la piel (WHO, 2004) y las cataratas (Dolin, 1994); Pterigion (Aragones, 2009). Así mismo tiene efectos sobre la agricultura, vida acuática (Sweet, 2012), etc. Por otro lado, con el déficit de energía actual se requiere el estudio de nuevas fuentes de energía renovables (Adhikari, 2013).

Actualmente los trabajos de investigación sobre el IUV en la región Puno son muy escasos y como consecuencia no se conoce el comportamiento del IUV en una serie de tiempo. Por esta razón se proponen modelos empíricos que permitan la estimación del Índice de radiación solar ultravioleta. En esta investigación se aplicó el modelo SMARTS haciendo uso de factores atmosféricos y geométricos en el altiplano de la ciudad de Puno.

## 2.2. Enunciados del problema

### 2.2.1. Problema general

¿De qué manera influyen los factores atmosféricos y el ángulo cenital del Sol respecto a la Tierra en la estimación del índice de radiación solar ultravioleta en la ciudad de Puno?

### 2.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cómo es el comportamiento temporal del índice de radiación solar ultravioleta observada en el periodo de estudio en la ciudad de Puno?
- b) ¿Cuánto es el índice de radiación solar ultravioleta aplicando el modelo empírico SMARTS en la ciudad de Puno?

## 2.3. Justificación

La contaminación ambiental ha generado una disminución de la capa de ozono estratosférico debido a las reacciones químicas provocadas durante muchos años por los gases clorofluorocarbonos, provocando un aumento en los valores del IUV incidentes sobre la Tierra, siendo especialmente preocupante el incremento de la radiación solar ultravioleta tipo B (UV-B), éste tipo de radiación son las más perjudiciales en los seres vivos (WHO, 2003).

Debido a la importancia de los efectos nocivos de una sobreexposición de la radiación solar el estado peruano emitió el 15 de octubre del 2013, la ley 30102 *ley que dispone de medidas preventivas contra los efectos nocivos para la salud por la exposición prolongada a la radiación solar* (Ley, 2013). En el Perú la **Dirección Nacional de Epidemiología** ha reportado el periodo 2006 y 2010 un total 5 975 casos de cáncer a la piel, donde 2 744 casos corresponde en varones y 3231 en mujeres, según este informe el cáncer a la piel ocupa el *cuarto lugar* de frecuencia a nivel nacional; donde la Libertad representa un (10.7%), Cajamarca (9.5%); Amazonas (7.9%); Arequipa(7.8%), Ayacucho (7.3%) en este informe *no se menciona a la región Puno* (Sordo, 2013).

Resulta importante analizar el comportamiento temporal el índice de radiación solar ultravioleta en la ciudad de Puno a evaluar los siguientes aspectos:



El conocimiento del IUV es fundamental para estudiar, planear y diseñar la prevención en la salud de los habitantes.

También como la variable energética del índice ultravioleta está asociado al comportamiento de la dinámica atmosférica; así mismo, para la caracterización de la atmosfera local y su evolución temporal.

Como una variable fundamental en el desarrollo de cultivos, ecosistemas naturales y el turismo mediante la información oportuna del IUV.

La escasa información del IUV ha generado el interés a nivel mundial. Por tal motivo, se aplicó el modelo empírico SMARTS para estimar lo valores del IUV diario y mensual en la ciudad de Puno.

## **2.4. Objetivos**

### **2.4.1. Objetivo general**

Evaluar el índice de radiación ultravioleta en la ciudad de Puno a partir de los factores atmosféricos y el ángulo cenital del sol respecto a la Tierra.

### **2.4.2. Objetivos específicos**

- a) Evaluar el comportamiento temporal del índice de radiación solar ultravioleta observada en el periodo de estudios en la ciudad de Puno.
- b) Estimar el índice de radiación solar ultravioleta en la ciudad de Puno, aplicando el modelo empírico SMARTS.

## **2.5. Hipótesis**

### **2.5.1. Hipótesis general**

Los factores atmosféricos y ángulo cenital del sol respecto a la Tierra influyen directamente en la estimación del índice de la radiación solar ultravioleta en la ciudad de Puno.



### 2.5.2. Hipótesis específicas

- a) El comportamiento temporal del índice de radiación solar ultravioleta observada en el periodo de estudios es variable respecto al ángulo cenital en la ciudad de Puno.
- b) El modelo empírico SMARTS permite estimar el índice de radiación solar ultravioleta en función de los factores atmosféricos y el ángulo cenital del sol respecto a la Tierra en la ciudad de Puno.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Lugar de estudio

El trabajo de investigación se realizó en la Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas, ubicado en la ciudad de Puno, desde enero del 2016 hasta diciembre del 2018 (figura 24).

##### 3.1.1 Ubicación geográfica

La ciudad de Puno está a altitud de 3825 m.s.n.m. sus coordenadas geográficas son:

Latitud	: 15.83° S
Longitud	: 70.03° W
Altitud	: 3 820 m.s.n.m.

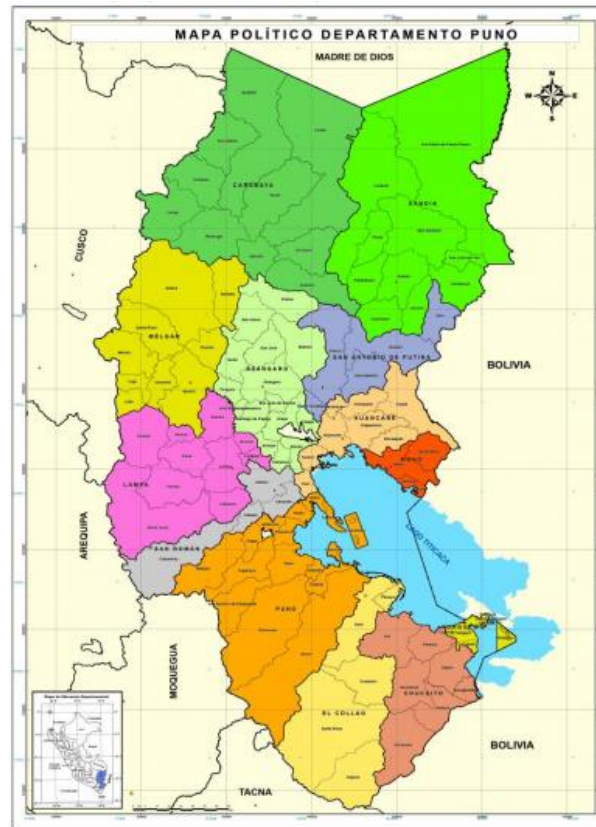


Figura 24. Ubicación de la ciudad de Puno

Fuente:[http://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2020/Presupuesto/files/regiones/puno/1\\_resumen\\_ejecutivo\\_2021\\_-\\_gorepuno-.pdf](http://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2020/Presupuesto/files/regiones/puno/1_resumen_ejecutivo_2021_-_gorepuno-.pdf)

### 3.1.2 Ubicación política

La ciudad de Puno según el Instituto Nacional de Estadística e Informática es la vigésima segunda ciudad más poblada del Perú y albergaba en el año 2017 una población de 135 288 habitantes aproximadamente (INEI, 2017). Su extensión abarca desde el centro poblado de Uros Chulluni al noreste, la zona urbana del distrito de Paucarcolla al norte, la urbanización Ciudad de la Humanidad Totorani al noroeste (carretera a Arequipa) y se extiende hasta el centro poblado de Ichu al sur y la comunidad Mi Perú al suroeste (carretera a Moquegua) (INEI, 2017).

El espacio físico está comprendido desde la orilla oeste del lago Titicaca, en la bahía interior de Puno (antes Paucarcolla), sobre una superficie ligeramente ondulada (la parte céntrica), rodeada por cerros. La parte alta de la ciudad tiene una superficie semiplana (Comunidad Mi Perú, Yanamayo). Oscilando entre los 3 810 a 4 050 msnm (entre las orillas del lago y las partes más altas). Puno es una de las

ciudades más altas del Perú y la quinta del mundo,

<https://es.wikipedia.org/wiki/Puno>.

### **3.1.3 Territorio**

Actualmente la ciudad de Puno tiene una extensión de 1 566.64 ha, la cual representa el 0.24 % del territorio de la provincia de Puno, <https://es.wikipedia.org/wiki/Puno>.

### **3.1.4 Aspectos sociales**

En Puno, las lenguas más habladas es el castellano en un porcentaje menor el aymara y el quechua. En el distrito de Puno se celebran diversas fiestas patronales, siendo la más importante la fiesta de la virgen candelaria en la que participan tanto los pobladores de las zonas urbana y rural, conservando sus tradiciones y costumbres.

### **3.1.5 Aspectos socio-económicos**

La principal actividad económica en la ciudad de Puno es el comercio, donde son comercializados los productos agropecuarios y de consumo (alimentos, vestimentas, etc.), otras actividades: transporte, servicios, hoteles y restaurantes, industria; entre otras.

## **3.2 Población**

Del espectro de la irradiación solar que proviene del sol e incide en la ciudad de Puno. Parte de dicho espectro corresponde al índice de la radiación solar ultravioleta (IUV), la radiación solar global (Rad). Para la recopilación de la información se utilizó el equipo de la Estación meteorológica, siendo la recopilación de datos cada 15 minutos, desde enero del 2016 hasta diciembre del 2018,

## **3.3 Muestra**

Se ha considerado la irradiación solar que incide en la Universidad Nacional del Altiplano, siendo la muestra para la estimación del IUV un conjunto de datos del IUV y la Rad, desde enero del 2016 hasta diciembre del 2018,

## **3.4 Métodos de investigación**

El trabajo de investigación es de tipo correlacionar descriptivo, teórico y no experimental.

Es correlacionar, puesto que se mide el grado de determinación entre variables de estudio. Se obtendrá la correlación entre el IUV medido y calculado con el modelo aplicado en el área de estudio durante el periodo enero 2016 a diciembre del 2018.

Es no experimental, puesto que describe el comportamiento temporal del índice de radiación solar ultravioleta y se relaciona las variables. No se manipula ninguna de las variables de estudio.

Es teórico, puesto que la investigación se basa en modelos espectrales.

### **3.5 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos**

Para evaluar el comportamiento temporal del índice de irradiación solar ultravioleta y la radiación solar global se requiere de datos proporcionados por la estación meteorológica, estos datos son almacenados en el Software Weatherlink, luego se evalúa el comportamiento, tomando como referencia los valores indicados por la OMS durante el periodo de estudio

Para estimar el comportamiento temporal del índice de irradiación solar ultravioleta se aplica una determinada expresión matemática, que utiliza como datos de entrada una serie de parámetros relacionados con factores atmosféricos y geométricos

La técnica que se utiliza en el presente trabajo es básicamente lectura analítica, técnica que consiste en leer un artículo en forma pausada y reflexiva con el propósito de entender e interpretar los resultados científicos. Las estrategias usadas en este trabajo son:

- Búsqueda de información del objeto de investigación.
- Revisión de conocimientos previos, necesarios a través de buscadores en internet, que facilite en la comprensión e interpretación que se va encarar.
- Consultas al asesor y otros entendidos en la materia para consolidar las ideas desarrolladas.

#### **a) Descripción de variables analizadas**

A continuación, se muestra la expresión para elaborar el modelo espectral que estima el IUV en la ciudad de Puno

$$IUV = 40 \int_{285}^{400} I_{G\lambda} \cdot \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

Donde  $\varepsilon(\lambda)$  en nanómetros es el coeficiente de acción eritematica

$$\varepsilon(\lambda) = \left. \begin{array}{ll} 250 < \lambda \leq 298 & \varepsilon = 1 \\ 298 < \lambda \leq 328 & \varepsilon = 10^{0.094(298-\lambda)} \\ 328 < \lambda \leq 400 & \varepsilon = 10^{0.015(139-\lambda)} \\ 400 < \lambda & \varepsilon = 0 \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

Mientras que  $I_{G\lambda}$  es la Irradiancia espectral solar ultravioleta

$$I_{G\lambda} = \left( \frac{[E_0 T_{r\lambda} T_{a\lambda} + [0,5(1-T_{r\lambda})T_{a\lambda}] + [F_c \omega_0 (1-T_{a\lambda})T_{r\lambda}]] T_{0\lambda} I_{0n\lambda}}{1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}} \right) \cos(Z) \quad (3.3)$$

## b) Descripción detallada del uso de la estación meteorológica

### Radiación solar global (Rad)

Los datos de la Radiación solar global (Rad) en el periodo 2 016 a 2 018, obtenido de la estación meteorológica marca Davis modelo Vantage Pro2 Plus cada 15 minutos, desde las 6 am hasta 6 pm. Mientras que para el periodo 2018 los datos son cada 5 minutos.

### Índice ultravioleta (IUV)

Las mediciones del índice ultravioleta (IUV) son reportados en el periodo 2 016 a 2 018 por la estación meteorológica marca Davis modelo Vantage Pro2 Plus cada 15 minutos desde las 6 am hasta 6 pm. Mientras que para el periodo 2018 los datos son cada 5 minutos.

### Estación meteorológica marca Davis Vantage pro 2 plus

La estación de monitoreo meteorológico Davis modelo Vantage Pro2 Plus, que se muestra en la figura 25, es de tecnología innovadora y exactitud excepcional, amplía las opciones de uso de sus centrales automáticas, volviéndolas más versátiles y cómodas para sus diversas aplicaciones.

Tiene implementado un nuevo Sistema de Sensores Integrados (ISS), que agrupa a los sensores de temperatura, humedad relativa, radiación solar, índice ultravioleta, presión, anemómetro y pluviómetro. Sus características más importantes son:

	Solar Radiation	Índice UV
Exactitud nominal (+/-)	1 minute	1 minute
Resolución	1 W/m <sup>2</sup>	0.1 Índice
Rango	0 a 1800 W/m <sup>2</sup>	0 a 16



Figura 25. Estación meteorológica ubicada en la UNA-PUNO

### Consola

La consola que se muestra en la figura 26 exhibe y registra los datos de los sensores exteriores desde el ISS de forma inalámbrica mediante un sistema de radiofrecuencia (921 - 928 MHz) de baja potencia. Esta consola proporciona gráficos y funciones de alarma, se interconecta a la computadora utilizando el software WeatherLink.

La pantalla de la consola y el teclado facilitan el acceso a la información meteorológica y a las condiciones ambientales actuales y pasadas, así como también, a un pronóstico de las condiciones futuras.



Figura 26. Consola donde se almacenan los datos reportados por la estación



### Software WeatherLink

El software se instala en un ordenador para visualizar y almacenar los datos que envía inalámbricamente la estación meteorológica proporciona al usuario una amplia gama de información climatológica. Esta diseñado para almacenar datos hasta 6 meses en la memoria de la consola, las figuras 27 y 28 muestran las salidas de los datos almacenados por la estación utilizando el software WeatherLink .

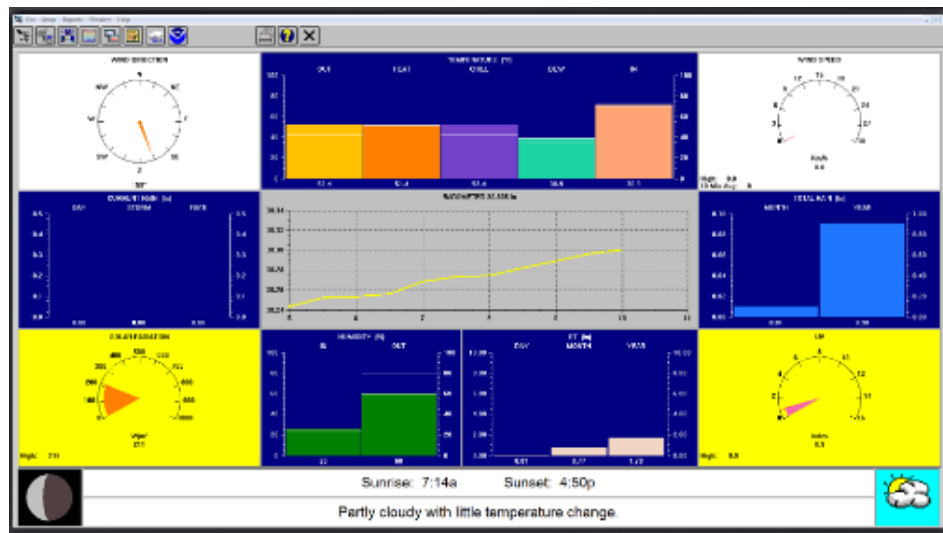


Figura 27. Salida visual de los datos mediante el Software WeatherLink

WeatherLink 6.0.3 24/10/23 10:00: Labo test - [Browse Records]

File Setup Reports Browse Window Help

Rain Rate	Solar Rad.	Solar Hi Energy	Solar Rad.	UV Index	UV Dose	Hi UV	Heat D-D	Cool D-D
0.00	266	1.91	267	3.7	0.16	3.7	0.043	0.000
0.00	266	1.91	267	3.7	0.16	3.7	0.043	0.000
0.00	287	2.06	311	3.9	0.17	4.2	0.043	0.000
0.00	341	2.44	355	4.7	0.20	4.9	0.043	0.000
0.00	371	2.66	388	5.2	0.22	5.5	0.043	0.000
0.00	431	3.09	469	6.1	0.26	6.6	0.044	0.000
0.00	526	3.77	582	7.3	0.31	7.8	0.043	0.000
0.00	655	4.69	694	9.3	0.40	10.9	0.041	0.000
0.00	1103	7.91	1241	14.0	0.60	16.0	0.040	0.000
0.00	695	4.98	842	10.9	0.47	13.5	0.038	0.000
0.00	652	4.67	671	9.3	0.40	9.7	0.038	0.000
0.00	662	4.74	707	9.0	0.39	9.3	0.039	0.000
0.00	649	4.65	708	8.9	0.38	9.4	0.039	0.000
0.00	720	5.16	731	11.0	0.47	12.5	0.040	0.000
0.00	727	5.21	779	10.2	0.44	10.8	0.039	0.000
0.00	701	5.02	719	9.9	0.42	10.5	0.039	0.000

Figura 28. Almacenamiento de los datos en el Software WeatherLink

Los datos diarios han sido sometidos a un análisis estadístico para conocer el comportamiento característico estacional. Las condiciones del cielo se han clasificado como día claro, día parcialmente nublado y día nublado.

### c) Aplicación de prueba estadística inferencial

#### Correlación

Para validar los modelos propuestos en este trabajo se utilizó los siguientes índices estadísticos (Martinez, 1996; Wang, 2014):

- Coeficiente de determinación  $R^2$ :

Es un estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis (Alfaro, 2009).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.4)$$

- **MBE (Mean Bias Error)**, es un indicador de la desviación media entre el modelo y da cuenta para saber si el modelo sobrestima ( $MBE > 0$ ) o subestima ( $MBE < 0$ ) las medidas, está definido como (Mao, 2013; Wang, 2014):

$$MBE(\%) = \frac{100\%}{\bar{X}_{med}} \frac{\sum_{i=1}^N (X_{cal,i} - X_{med,i})}{N} \quad (3.5)$$

- **MABE (Mean Bias Absolute Error)**, es un indicador que sirve para analizar cómo se ajusta el modelo a las medidas. Se define de la forma siguiente:

$$MABE(\%) = \frac{100\%}{\bar{X}_{med}} \frac{\sum_{i=1}^N |X_{cal,i} - X_{med,i}|}{N} \quad (3.6)$$

- **RMSE (Root Mean Square Error)** también es un indicador estadístico que analiza cómo se ajusta el modelo a las medidas, se define como (Yanfeng, 2017):

$$RMSE(\%) = \frac{100\%}{\bar{X}_{med}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{cal,i} - X_{med,i})^2}{N}} \quad (3.7)$$

- **El coeficiente de correlación (R)**, es una medición de la relación lineal entre los valores calculados por el modelo respectivo y los valores medidos. Se define de la forma:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{cal,i} - \bar{X}_{cal,i})(X_{med,i} - \bar{X}_{med,i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_{cal,i} - \bar{X}_{cal,i})^2 \sum_{i=1}^N (X_{med,i} - \bar{X}_{med,i})^2}} \quad (3.8)$$

Dónde:  $X_{cal,i}$  y  $X_{med,i}$  representan los valores calculados y medidos  $\bar{X}_{cal,i}$ ,  $\bar{X}_{med,i}$  son los valores promedio calculado y medido,  $N$  la cantidad de datos.

La literatura clasifica los indicadores estadísticos **MABE** y **RMSE** según el siguiente criterio:

<b>Excelente</b>	RMSE <10 %
<b>Bueno</b>	10 % < RMSE <20 %;
<b>Regular</b>	20 % < RMSE <30 %;
<b>Deficiente</b>	RMSE > 30 %.

Similarmente para el indicador estadístico **MABE** (Mao, 2013; Yanfeng, 2017).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Comportamiento del IUV y la Rad durante el periodo de medidas

En esta sección se muestra en la figura 29, los datos promedio diarios sobre el comportamiento del índice ultravioleta (IUV) y la radiación solar global (Rad) durante el periodo enero 2016 a diciembre 2018, proporcionados por la estación meteorológica ubicado en la ciudad de Puno, para condiciones de cielos en general.

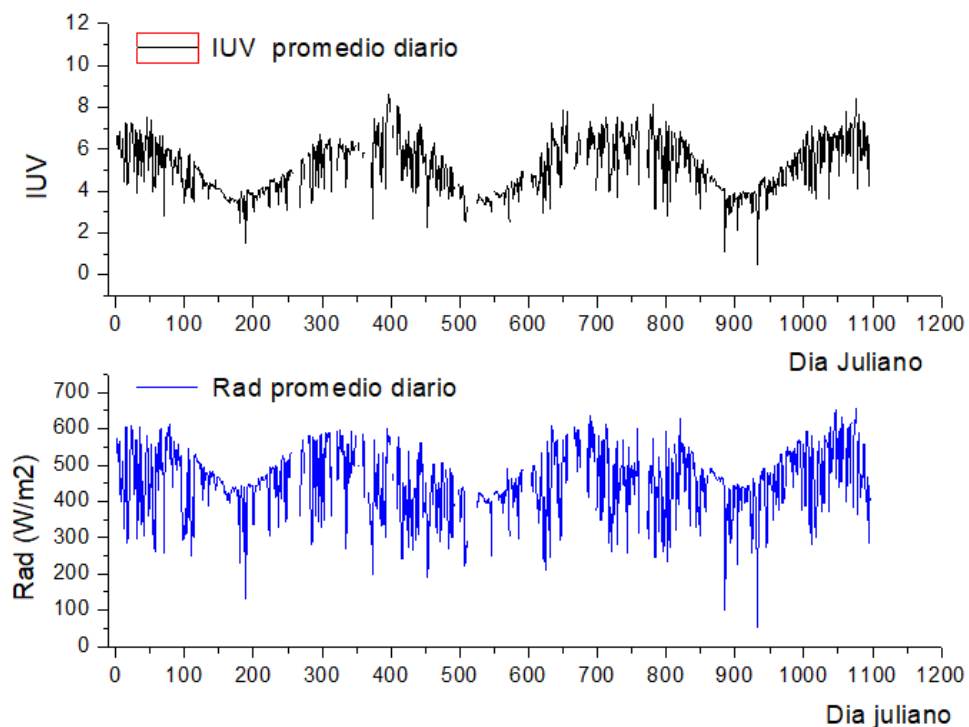


Figura 29. IUV y la Rad durante enero 2016 a diciembre del 2018

La figura 29 muestra un comportamiento cíclico anual del IUV y Rad, los valores del IUV tienen un valor promedio máximo diario de 8 y un valor promedio mínimo diario de

4 que se presentan en las estaciones de verano (perihelio) e invierno (afelio) respectivamente, mientras que los valores promedios máximo de la Rad son de  $600 \text{ W/m}^2$  y mínimos de  $300 \text{ W/m}^2$ . Este comportamiento es similar a los que reportan, otras instituciones como SENAMHI.

La siguiente figura 30 muestra el comportamiento temporal de los valores máximos diarios del Índice Ultravioleta ( $\text{IUV}_{\text{max}}$ ) y la Radiación solar global ( $\text{Rad}_{\text{max}}$ ), para todos los días del periodo de estudio.

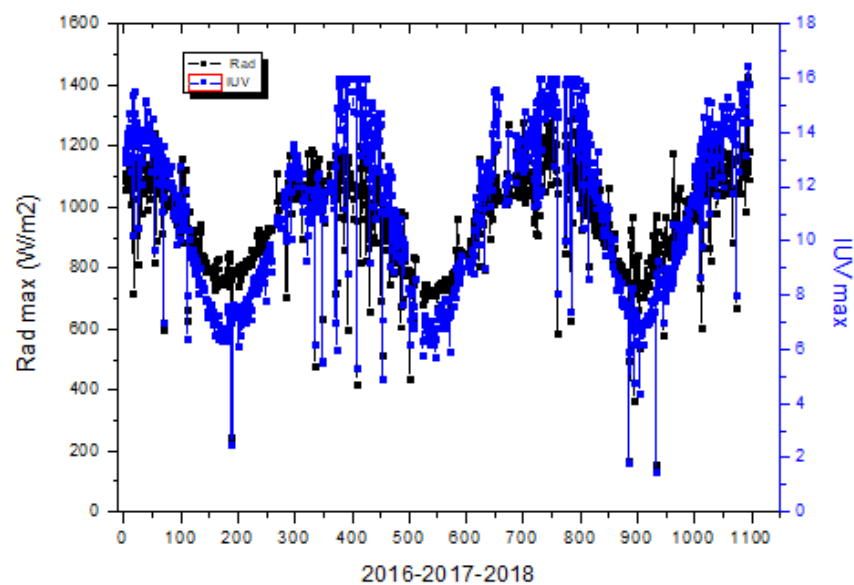


Figura 30. Valores  $\text{IUV}_{\text{max}}$  y el  $\text{Rad}_{\text{max}}$  durante el periodo de estudio

Puede notarse que hay un cierto compromiso entre el  $\text{IUV}_{\text{max}}$  y el  $\text{Rad}_{\text{max}}$ . Cabe mencionar que la presencia de nubes modifica la relación entre el IUV y Rad debido a que ciertas partículas de la atmósfera, como las moléculas de agua,  $\text{CO}_2$  es selectiva y absorbe ciertas longitudes de onda del espectro solar, como se muestra en la figura 2; también se observa un comportamiento periódico sinusoidal; además, que estos valores máximos se dieron entre las 11:30 am y las 12:30 pm, otro detalle a mencionar son los días anómalos que se presentaron en el mes de junio y julio, por ejemplo:

07 de julio del 2016;  $\text{Rad}_{\text{max}}=244 \text{ W/m}^2$ ,  $\text{IUV}_{\text{max}}= 2.4$

03 de junio del 2018;  $\text{Rad}_{\text{max}}=170 \text{ W/m}^2$ ,  $\text{IUV}_{\text{max}}= 1.8$

21 de julio del 2018;  $\text{Rad}_{\text{max}}=156 \text{ W/m}^2$ ,  $\text{IUV}_{\text{max}}= 1.5$

Estos días fueron totalmente nublados, con pronósticos de nevada según el reporte de SENAMHI.

Una limitación de la estación metereológica es que según su rango solo mide el valor máximo de 16 para el IUV, este detalle se observa en la parte superior de los valores del  $IUV_{max}$ , esta limitación se presenta conunmente en los meses de enero y febrero, donde se ha reportado valores del IUV superiores a 16 según SENAMHI.

El ajuste del IUV max diario mediante la funcion senoidal durante el periodo de estudio para cielos con y sin presencia de nubes es:

$$IUV = 11 + 3.57 * Sen\left(\frac{\pi(t - 280.9)}{180.14}\right) \quad (4.1)$$

Donde  $t$  es el tiempo en dias

Siendo el coeficiente de determinacion  $R^2 = 0.728$

En la siguiente en la figura 31, se muestra la comparación del  $IUV_{max}$  diario para días sin o parcialmente nublado con la declinación solar. Puede notarse la relación inversa entre la declinación solar y el IUV, es decir, en el verano la declinación solar presenta su mínimo valor de  $-23.5^\circ$  y el  $IUV_{max}$  diario tiende a su máximo valor, en el mes de febrero llegando a alcanzar valores superiores a 16, mientras que en el mes de junio la declinación solar tiene su máximo valor positivo  $23.5^\circ$  y el  $IUV_{max}$  diario registra valores mínimos.

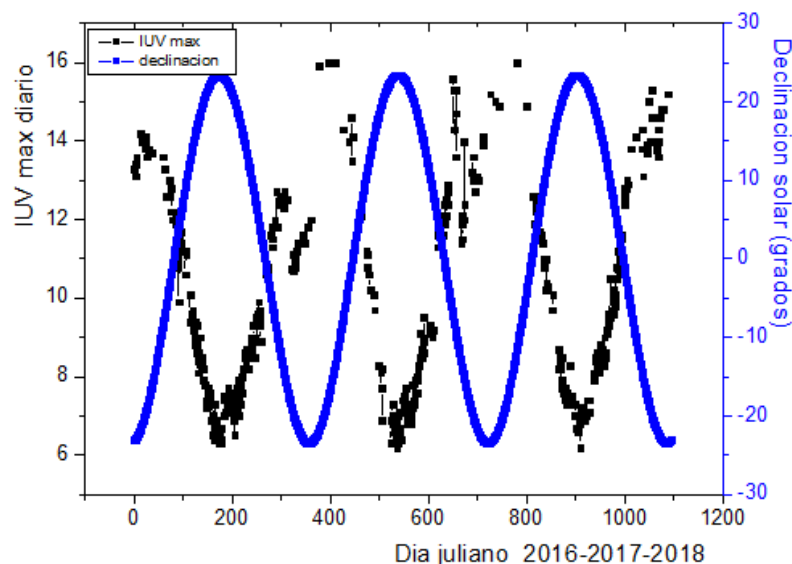


Figura 31. Declinación solar con el IUV max diario

El coeficiente de determinación entre el  $IUV_{\max}$  diario y la declinación solar no es aceptable, salvo para el año 2018 ( $R^2= 0.90998$ ). Esta figura 31 nos muestra que la declinación solar, es un *factor geométrico* importante que modula los valores del  $IUV_{\max}$  diario en las estaciones del año.

#### 4.2. Variabilidad de la capa de ozono

Los datos de la columna de ozono se pueden obtener libremente mediante el satélite TOMS de la NASA (<https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/data/>). La figura 32, muestra el comportamiento del *factor atmosférico* de la columna de ozono estratosférico en la ciudad de Puno durante el periodo enero 2016 a diciembre 2018.

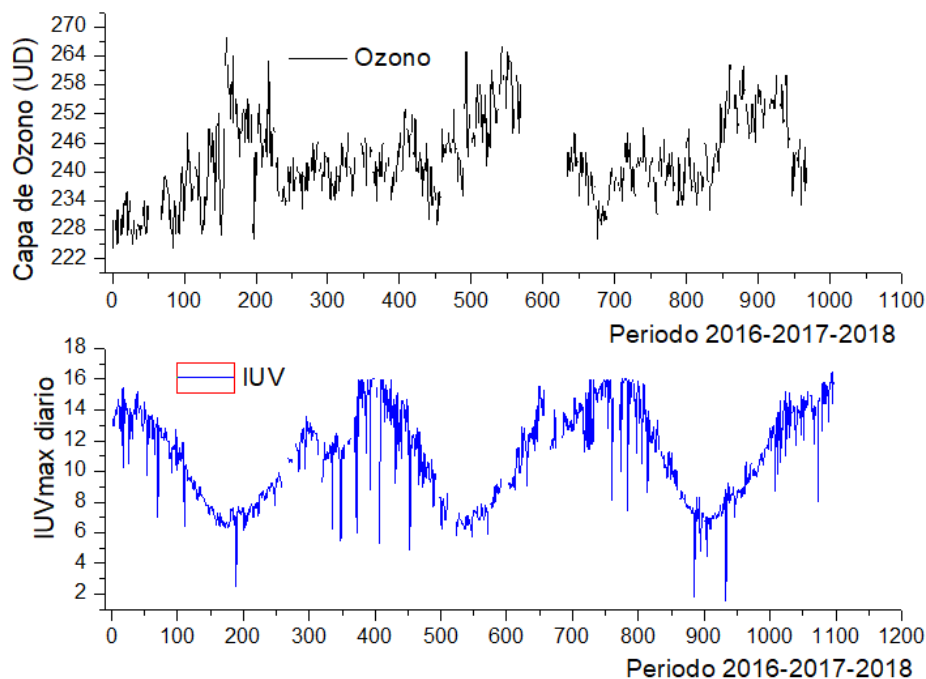


Figura 32. Capa de ozono y el  $IUV_{\max}$  diario

De la figura 32 se observa un comportamiento cíclico anual del ozono y el  $IUV_{\max}$  diario. Los valores promedios anuales son 239 UD; 244 UD y 246 UD para los años 2016, 2017 y 2018 respectivamente, notándose una tendencia anual ligeramente creciente. El valor máximo alcanzado durante el periodo de medidas fue 268 DU el 7 junio del 2016 y el valor mínimo de 224 DU el 2 y el 23 de marzo del 2016. La figura 32, también muestra la relación inversa de la capa de ozono con el  $IUV_{\max}$  diario para cielos en general, es decir, el aumento en la capa de ozono corresponde a una disminución del  $IUV_{\max}$  diario.

### 4.3. Análisis estadístico

A partir de los datos proporcionados por la estación meteorológica, se ha obtenido el comportamiento mensual del IUV, desde enero del 2016 hasta diciembre del 2018. Este comportamiento se analiza mediante los siguientes indicadores estadísticos, como número de datos (N), media aritmética (M), mediana (Md), máximo (Mx), mínimo (Mn), primer (Q1) y tercer (Q3) cuartil, rango intercuartil (RIC), percentiles 5 (P5) y 95 (P95), coeficiente de variación intercuartil (V), desviación estándar (SD), sesgo (g), y curtosis (k). Las expresiones para estos indicadores estadísticos pueden verse en el anexo 3. (Miguel, 2011; Santos, 2011).

A continuación, se describe los indicadores estadísticos del comportamiento mensual del IUV durante el periodo de medidas que se muestra en la siguiente tabla 2 y la correspondiente figura 33.

Tabla 2

*Comportamiento de los indicadores estadísticos del IUV*

	N	M	Md	Mx	Mn	Q1	Q3	RIC	P5	P95	V	SD	g	k
ene	86	6.179	6.268	8.633	2.630	5.581	6.871	1.290	4.272	7.512	0.104	1.089	-0.736	1.067
feb	70	6.113	6.163	8.129	3.140	5.439	6.829	1.390	4.361	7.960	0.113	1.119	-0.140	-0.285
mar	91	5.430	5.534	7.371	2.276	4.866	6.064	1.198	3.468	6.946	0.110	1.054	-0.627	0.399
abr	88	5.017	5.084	6.590	3.143	4.446	5.611	1.165	3.677	6.264	0.116	0.805	-0.245	-0.645
may	77	4.271	4.257	5.488	2.503	4.095	4.556	0.461	3.521	5.006	0.053	0.501	-0.986	3.145
jun	82	3.518	3.579	4.140	1.073	3.441	3.729	0.289	2.891	3.968	0.040	0.435	-2.928	12.867
jul	91	3.768	3.882	4.642	0.499	3.699	3.997	0.297	2.834	4.439	0.039	0.577	-2.906	13.061
ago	82	4.319	4.376	5.169	3.061	4.143	4.597	0.454	3.473	4.979	0.052	0.415	-0.752	1.087
set	80	5.155	5.075	7.264	2.921	4.670	5.777	1.107	3.491	6.513	0.106	0.882	-0.279	0.297
oct	78	5.735	5.842	7.847	3.402	5.133	6.418	1.285	3.987	7.108	0.111	1.006	-0.386	-0.288
nov	71	6.062	6.157	7.787	3.624	5.727	6.565	0.838	4.431	6.972	0.068	0.779	-1.025	1.641
dic	78	6.130	6.097	8.442	3.688	5.666	6.760	1.094	4.223	7.545	0.088	0.937	-0.338	0.259



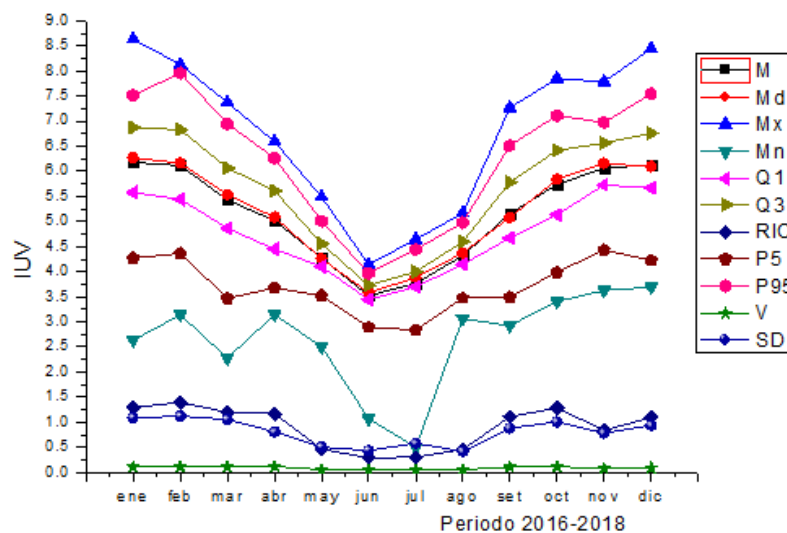


Figura 33. Comportamiento de los indicadores estadísticos

De la tabla 2 y la figura 33 se aprecia que el percentil  $P_{95}$  tiene valores más altos en los meses febrero (7.96) y el mínimo en el mes de junio (3.968). El promedio del IUV se debe producirse en junio, en torno al día 21, ya que es el día más corto y que mayor ángulo cenital alcanza ( $23.45^\circ$ ), lo que conlleva una mayor inclinación sobre la superficie horizontal disminuyendo los niveles de radiación. El  $M_x$  del IUV registrado en la ciudad de Puno fue 8.63 el día 31 de enero, mientras que el mínimo fue 0.5 el 21 de julio.

En cuanto al coeficiente de variación intercuartil ( $V$ ), se observa que los meses más estables son junio (0.040), julio (0.039) y en general los meses de invierno, que está de acuerdo por la cantidad de días sin presencia de nubes en dichos meses, tendiendo a ser más inestables en las estaciones de primavera y verano. Abril es el mes más inestable (0.116). El rango intercuartil ( $RIC$ ) y la desviación estándar ( $SD$ ) muestran una alta desviación en los meses primavera y verano, siendo sus valores máximos en febrero ( $RIC = 1.39$  y  $SD = 1.119$ ) y enero ( $RIC = 1,29$  y  $SD = 1.089$ ), la desviación disminuye para los meses de otoño e invierno, siendo la mínima en junio ( $RIC= 0.289$  y  $SD=0.435$ ). El máximo de la desviación estándar que se presenta en febrero se puede atribuir a la gran cantidad de días que presenta distintas condiciones de cielo. La desviación estándar es menor para los meses de invierno, debido a que predomina el tipo de cielo despejado o sin presencia de nubes.

La diferencia entre el mínimo  $M_n$  y el percentil  $P_5$  es alta, siendo la correlación 0.66. Si se promedian las diferencias de todos los meses es 1.56. La mayor diferencia se encuentra en el mes de julio (2.335). Estos resultados indican que  $M_n$  y  $P_5$  no pueden considerarse

como representativos del IUV, mientras que la diferencia entre el máximo Mx y el percentil P<sub>95</sub> es pequeña, siendo la correlación de 0.968 y la diferencia promedio 0.524, esto indica que Mx y P<sub>95</sub> se pueden considerar como representativos del IUV.

Los comportamientos mensuales según se indica en la tabla muestran un sesgo negativo, esto indica que tienen asimetría, siendo el mayor valor absoluto en los meses de junio y julio.

En cuanto a la curtosis se encuentra valores mucho mayores que la unidad en los meses de junio y julio, es decir que el comportamiento en estos meses son leptocurticas.

#### 4.4. Tipos de días

En esta sección definimos el tipo de días de la ciudad de Puno, durante el periodo de estudios, la clasificación se realizó de la siguiente manera:

Tipo A: Día sin presencia de nubes o cielo limpio

Tipo B: Día parcialmente nublado por la mañana o por la tarde

Tipo C: Día completamente nublado

A continuación, en la siguiente la tabla 3 muestra los tipos de días durante el periodo de estudio

Tabla 3

*Clasificación de los días Tipo A, Tipo B y Tipo C*

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic	Total, anual
<b>A</b>	5	2	11	23	48	48	60	37	37	15	16	13	315
<b>B</b>	12	6	20	14	12	16	9	21	15	15	16	5	161
<b>C</b>	73	64	61	51	18	12	23	24	29	49	41	63	519
<b>total</b>	90	72	92	88	78	84	92	82	81	79	73	81	
												Total	992

La tabla 3 nos muestra los valores del tipo de cielo durante el periodo de estudios, donde el 32% son del tipo A, 16% del tipo B y el 52% del tipo C, siendo predominante los cielos nublados.

En la figura 34 se representa la gráfica de los valores de la tabla 3; el lado derecho representa el número desde días claros o sin presencia de nubes para cada mes, mientras que en el lado izquierdo el porcentaje de ocurrencia

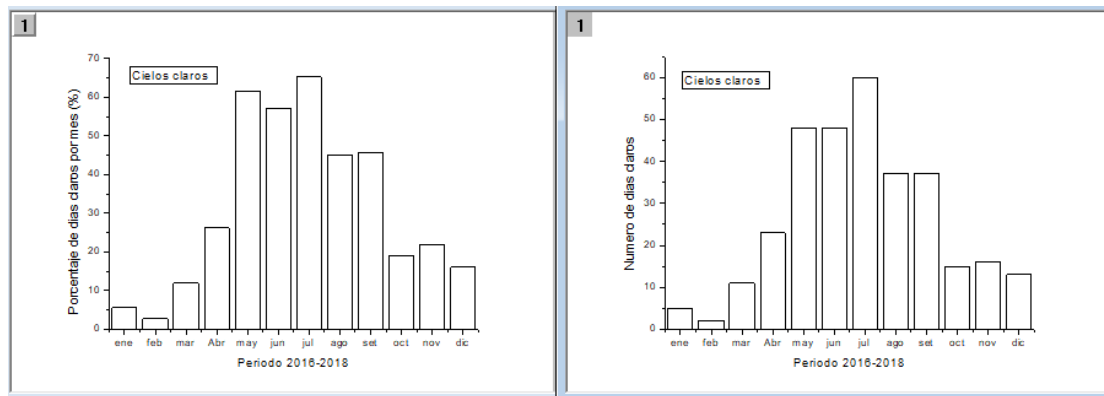


Figura 34. Número de días de cielos claros

De la figura 34 se aprecia que el mes de julio, es el mes con más días sin presencia de nubes (65%), seguido del mes de mayo (62%) y junio (57%), siendo este tipo de días correspondientes al finalizar la estación del otoño e inicio de la estación de invierno. El mes de febrero presenta la menor cantidad de cielos sin presencia de nubes (3%), seguido de enero.

Por otro lado, en la figura 35 se muestra los tipos de cielo nublados

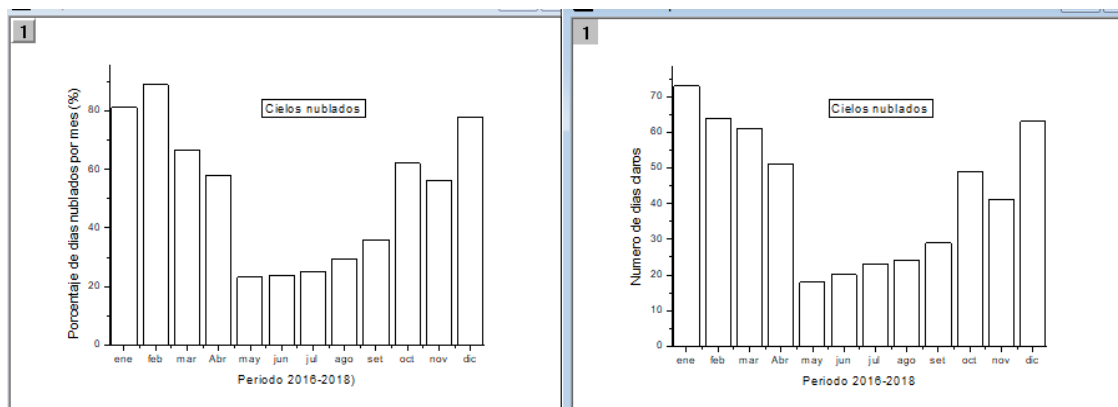


Figura 35. Número de días de cielos nublados

Según la figura 35, febrero (89%) es el mes con más días nublados, seguido de enero (81%) y diciembre (78%). Si sumamos los días tipo B y C, representa aproximadamente el 68% del total de días del periodo de estudio, este valor es un indicativo de un **déficit de confort térmico** (mayor a los 18 °C) en la ciudad de Puno.

El análisis estadístico realizado hasta ahora tanto para el IUV y la Rad, indica que hay un comportamiento periódico, que se puede modelar, para posteriormente estimar el IUV.

A continuación, en la siguiente figura 36 se muestran el comportamiento promedio mensual del IUV durante el periodo de estudios y la respectiva curva de ajuste sinusoidal

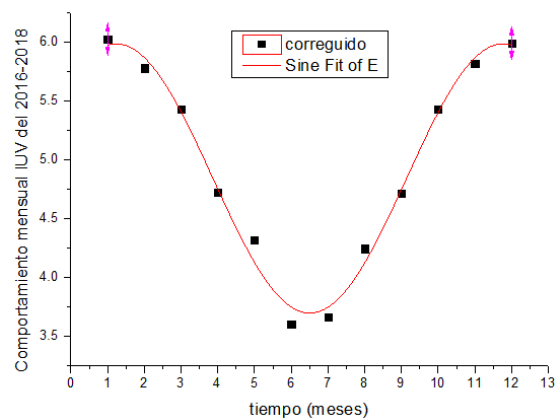


Figura 36. Comportamiento mensual del IUV durante el periodo de estudio

La ecuación de ajuste de la figura 4.8 es:

$$IUV = 4.84195 + 1.14587 * \sin\left(\frac{\pi(t - 1.40134)}{5.27046}\right) \quad (4.2)$$

Donde

$t$  : Es el tiempo en meses.

El coeficiente de determinación  $R^2 = 0.985$

La interpretación de la figura 36 muestra que el IUV tiene valores altos en el mes de enero y febrero, posteriormente en el mes de marzo el IUV empieza a descender hasta valores mínimos que se presentan en la estación de invierno (junio y julio), luego en el mes de agosto el IUV empieza a ascender hasta valores elevados que se presentan en los meses de noviembre y diciembre y nuevamente se repite el ciclo anual.

#### 4.5. Comportamiento horario del IUV

Otra manera de representar el comportamiento del IUV durante el periodo de estudio, es realizando el **promedio horario mensual** para todas las condiciones del tipo de cielo, como se muestra en la siguiente tabla 4.

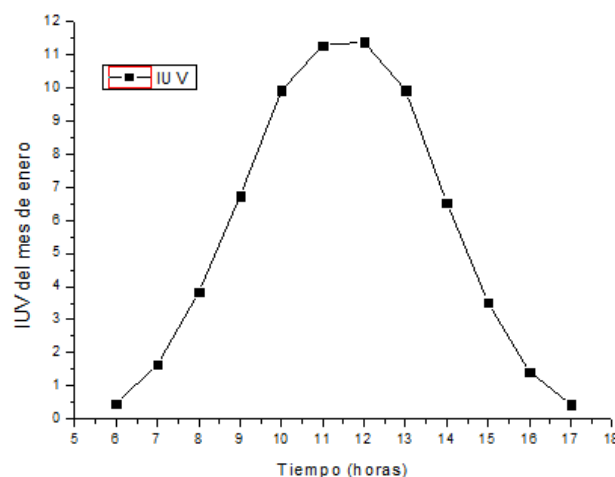
Tabla 4

*IUV horario acumulado del mes de enero*

<b>Hora</b>	<b>N (número de datos)</b>	<b>M (Promedio)</b>	<b>Md (mediana)</b>
6 a 7	303	0.469	0.500
7 a 8	574	1.641	1.500
8 a 9	598	3.829	3.650
9 a 10	592	6.741	7.100
10 a 11	588	9.930	10.300
11 a 12	588	11.297	12.400
12 a 13	588	11.390	12.600
13 a 14	587	9.941	10.600
14 a 15	583	6.543	6.800
15 a 16	559	3.514	3.400
16 a 17	477	1.427	1.200
17 a 18	173	0.441	0.400

De la tabla 4, la 1era columna muestra los valores del IUV acumulados por intervalo de hora durante el mes de enero, mientras que en las dos últimas columnas se tiene el valor promedio y la mediana respectivamente, puede observarse que entre las 12-13 pm los valores del IUV tienen el valor máximo de 12.6, posteriormente al transcurrir las horas los valores del IUV empiezan a disminuir.

El comportamiento del IUV de la tabla 4 se muestra en la siguiente figura 37.



*Figura 37. IUV promedio horario acumulado del mes de enero*

En la figura 37 se observa que los valores del IUV en función del tiempo tienen una forma de campana y aumentan progresivamente desde las 6 am, hasta su valor máximo que se presentan entre las 11 am y las 13 pm, posteriormente disminuyen al transcurrir las horas.

Este comportamiento se presenta en todos los meses del año, como se muestra a continuación en las siguientes figuras 38.

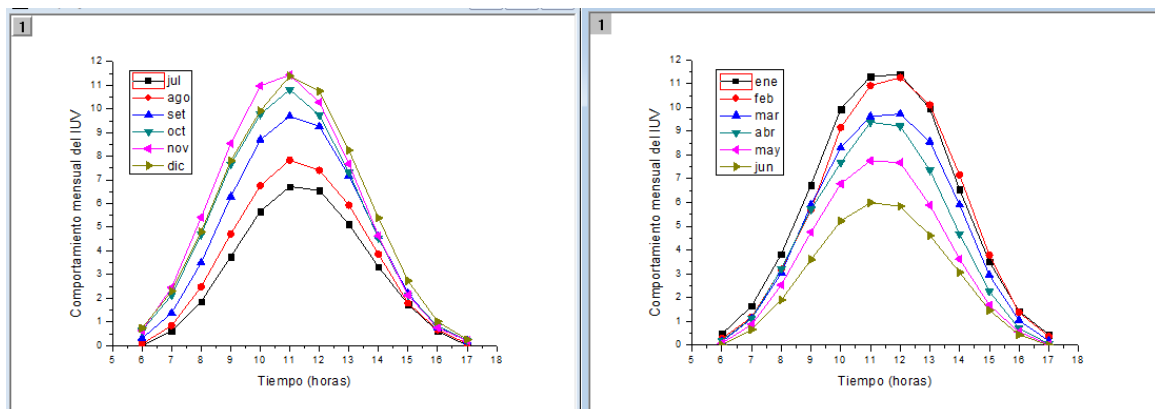


Figura 38. IUV promedio horario acumulado de enero a diciembre

De la figura 38 se puede notar que los valores del IUV máximo disminuyen en el transcurrir de los meses de enero a junio (lado derecho), mientras que en el lado izquierdo los valores máximos del IUV empiezan a subir desde julio a diciembre, en los meses de junio y julio los valores máximos son 6 y 6.5 respectivamente alrededor del mediodía. Esto se debe a la declinación solar respecto a la tierra, en la estación de invierno.

La siguiente tabla 5 permite construir una matriz para generar las isolíneas del IUV, para el periodo de estudio 2016-2018 como se muestra a continuación:

Tabla 5

*IUV horario acumulado durante le periodos de estudios.*

Hora	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
6 a 7	0.47	0.28	0.15	0.20	0.07	0.00	0.00	0.07	0.30	0.63	0.63	0.73
7 a 8	1.64	1.17	1.11	1.12	0.87	0.65	0.61	0.84	1.38	2.13	2.44	2.29
8 a 9	3.83	3.19	3.03	3.20	2.53	1.89	1.86	2.48	3.49	4.69	5.41	4.80
9 a 10	6.74	5.69	5.90	5.71	4.75	3.59	3.76	4.71	6.29	7.66	8.54	7.81
10 a 11	9.93	9.15	8.31	7.67	6.79	5.22	5.67	6.75	8.70	9.78	10.98	9.92
11 a 12	11.30	10.91	9.62	9.38	7.76	5.99	6.71	7.84	9.69	10.81	11.44	11.39
12 a 13	11.39	11.25	9.72	9.21	7.67	5.84	6.55	7.40	9.26	9.74	10.28	10.75
13 a 14	9.94	10.10	8.55	7.36	5.89	4.61	5.12	5.93	7.17	7.31	7.68	8.25
14 a 15	6.54	7.15	5.90	4.68	3.62	3.06	3.33	3.86	4.61	4.53	4.64	5.39
15 a 16	3.51	3.79	2.94	2.26	1.67	1.46	1.74	1.79	2.20	2.13	2.13	2.73
16 a 17	1.43	1.37	1.04	0.70	0.56	0.44	0.60	0.66	0.77	0.82	0.75	1.01
17 a 18	0.44	0.36	0.18	0.05	0.02	0.00	0.00	0.08	0.19	0.20	0.20	0.25

Respecto a la tabla 5 y su correspondiente figura 39 se aprecia que los valores máximos de las isoclinas se producen entre las 11 am y 13 pm, notándose también, que estos valores del IUV descienden progresivamente desde enero y llegan a valores mínimos en los meses de junio y julio, posteriormente empiezan a incrementarse, hasta tomar valores máximos en el mes de diciembre y luego se repite el ciclo.

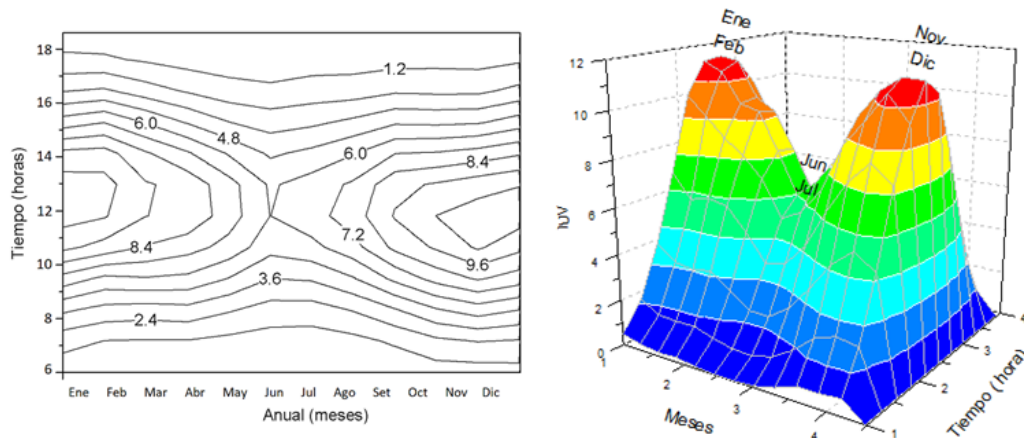


Figura 39. Isoclinas del IUV y representación gráfica en 3 dimensiones

El lado derecho de la figura 39, nos muestra una representación gráfica en 3 dimensiones del IUV y según convenios, los colores rojos, azules representan valores altos y mínimos respectivamente.

Una aplicación importante del IUV, es como está relacionada con la dosis de eritema mínimo (MED), que se define, como la dosis de radiación capaz de producir un enrojecimiento de la piel en una persona catalogada como tipo II (piel clara), siendo el valor de:

$$MED = 210 J / m^2$$

Se sabe que

- $MED / h = 2.33 IUV$
- $IUV = 0.025 W / m^2$

Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27aqBjnmM=%27>

Para los habitantes en promedio de la ciudad de Puno, se puede considerar un tipo de piel III (ligeramente pigmentada), de tal manera que se puede asumir

$$MED = 350 J / m^2, \text{ luego}$$

Que se puede escribir como:

$$MED/h = 350 / 3600 J / sm^2 = 0.097 W / m^2$$

Simplificando

$$IUV = 0.257 MED/h$$

La dosis acumulada del *IUV* mensual independiente del tipo de cielo se muestra en la siguiente figura 40.

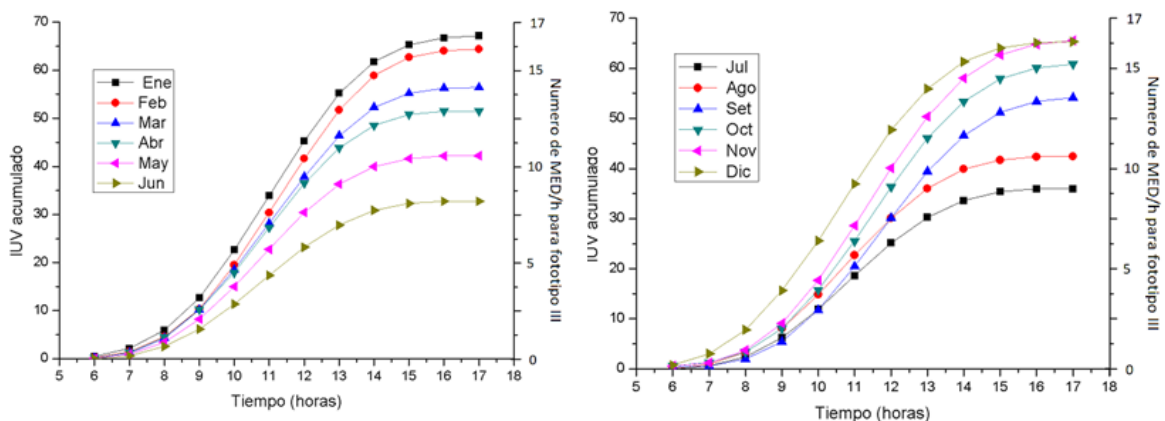


Figura 40. *IUV* mensual acumulado de enero a diciembre

La figura 40 del lado izquierdo, muestra una dosis promedio acumulada del *IUV* para diferentes meses, se puede notar que la dosis del *IUV* para la estación de verano, por ejemplo, el mes de enero es aproximadamente 67, mientras que para la estación de invierno (mes de junio, julio) el *IUV* promedio es 35. La figura de la derecha muestra que si una persona se expone al Sol durante el mes de enero recibe una dosis de aproximadamente 17 MED/h, mientras que si se expone al Sol durante el mes de junio recibirá una dosis de 8 MED/h.

Por otro lado, si en el mes de enero la persona se expone de 10 am hasta 2 pm recibe una dosis de 9 MED/h; mientras que si la persona se expone de 8 am a 12 pm recibe una dosis de 7 MED/h. Esta información es importante para la población sobre los efectos nocivos en la salud, cuando hay una sobreexposición en una determinada estación y hora.

#### 4.6. Relación del *IUV* a partir de la radiación solar global para cielos sin presencia de nubes

Las mediciones del *IUV* y el *Rad* en función del tiempo (hora: min) como se muestra en la tabla 6, por ejemplo, el día 01 de junio del 2016 en días sin presencia de nubes.



Tabla 6

*Datos del IUV y Rad del 01 de junio del 2016.*

Tiempo	Rad.	IUV	Tiempo	Rad.	IUV	Tiempo	Rad.	IUV
6:05 a. m.	0	0	9:55 a. m.	670	5.2	1:45 p. m.	626	4.6
6:10 a. m.	5	0	10:00 a. m.	679	5.4	1:50 p. m.	616	4.5
6:15 a. m.	8	0	10:05 a. m.	689	5.5	1:55 p. m.	599	4.3
6:20 a. m.	11	0	10:10 a. m.	698	5.7	2:00 p. m.	587	4.1
6:25 a. m.	12	0	10:15 a. m.	705	5.8	2:05 p. m.	575	3.9
6:30 a. m.	22	0	10:20 a. m.	713	6.1	2:10 p. m.	562	3.7
6:35 a. m.	47	0	10:25 a. m.	722	6.3	2:15 p. m.	550	3.5
6:40 a. m.	63	0	10:30 a. m.	729	6.3	2:20 p. m.	537	3.4
6:45 a. m.	80	0	10:35 a. m.	736	6.3	2:25 p. m.	524	3.2
6:50 a. m.	100	0	10:40 a. m.	743	6.5	2:30 p. m.	509	3
6:55 a. m.	121	0	10:45 a. m.	747	6.5	2:35 p. m.	497	2.9
7:00 a. m.	141	0	10:50 a. m.	752	6.6	2:40 p. m.	482	2.7
7:05 a. m.	163	0	10:55 a. m.	756	6.7	2:45 p. m.	466	2.5
7:10 a. m.	185	0.1	11:00 a. m.	761	6.8	2:50 p. m.	452	2.3
7:15 a. m.	206	0.5	11:05 a. m.	765	6.9	2:55 p. m.	438	2.2
7:20 a. m.	229	0.6	11:10 a. m.	766	7.1	3:00 p. m.	422	2.1
7:25 a. m.	250	0.7	11:15 a. m.	769	7.1	3:05 p. m.	405	1.9
7:30 a. m.	270	0.8	11:20 a. m.	771	7.2	3:10 p. m.	390	1.8
7:35 a. m.	288	0.9	11:25 a. m.	774	7.3	3:15 p. m.	374	1.6
7:40 a. m.	305	1	11:30 a. m.	774	7.2	3:20 p. m.	358	1.5
7:45 a. m.	324	1.1	11:35 a. m.	774	7.3	3:25 p. m.	343	1.3
7:50 a. m.	339	1.2	11:40 a. m.	776	7.3	3:30 p. m.	325	1.2
7:55 a. m.	353	1.3	11:45 a. m.	774	7.3	3:35 p. m.	307	1.1
8:00 a. m.	370	1.5	11:50 a. m.	770	7.3	3:40 p. m.	290	0.9
8:05 a. m.	387	1.6	11:55 a. m.	768	7.2	3:45 p. m.	272	0.8
8:10 a. m.	400	1.7	12:00 p. m.	768	7.2	3:50 p. m.	255	0.7
8:15 a. m.	416	1.9	12:05 p. m.	748	7	3:55 p. m.	236	0.6
8:20 a. m.	433	2	12:10 p. m.	747	6.9	4:00 p. m.	218	0.5
8:25 a. m.	447	2.2	12:15 p. m.	764	7	4:05 p. m.	198	0.4
8:30 a. m.	462	2.3	12:20 p. m.	754	6.9	4:10 p. m.	175	0
8:35 a. m.	477	2.5	12:25 p. m.	749	6.8	4:15 p. m.	151	0
8:40 a. m.	493	2.6	12:30 p. m.	748	6.7	4:20 p. m.	131	0
8:45 a. m.	507	2.8	12:35 p. m.	743	6.6	4:25 p. m.	111	0
8:50 a. m.	521	3	12:40 p. m.	735	6.4	4:30 p. m.	91	0
8:55 a. m.	535	3.2	12:45 p. m.	732	6.3	4:35 p. m.	73	0
9:00 a. m.	547	3.3	12:50 p. m.	726	6.2	4:40 p. m.	37	0
9:05 a. m.	560	3.5	12:55 p. m.	716	6	4:45 p. m.	17	0
9:10 a. m.	571	3.7	1:00 p. m.	706	5.8	4:50 p. m.	15	0
9:15 a. m.	586	3.9	1:05 p. m.	700	5.7	4:55 p. m.	13	0
9:20 a. m.	598	4.1	1:10 p. m.	693	5.6	5:00 p. m.	12	0
9:25 a. m.	609	4.3	1:15 p. m.	683	5.5	5:05 p. m.	9	0
9:30 a. m.	620	4.5	1:20 p. m.	675	5.3	5:10 p. m.	6	0
9:35 a. m.	630	4.6	1:25 p. m.	663	5.2	5:15 p. m.	2	0
9:40 a. m.	641	4.8	1:30 p. m.	655	5	5:20 p. m.	0	0
9:45 a. m.	651	4.9	1:35 p. m.	646	4.9			
9:50 a. m.	661	5.1	1:40 p. m.	633	4.7			

La tabla 6 muestra la evolución del *IUV* y *Rad*, cada 15 minutos de un día sin presencia de nubes, notando que el valor máximo para el *IUV* es 7.3 y para la *Rad* es 774 W/m<sup>2</sup> a las 11: 35 min. La representación gráfica de los valores de la tabla 4.5, tiene una forma de campana como muestra, en la siguiente figura 41.

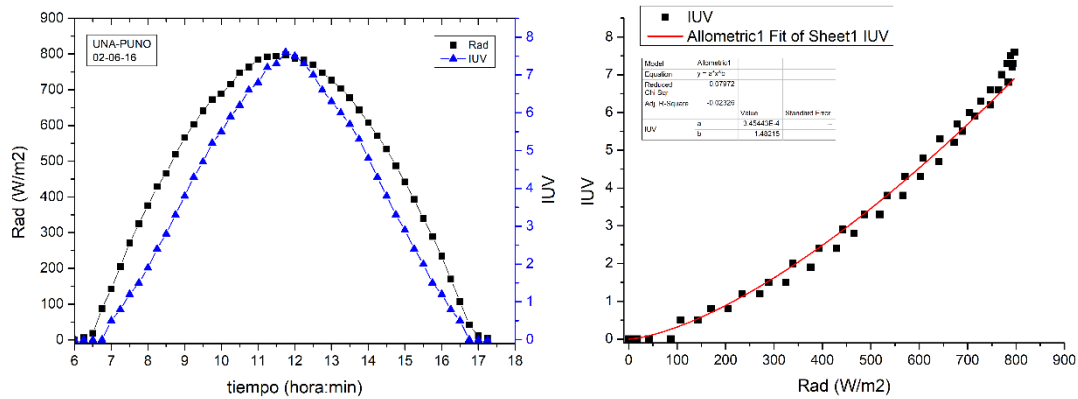


Figura 41. *IUV*, *Rad* del día 01 de junio del 2016 sin presencia de nubes

La figura 41 y la tabla 6, sugieren que hay una relación, entre el *IUV* y *Rad*. El lado derecho de la figura 41, nos muestra esta relación entre el *IUV* y *Rad*. En general se puede ensayar una variedad de ajustes. Una expresión es la siguiente:

$$IUV = A * Rad^B \quad (4.3)$$

La ecuación de ajuste para este día es la siguiente:

$$IUV = 4.62162(10^{-6}) * Rad^{2.14372} \quad (4.4)$$

Siendo el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.998$

A continuación, siguiendo el mismo procedimiento, se realiza la ecuación de ajuste de datos para los 23 días sin presencia de nubes correspondiente al mes de junio del 2016, dicha ecuación es:

$$IUV = 6.76237 * 10^{-5} * Rad^{1.73866} \quad (4.5)$$

Siendo el coeficiente de determinación  $R^2 = 0.994$

Ahora si extendemos los correspondientes ajustes y su respectivo coeficiente de determinación, para todos los meses correspondientes al año 2016, tenemos la siguiente tabla 7.

Tabla 7

*Ecuaciones empíricas y su coeficiente de determinación para cielos claros.*

Mes	Ecuación	R <sup>2</sup>
Enero	$IUV = 4.84093 * 10^{-5} * Rad^{1.79915}$	0.99564
Febrero	$IUV = 5.98499 * 10^{-5} * Rad^{1.76799}$	0.99116
Marzo	$IUV = 6.59032 * 10^{-6} * Rad^{2.08172}$	0.99651
Abril	$IUV = 3.35673 * 10^{-6} * Rad^{2.21176}$	0.99192
Mayo	$IUV = 6.76237 * 10^{-5} * Rad^{1.73866}$	0.99415
Junio	$IUV = 1.21491 * 10^{-4} * Rad^{1.64093}$	0.99456
Julio	$IUV = 9.803 * 10^{-5} * Rad^{1.67804}$	0.99501
Agosto	$IUV = 8.46886 * 10^{-5} * Rad^{1.69993}$	0.99499
Setiembre	$IUV = 6.97949 * 10^{-5} * Rad^{1.72721}$	0.99506
Octubre	$IUV = 4.63673 * 10^{-5} * Rad^{1.7951}$	0.99198
Noviembre	$IUV = 7.83768 * 10^{-4} * Rad^{1.37192}$	0.96661
Diciembre	$IUV = 5.6168 * 10^{-4} * Rad^{1.48291}$	0.98743

Esta tabla 7 muestra un coeficiente de determinación muy próximo a 1, para cielos sin presencia de nubes, esto indica que se puede obtener el valor del *IUV* a partir de *Rad* medido.

El consolidado del coeficiente de determinación para los meses correspondientes al periodo de estudio se muestra en la siguiente tabla 8.

Tabla 8

*Coefficiente de correlación lineal de los años 2016, 2017 y 2018*

Mes	2016	2017	2018
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
Ene	0.99564	0.99171	
Feb	0.99116	0.99202	
Mar	0.99651		0.99499
Abr.	0.99192	0.99192	0.99785
May	0.99415	0.9859	0.99648
Jun	0.99456	0.9888	0.99299
Jul	0.99501	0.98934	0.99024
Ago.	0.99499	0.98956	0.98754
Sep.	0.99506	0.99101	0.99389
Oct	0.99198	0.96981	0.97727
Nov	0.96661	0.99587	0.9925
Dic	0.9874	0.99826	0.99509

**Nota:** No se registraron días sin presencia de nubes en los recuadros en blanco.

La tabla 8 muestra nuevamente un coeficiente de determinación muy próximo a 1.

Finalmente, en la figura 42 se muestra la relación entre el *IUV* y *Rad* y la ecuación empírica de ajuste anual en condiciones de cielos sin presencia de nubes que se muestra a continuación:

Año 2016

$$IUV = 5.62533 * 10^{-5} * Rad^{1.76416}; R^2 = 0.987 \quad (4.6)$$

Año 2017

$$IUV = 1.20587 * 10^{-5} * Rad^{2.0003}; R^2 = 0.982 \quad (4.7)$$

Año 2018

$$IUV = 3.9855 * 10^{-6} * Rad^{2.16579}; R^2 = 0.99 \quad (4.8)$$

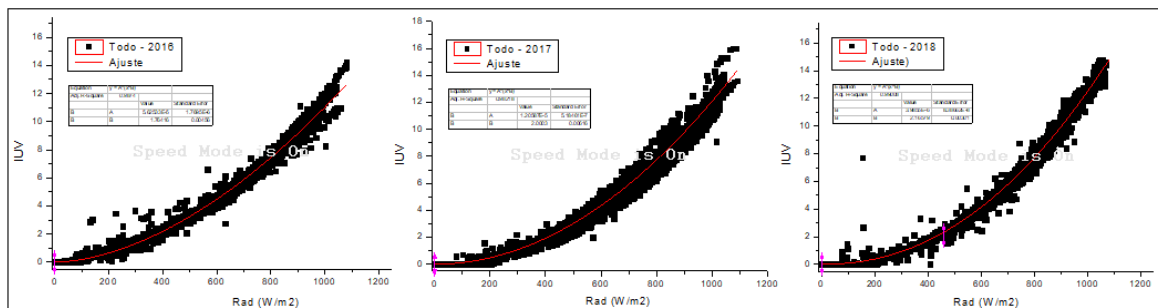


Figura 42. *IUV*, *Rad* años 2016, 2017 y 2018

Una observación importante es que, en estas fórmulas empíricas, no hay relación con el tiempo y otras variables, como el espesor de la capa de ozono, aerosol, etc. En la siguiente sección se subsana este detalle

La literatura muestra que existe una relación lineal entre la radiación ultravioleta (*IUV*) y la radiación solar total (*Rad*), como  $IUV = a * Rad$  (Barbero, 2006; Cañada, 2000; Foyo, 1999; Jacovides, 2006; Martinez, 1999; Ogunjobi, 2004).

Según los resultados y de la figura 42 se debe mencionar que la relación entre el *IUV* y el *Rad* para la ciudad de Puno es de carácter **local**, los resultados no se pueden extrapolar a otras ciudades, es decir esta relación depende de la geografía del lugar.

Por último, en el presente trabajo, también se ha ensayado con otras expresiones de ajuste como, por ejemplo:

Modelo polinomial de grado 2 que tiene la siguiente forma:

$$IUV = A + A_1 * Rad + A_2 * Rad^2 \quad (4.9)$$

El análisis estadístico, con el ajuste de datos se muestra a continuación:

$$IUV = 0.02439 + 0.00186 * Rad + 9.44363(10^{-6}) * Rad^2 \quad (4.10)$$

$$R^2 = 0.99485$$

El inconveniente en esta ecuación es que, si *Rad* es cero, implica que *IUV* es diferente de cero, esto no es **físicamente aceptable**, debido a que, si la *Rad* es nulo, entonces el *IUV* también es nulo, más aún si las condiciones del día son de cielo despejado.

Otra expresión a ensayar ligeramente complicada es de la forma:

$$IUV = 559.92839 * \left[ 1 + (0.56692 - 1) * e^{-1.80648 * 10^{-4} * (Rad - 4499.59626)} \right]^{\frac{1}{1 - 0.56692}}$$

$$R^2 = 0.99474$$

Una conclusión importante de la tabla 8 y su correspondiente figura 42 indica que hay un buen compromiso entre ambas variables, por tanto, esta relación permite **estimar y reconstruir** el *IUV* a partir de la medición de la radiación solar global (*Rad*) en la ciudad de Puno para cielos sin presencia de nubes.

#### 4.7. Estimación del IUV para cielos sin presencia de nubes

A continuación, se realiza la programación en Fortran de la relación espectral (ecuación 2.75) para cielo sin presencia de nubes, con ello se obtiene un modelo empírico del IUV para la ciudad de Puno, posteriormente se compara con las mediciones proporcionadas por la estación meteorológica.

El procedimiento para un determinado día; por ejemplo, el 19 de noviembre del 2016 es como sigue:

Los datos del IUV proporcionados por la estación radiométrica son cada 15 minutos y se muestran en la siguiente tabla 9.

Tabla 9

*Comportamiento horario del IUV, día 19 de noviembre 2016*

TSM	Imed	TSM	Imed	TSM	Imed
06:00 a.m.	0	10:15 a.m.	9.5	02:30 p.m.	9.8
06:15 a.m.	0	10:30 a.m.	10.3	02:45 p.m.	9.1
06:30 a.m.	0	10:45 a.m.	11	03:00 p.m.	8.4
06:45 a.m.	0.2	11:00 a.m.	11.6	03:15 p.m.	7.6
07:00 a.m.	0.7	11:15 a.m.	12.1	03:30 p.m.	6.8
07:15 a.m.	1.1	11:30 a.m.	12.5	03:45 p.m.	6
07:30 a.m.	1.6	11:45 a.m.	13	04:00 p.m.	5.1
07:45 a.m.	2.1	12:00 p.m.	13.2	04:15 p.m.	4.5
08:00 a.m.	2.8	12:15 p.m.	13.4	04:30 p.m.	3.9
08:15 a.m.	3.4	12:30 p.m.	13.4	04:45 p.m.	3.2
08:30 a.m.	4.2	12:45 p.m.	13.3	05:00 p.m.	2.6
08:45 a.m.	4.8	01:00 p.m.	13.1	05:15 p.m.	2.1
09:00 a.m.	5.7	01:15 p.m.	12.8	05:30 p.m.	1.6
09:15 a.m.	6.5	01:30 p.m.	12.4	05:45 p.m.	1.2
09:30 a.m.	7.3	01:45 p.m.	11.7	06:00 p.m.	0.8
09:45 a.m.	8.1	02:00 p.m.	11.2	06:15 p.m.	0.4
10:00 a.m.	8.9	02:15 p.m.	10.5	06:30 p.m.	0

Fuente: Datos proporcionados por la estación meteorológica UNA-Puno

19 de noviembre corresponde al día juliano 323

La ecuación del tiempo (ecu. 214)

$$E_t = 12.692 \text{ min} \quad (4.11)$$

La declinación solar (ecu. 2.8)

$$\delta = -19.36^\circ$$

Latitud del lugar

$$\phi = -15.83^\circ$$

$$L_L = -70.03^\circ : \text{Longitud del lugar}$$

$$L_s = -75.0^\circ : \text{Longitud estándar para el Perú}$$

Hora solar verdadera LAT está dado por la siguiente expresión:

$$LAT = TSM + (32.5715 / 60) = TSM + 0.542858 \quad (4.12)$$

Coseno del ángulo cenital es:

$$\cos(Z) = \sin(-19.36)\sin(-15.83) + \cos(-19.36)\cos(-15.83)\cos(\omega)$$

Mientras que el ángulo horario  $\omega$

$$\omega = \pm 15(12 - LAT)$$

$$\text{Capa de ozono } d = 229 \text{ UD} = 0.299 \text{ cm}$$

Finalmente, utilizando las ecuaciones 2.75; 2.51; 2.61 y los valores calculados en esta sección se elabora la siguiente tabla 10 para calcular IUV.

Tabla 10

*Procedimiento para calcular el IUV*

$$d = 0.229; \beta = 0.04; \alpha = 0.88; \text{Factor} = 0.615$$

TSM	LAT	$\omega$	Cos(Z)	Z	$m_a$	$m_o$	IUV <sub>cal</sub>	IUV <sub>med</sub>
5:27	6	90	0.0904	84.8117	6.42357	8.51122	0.0511	0
6:27	7	75	0.3253	71.0130	1.95431	3.00251	0.9257	1.6
7:27	8	60	0.5442	57.0254	1.17538	1.82509	3.3738	4.2
8:27	9	45	0.7322	42.9245	0.87495	1.36232	6.9772	7.3
9:27	10	30	0.8764	28.7773	0.73138	1.13993	10.555	10.3
10:27	11	15	0.9671	14.7211	0.66298	1.03374	12.895	12.5
11:27	12	0	0.9981	3.52971	0.64251	1.00189	13.4007	13.4
12:27	13	15	0.9671	14.7211	0.66298	1.03374	12.8955	12.4
13:27	14	30	0.8764	28.7773	0.73138	1.13993	10.5550	9.8
14:27	15	45	0.7322	42.9245	0.87495	1.36232	6.9772	6.8
15:27	18	60	0.5442	57.0254	1.1538	1.82509	3.37383	3.9
16:27	17	75	0.3253	71.0130	1.95431	3.00251	0.9257	1.6
17:27	18	90	0.0904	84.8117	6.42357	8.51122	0.051	0

Nota: Los valores de  $m_a$ ,  $m_o$  y IUV<sub>cal</sub> de las últimas columnas se calcularon utilizando el programa fortran.

Como puede observarse de la tabla 10, la penúltima columna muestra los valores calculados del IUV en función del tiempo, notándose que hay una buena correlación con los valores medidos de la última columna, una representación gráfica se muestra en la figura 43.

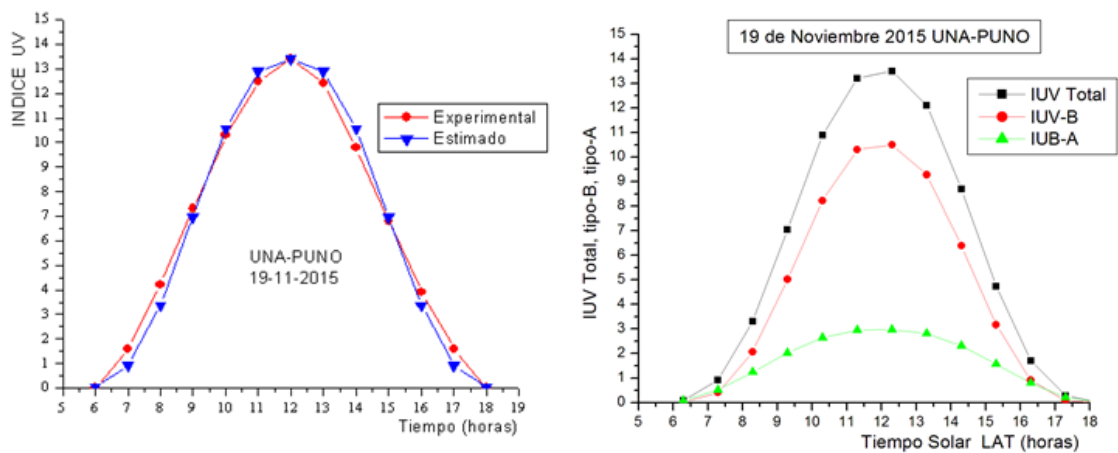


Figura 43. IUV medido, estimado y el IUV total, tipo B y tipo A

El coeficiente de determinación entre el IUV estimado y el IUV medido es  $R^2 = 0.9936$ .

La tabla 10 indica que existe un buen compromiso entre los valores calculados y medidos del IUV. El modelo permite también, estimar el porcentaje del IUV total, IUV-B y el IUV-A, siendo un 78% para IUV-B y 22% para IUV-A, como se muestra en el lado derecho de la figura 43.

Es importante mencionar la relevancia del modelo, puesto que permite estimar otros parámetros de importancia; como radiación ultravioleta tipo A, radiación ultravioleta tipo A+B, Rad, para ello se tiene que modificar algunas entradas del programa representado por la ecuación 2.75. Esto es de gran ayuda ya que no se dispone de instrumentos para medir dichos parámetros.

Las siguientes figuras 44 y 45 muestran las estimaciones del IUV para diferentes fechas.



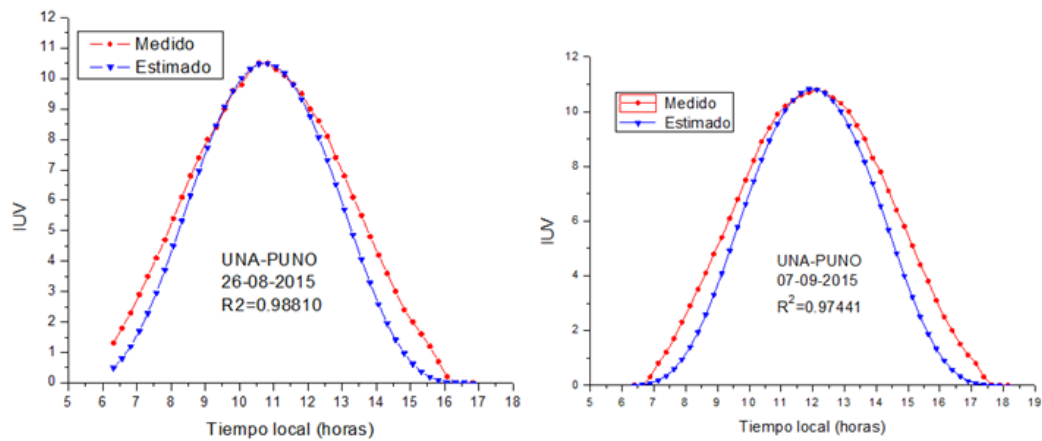


Figura 44. Comparación de los valores calculados y estimados del IUV

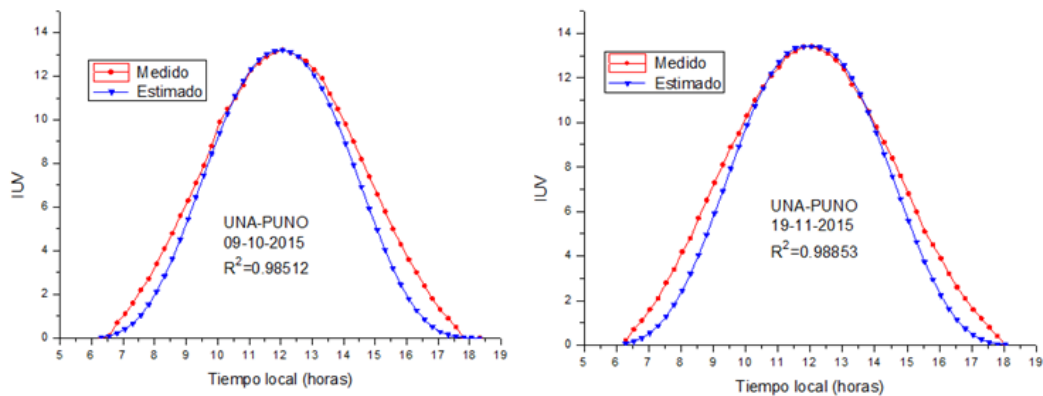


Figura 45. Comparación de los valores calculados y estimados del IUV

Estas figuras 44 y 45 muestran un buen compromiso del IUV estimado y medido. Se aprecia que no hay un buen ajuste en las primeras y últimas horas del día, debido principalmente y principalmente al coeficiente de acción eritemática; también a la ecuación del tiempo, capa de ozono, aerosoles, masa óptica, que se asume constante para un determinado día, indicando que tenemos una atmósfera estática y no dinámica como es en la realidad.

Los valores del IUV<sub>max</sub> dependen de la ubicación geográfica y la estación del año, por ejemplo, en el trabajo de Minbela región Piura, se registró el IUV<sub>max</sub> de 12.3 el día 15/12/2008 al medio día (Mimbela, 2016). Mientras que Salas registro en la ciudad de Huancayo valores extremos del IUV<sub>max</sub> de 18 en cielos despejados al medio día solar. Estos valores altos particularmente en Huancayo se deben a la altitud de 3000 msnm (Suárez, 2012).

En la siguiente figura 46, se muestra la programación del modelo en el software Matlab de un modo visual más sencillo para estimar el IUUV (06 de octubre del 2016).

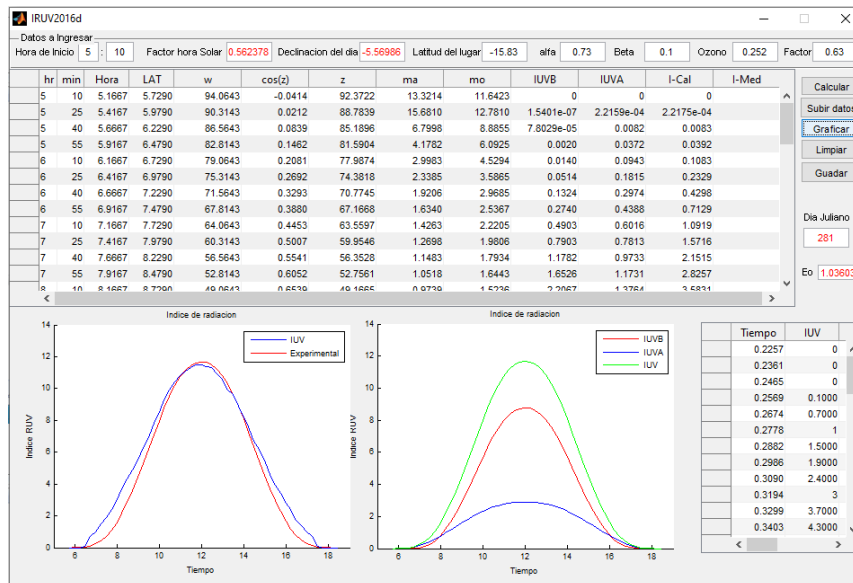


Figura 46. Estimación del modelo utilizando el Matlab

En la parte superior de la figura 4.18 se ingresan diversos parámetros como la declinación, capa de ozono, el coeficiente alfa y la beta de los aerosoles que se pueden modificar dentro de un intervalo establecido.

Los resultados de la estimación del IUUV para cualquier día sin presencia de nubes muestran un coeficiente de determinación aproximado de **0.988**.

Si bien el modelo empírico programado (Ecu. 2.75) en un determinado lenguaje de programación, muestra buenos resultados, no obstante, para realizar estudios sobre el IUUV, diversos autores utilizan modelos más estandarizados que son ampliamente validados en diferentes lugares, por ejemplo, el modelo SMARTS y TUV. Una comparación de estos modelos se muestra en la figura 47.

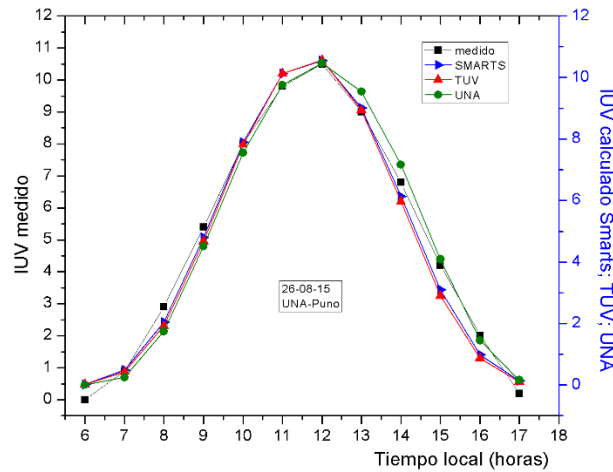


Figura 47. Comparación de diversos modelos para estimar el IUV

La figura 47 muestra nuevamente un buen compromiso entre los valores estimados y medidos del IUV para cielos sin presencia de nubes y los respectivos coeficientes de determinación:

- IUV medida comparado con IUV estimado (SMARTS) :R<sup>2</sup>=0.987
- IUV medida comparado con IUV estimado (TUV) :R<sup>2</sup>=0.983
- IUV medida comparado con IUV estimado (UNA) :R<sup>2</sup>=0.982

#### 4.8. Estimación del IUV para cielos parcialmente nublados

Para la estimación del IUV en cielos parcialmente nublados, utilizamos la ecuación (2.22) definida en la sección (2.2.6.3), esta expresión es la siguiente:

$$IUV_{med} = (CMF_{Rad}) IUV_{s-n} = f(CMF_{Rad}, Z) IUV_{s-n} \tag{4.13}$$

En el modelo propuesto por Lindfors la expresión anterior se expresa como:

$$IUV_{med} = A \left( \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^B IUV_{s-n} \tag{4.14}$$

Donde:

$IUV_{s-n}$  y  $Rad_{s-n}$  son, el índice ultravioleta, la irradiancia solar global sin presencia de nubes y se determinan con el modelo SMARTS.

En el proceso de ajuste de datos los parámetros  $A$  y  $B$  se expresan en función del  $\cos(Z)$ , luego se tiene las siguientes relaciones adicionales:

$$A = a(\cos Z)^b \tag{4.15}$$

$$B = [c + d \cos Z] \tag{4.16}$$

Finalmente, la expresión anterior se puede escribir como:

$$IUV_{med} = a(\cos Z)^b \left( \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^{[c+d \cos Z]} IUV_{s-n} \quad (4.17)$$

Esta expresión se utiliza para estimar el comportamiento del IUV para cielos parcialmente nublados.

### Procedimiento

Se selecciona los datos horarios del  $Rad$ ,  $IUV$  para un día *parcialmente nublado* de un determinado mes, por ejemplo, el **9 de noviembre del 2017**.

Haciendo uso del modelo SMARTS se procede a calcular la  $Rad_{s-n}$ ,  $IUV_{s-n}$

Las siguientes figuras 48 y 49 son las entradas (input) del programa SMARTS para calcular  $Rad_{s-n}$  y el  $IUV_{s-n}$

```

*smarts295.inp: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
'PUNO_UNAP_09-11-2017' → cambiar !Card 1 Comment
2 !Card 2 ISPR
-15.83 3.82 0 !Card 2a Latitude & altitude &
0 !Card 3 IATMOS
5.0 15.0 'SUMMER' 15.0 !Card 3a
0 !Card 4 IH2O
6 !Card 4a IH2O
0 !Card 5 IO3
0 0.254 !Card 5a IALT, Ab03 → cambiar
0 !Card 6 IGAS
2 !Card 6a
330 !Card 7 qCO2
1 !Card 7a ISPCTR
'S&F_URBAN' !Card 8 AEROS
1 !Card 9 ITURB
0.142 !Card 9a BETHA → cambiar
-1 !Card 10 IALBDX
0.05 !Card 10a RHO → cambiar
0 !Card 10b ITILT
290 390 1 1367.0 !Card 11 WLMN WLMX SUNCOR SOLARC
2 !Card 12 IPRT
290 390 0.5 !Card 12a WPMN WPMX INTVL
1 !Card 12b # Variables to Print
4 !Card 12c Variable codes
0 !Card 13 ICIRC
0 !Card 14 ISCAN
0 0 cambiar !Card 15 ILLUM
1 !Card 16 IUV
3 !Card 17 IMASS
2017 11 09 6.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 7.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 8.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 9.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 10.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 11.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 12.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 13.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 14.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 15.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 16.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 17.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 18.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass

```

Figura 48. Input del SMARTS para el IUV

```

*smarts295.inp: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
'PUNO_UNAP_09-11-2017' → cambiar !Card 1 Comment
2 !Card 2 ISPR
-15.83 3.82 0 !Card 2a Latitude & altitude &
0 !Card 3 IATMOS
5.0 15.0 'SUMMER' 15.0 !Card 3a
0 !Card 4 IH2O
6 !Card 4a IH2O
0 !Card 5 IO3
0 0.254 !Card 5a IALT, Ab03 → cambiar
0 !Card 6 IGAS
2 !Card 6a
330 !Card 7 qCO2
1 !Card 7a ISPCTR
'S&F_URBAN' !Card 8 AEROS
1 !Card 9 ITURB
0.076 !Card 9a BETHA → cambiar
-1 !Card 10 IALBDX
0.4 !Card 10a RHO → cambiar
0 !Card 10b ITILT
280 4000 1 1367.0 !Card 11 WLMN WLMX SUNCOR SOLARC
2 !Card 12 IPRT
280 4000 10 !Card 12a WPMN WPMX INTVL
1 !Card 12b # Variables to Print
4 !Card 12c Variable codes
0 !Card 13 ICIRC
0 !Card 14 ISCAN
0 cambiar !Card 15 ILLUM
0 !Card 16 IUV
3 !Card 17 IMASS
2017 11 09 6.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 7.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 8.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 9.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 10.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 11.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 12.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 13.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 14.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 15.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 16.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 17.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass
2017 11 09 18.0 -15.83 -70.03 -5 !Card 17a Air mass

```

Figura 49. Input del SMARTS para la Rad

Los valores en las entradas de la figura 48 y 49 son el factor geométrico como, latitud, longitud y altitud. También la estación del año, temperatura, etc. El factor atmosférico como el espesor de la capa de ozono, albedo del lugar; se consideró los aerosoles para una zona urbana.

Los valores que están en los recuadros de color verde, son los más sensibles. Los datos de salida (Output), cuando se ejecuta el programa nos proporciona valores del  $IUV_{s-n}$ ,  $Rad_{s-n}$  para cada unidad de tiempo programado. Este programa está diseñado para condiciones de cielo sin presencia de nubes.

Luego se calcula la relación entre  $CMF_{IUV}$  y  $CMF_{Rad}$ , todas las horas del mes de noviembre del 2017 ( $N = 330$ ), como se muestra en la figura 50.

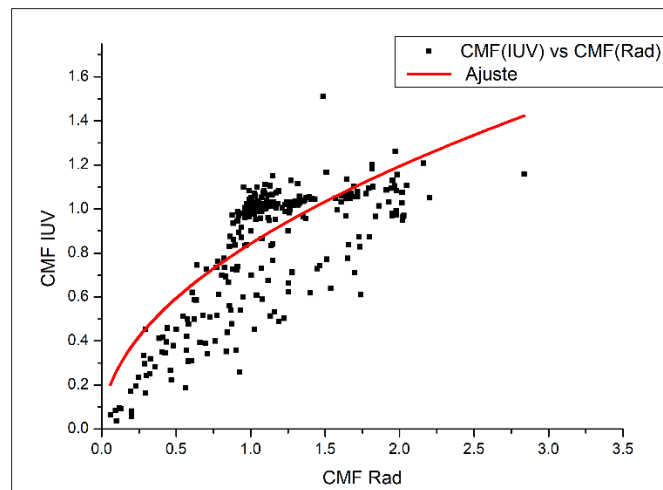


Figura 50. Distribución del  $CMF_{IUV}$  en función del  $CMF_{Rad}$

La ecuación de ajuste es:

$$CMF_{IUV} = A(CMF_{Rad})^B = 0.84231(CMF_{Rad})^{0.5031} ; R^2 = 0.56$$

Debido a que el coeficiente de determinación  $R^2$  es menor que 1, se procede a calcular para cada hora del correspondiente mes de noviembre, como se muestra en la figura 51.

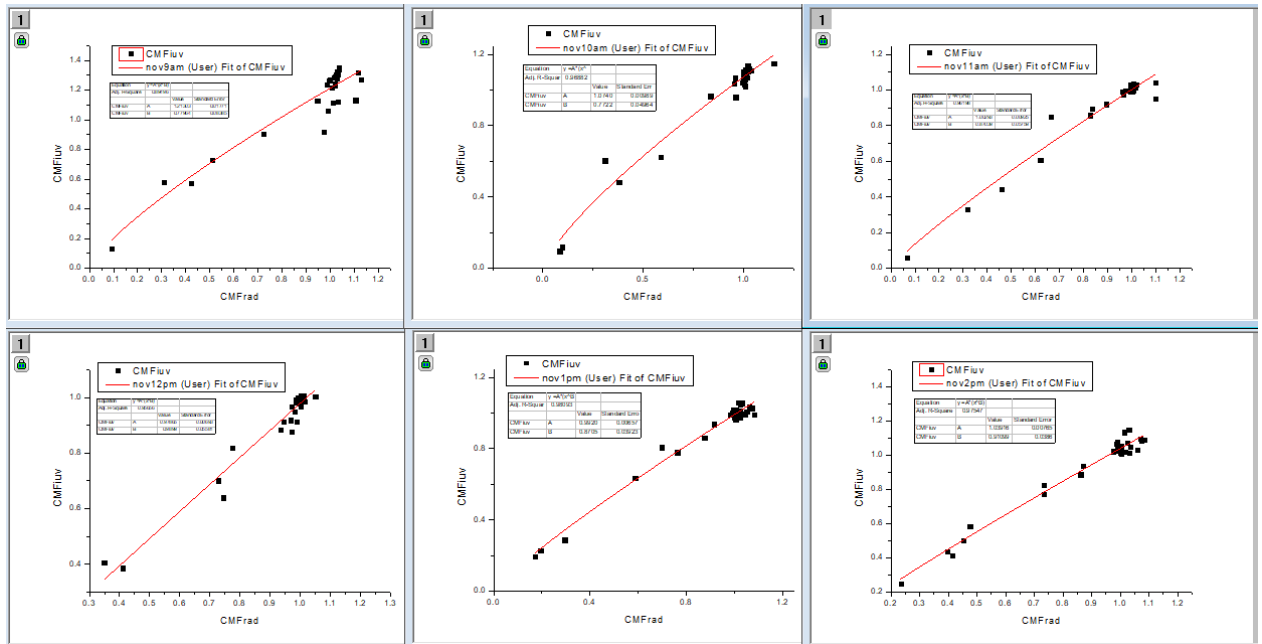


Figura 51. Cálculo de los parámetros A y B para cada hora

Obteniendo los siguientes valores que se indican en la tabla 11.

Tabla 11

Determinación de los parámetros A y B para cada hora

Hora	Parámetro A	Parámetro B	R <sup>2</sup>
8	1.57178	0.71072	0.86661
9	1.21303	0.77964	0.89496
10	1.07407	0.7722	0.96882
11	1.00293	0.87039	0.96198
12	0.97865	0.9899	0.95656
13	0.99201	0.87052	0.99201
14	1.03916	0.91099	0.97547
15	0.11416	1.0000	0.95777
16	1.31278	0.6453	0.94153

Notándose una mejora en el coeficiente de determinación que es muy próximo a 1. Luego, los parámetros A y B de todos los días del mes de noviembre, se expresan en función de las horas; que a su vez están relacionadas con el cos Z.

Tomando como ejemplo el día 9 de noviembre tenemos:



Día juliano

$$d_n = 313$$

Angulo diario  $\Gamma$

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} = 5.37$$

Declinación solar  $\delta$

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \operatorname{sen} \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma \\ + 0.000907 \operatorname{sen} 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.001480 \operatorname{sen} 3\Gamma$$

Reemplazando en la anterior obtenemos:

$$\delta = -0.29 \operatorname{rad}$$

Ecuación del tiempo  $E_t$

$$E_t = 0.000075 + 0.001868 * \cos \Gamma - 0.032077 * \operatorname{sen} \Gamma \\ - 0.014615 * \cos 2\Gamma - 0.04089 * \operatorname{sen} 2\Gamma$$

Reemplazando el ángulo diario

$$E_t = 16.00 \operatorname{min}$$

Considerando  $TSM = 8 \operatorname{horas}$

Mientras que la hora  $LAT$  es:

$$LAT = TSM + 4(L_s - L_L) + E_t$$

Donde:

$$L_s = 75^\circ \quad : \text{Es el meridiano para el Perú}$$

$$L_L = 78.08^\circ \quad : \text{Es el meridiano (longitud) del lugar, para la ciudad de Puno}$$

$$LAT = 8.598 \operatorname{horas}$$

Finalmente tenemos:

$$\cos Z = \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

Donde

$$\delta = -0.29 \operatorname{rad}$$

$$\phi = 15.83^\circ \quad : \text{Es latitud local}$$

$$\omega = \pm 15^\circ(12 - LAT) : \text{Es el ángulo horario.}$$

En la siguiente tabla 12 se muestra la equivalencia entre la hora ( $LAT$ ) y el  $\cos Z$

Tabla 12

*Equivalencia entre la hora ( $LAT$ ) y el  $\cos Z$*

TSM (horas)	LAT (horas)	cos(Z)
8	8.598096127	0.60645678
9	9.598096127	0.779427
10	10.59809613	0.89937486
11	11.59809613	0.9581261
12	12.59809613	0.95167693
13	13.59809613	0.88046684
14	14.59809613	0.7493487
15	15.59809613	0.56725797
16	16.59809613	0.34660385

A continuación, se grafica los parámetros A y B en función del  $\cos Z$ , se muestra en la figura 52.

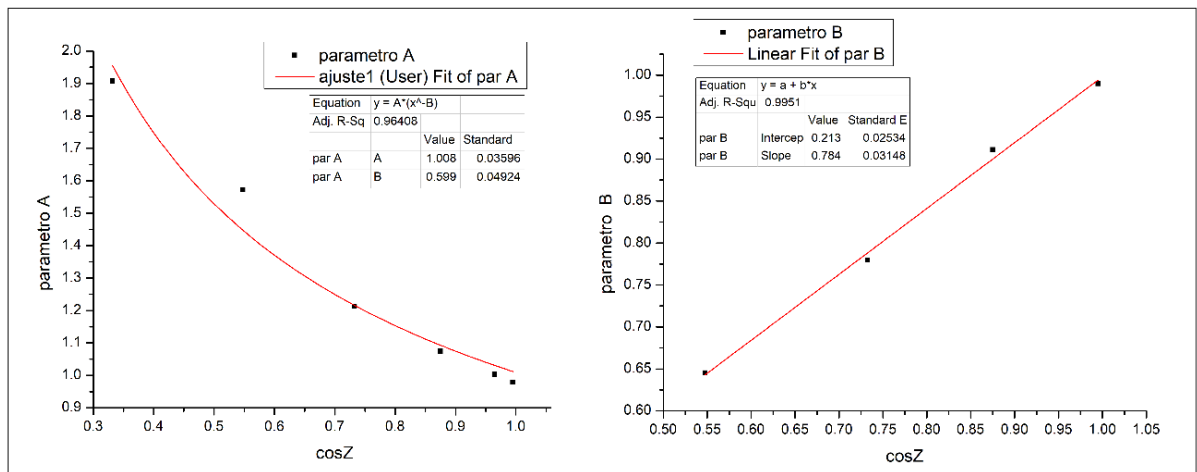


Figura 52. Cálculo de a, b, c y d, a partir de los parámetros A y B y el  $\cos Z$

Posteriormente se ajusta los parámetros A y B para obtener las constantes a, b, c y d. En el caso del parámetro A la ecuación de ajuste es de la forma:

$$A = a(\cos(Z))^b = 1.00882(\cos(Z))^{0.5999}$$

Mientras que para el parámetro B es:

$$B = c + d \cos(Z) = 0.21319 + 0.78493 \cos(Z)$$

Finalmente, la ecuación empírica para cielos parcialmente nublados es el siguiente

$$IUV = (1.00882 \pm 0.03596) * \cos Z^{-0.5999 \pm 0.04924} \left( \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^{[0.21319 \pm 0.02534 + (0.78493 \pm 0.03148) \cos Z]} \quad IUV_{s-n}$$

Sin considerar los errores se tiene:

$$IUV^* = 1.00882 * \cos Z^{-0.5999} \left( \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^{[0.21319 + 0.78493 * \cos Z]} \quad IUV_{s-n}$$

Considerando los errores **positivos** tenemos:

$$IUV^+ = 1.04478 * \cos Z^{-0.55066} \left( \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^{[0.23853 + 0.81641 \cos Z]} \quad IUV_{s-n}$$

Considerando los errores **negativos** se tiene:

$$IUV^- = 0.97286 * \cos Z^{-0.64914} \left( \frac{Rad_{med}}{Rad_{s-n}} \right)^{[0.18785 + 0.75345 \cos Z]} \quad IUV_{s-n}$$

Para validar la formula empírica elegimos varios días nublados arbitrarios del mes de noviembre del 2017 y algunos días del año 2018, como se muestran en la figuras 53; 54; 55; 56 ; 57; 58

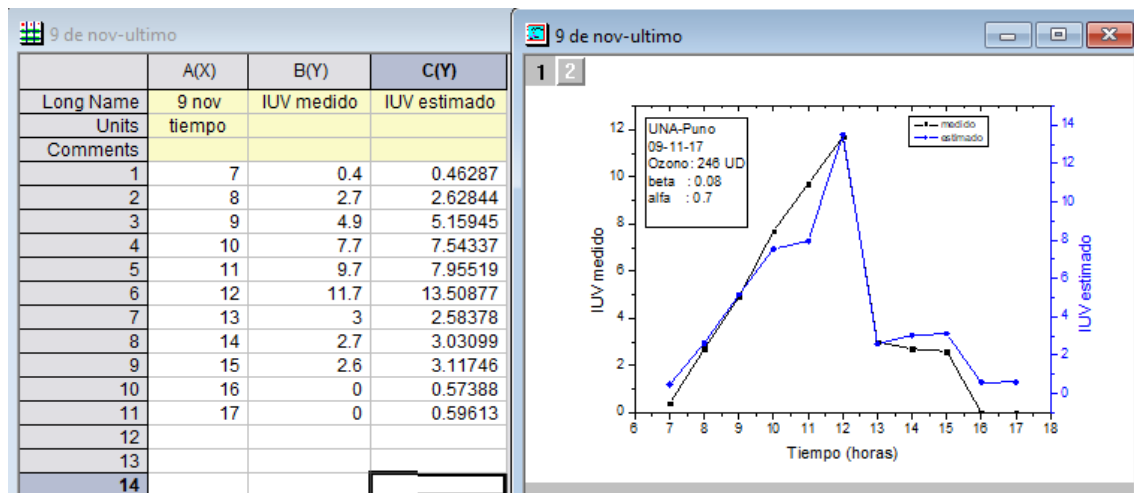


Figura 53. IUV estimado vs IUV medido, 9 de noviembre del 2017 (R<sup>2</sup>= 0.94917)

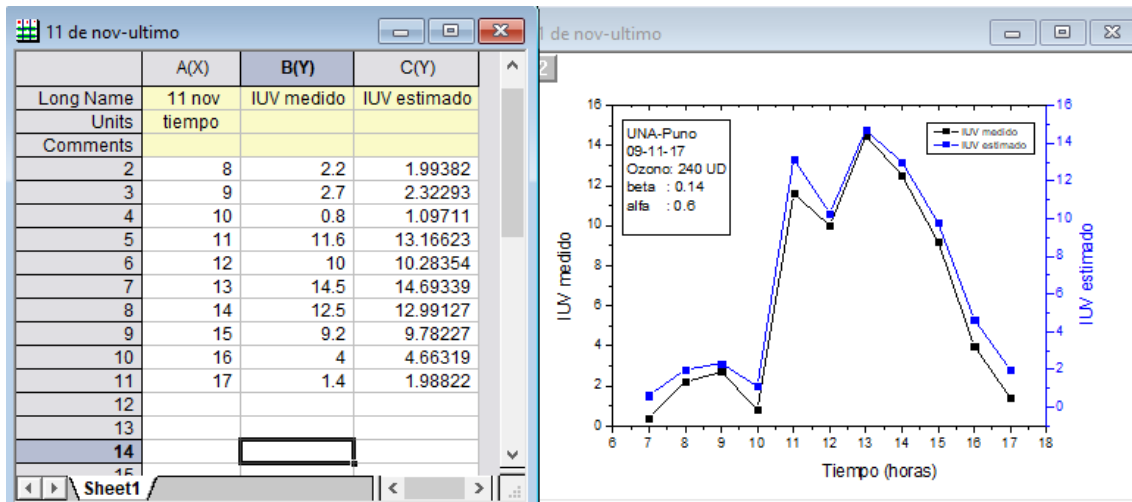


Figura 54. IUV estimado vs IUV medido, 11 de noviembre del 2017 ( $R^2=0.99203$ )

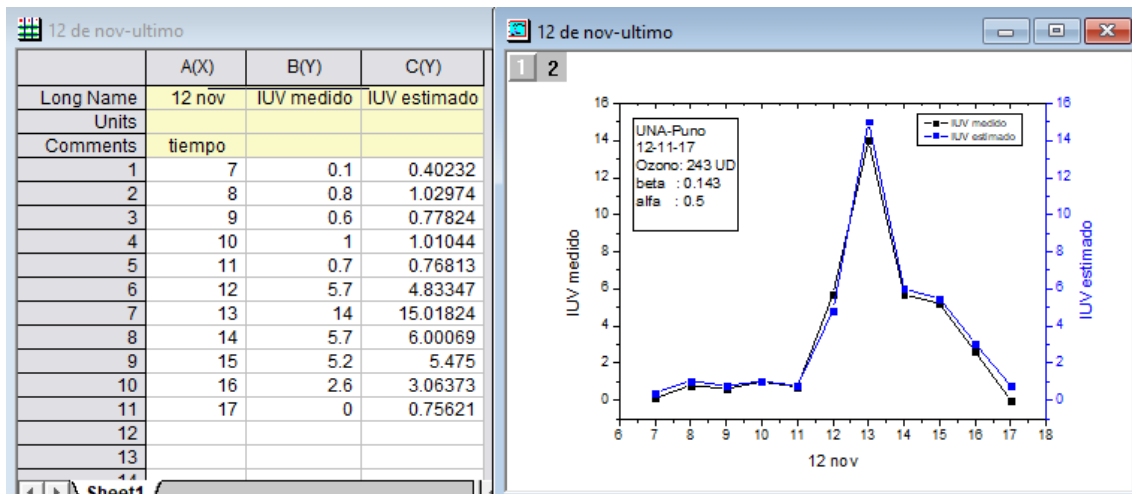


Figura 55. IUV estimado vs IUV medido, 12 de noviembre del 2017 ( $R^2=0.98766$ )

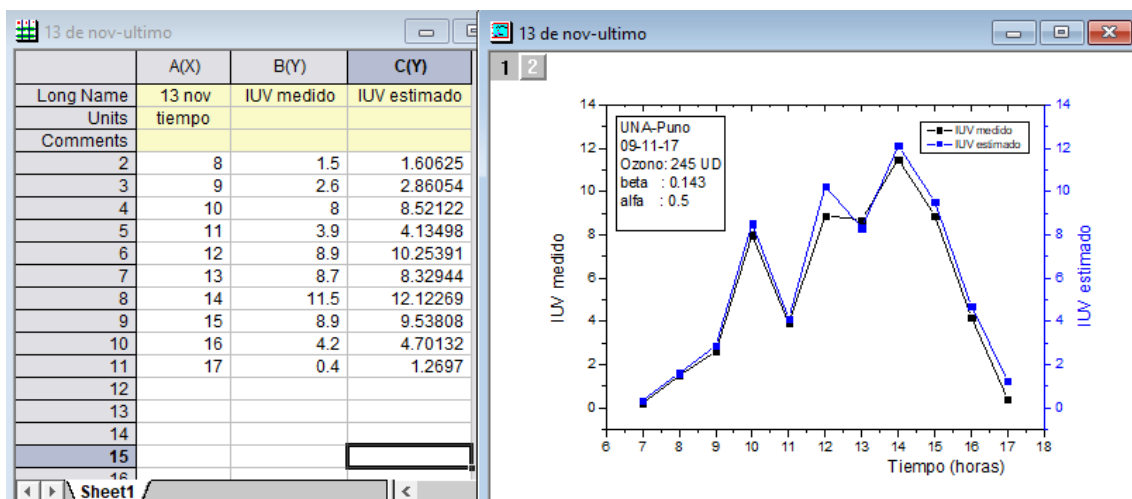


Figura 56. IUV estimado vs IUV medido, 13 de noviembre del 2017 ( $R^2=0.98723$ )

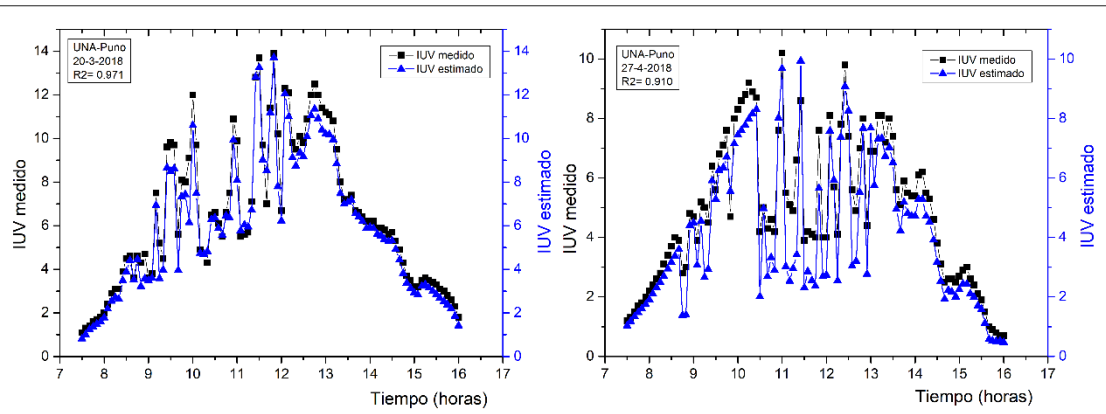


Figura 57. Día 20 de marzo y 27 de abril del 2018

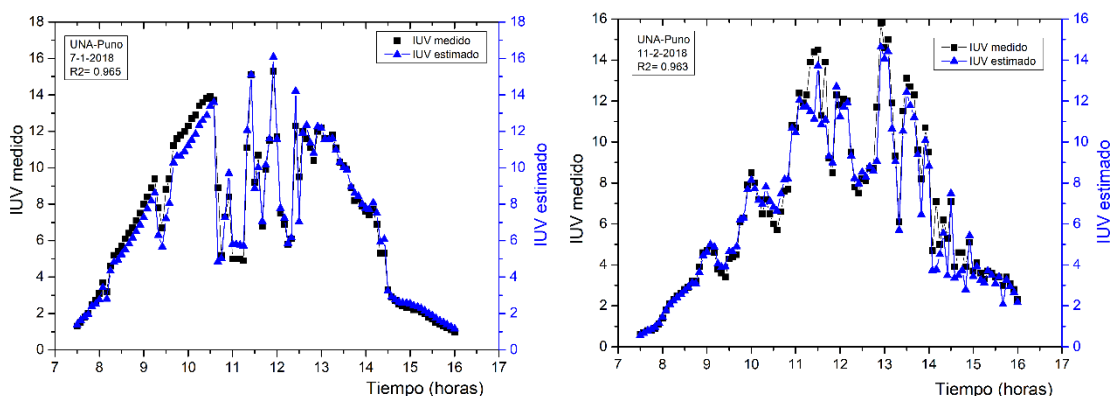


Figura 58. IUV estimado vs IUV medido, 7 ene y 2 feb del 2018

Como puede observarse de las figuras 53 al 58, los IUV estimados para cielos con presencia de nubes, tienen un comportamiento que varía por la configuración de las nubes.

Los datos de las figuras 57 y 58 fueron cada 5 minutos (anexo 4), en comparación con las figuras del 53 a. 56 que fueron cada 15 minutos, esto debido a la configuración de la estación meteorológica en la adquisición de datos.

Se observa que el coeficiente de determinación es muy próximo a 1 para el modelo de cielos sin presencia de nubes, en comparación con el modelo para cielos parcialmente nublados, esta diferencia se debe a la presencia de nubes, no obstante, los coeficientes de determinación son aceptables y permiten que hay una buena correlación entre el modelo y las mediciones.

Se debe mencionar que el modelo para cielos con presencia de nubes, que se ha aplicado en España para el periodo el periodo 2001-2005 y 2008 -2009, obteniéndose valores excelentes del UVER (radiación ultravioleta eritematica), obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.99, esta correlación permitió la reconstrucción de los años 2006 y 2007

Los indicadores estadísticos para validar el modelo empírico para cielo parcialmente nublado, se muestra a continuación en la tabla 13.

Tabla 13

*Indicadores estadísticos del modelo para cielos parcialmente despejados*

Mes	días	datos	MBE (%)	MABE (%)	RMSE (%)	R <sup>2</sup>
Noviembre	30	270	-7.793	10.67	14.034	0.964
Setiembre	23	207	4.41	10.46	13.18	0.99
Octubre	30	270	-0.1	9.395	10.92	0.99
26/08-30/11 (2017)	83	747	-1.5	10.25	12.94	0.97
Año 2018	310	33578	-1.15	8.78	12.99	0.97

La interpretación de la tabla (13) es la siguiente:

Noviembre:

El valor negativo MBE significa que el modelo empírico **subestima** las medidas.

El valor del RMSE y el MABE indica que el modelo se clasifica como **bueno** respecto a las mediciones. Mientras que el coeficiente de determinación es 0.964.

Setiembre

El valor positivo del MBE significa que el modelo empírico **sobrestima** las medidas.

El valor del RMSE y el MABE indica que el modelo se clasifica como **bueno** respecto a las mediciones.

Octubre

El valor negativo MBE significa que el modelo **subestima** las medidas.

El valor del RMSE y el MABE indica que el modelo se clasifica como **bueno** respecto a las mediciones.

Del 26 de agosto al 30 de noviembre

El valor negativo del MBE, significa que el modelo **subestima** las medidas.

El valor del RMSE y el MABE indica que el modelo se clasifica como **bueno** respecto a las mediciones.

Año 2018

El valor negativo del MBE, significa que el modelo **subestima** las medidas.

El valor del RMSE y el MABE indica que el modelo se clasifica como **bueno** respecto a las mediciones, también cabe mencionar que el coeficiente de

determinación es aceptable para el modelo empírico.

Según la descripción de los indicadores estadísticos de la tabla (13) se puede concluir que el coeficiente de determinación en promedio es de 0.97, también se concluye que el modelo subestima las mediciones en todos los casos, puede considerar que el **modelo es bueno**. (Mao, 2013; Yanfeng, 2017). Es pertinente aclarar que para el año 2018 el coeficiente de determinación (0.988) para cielos sin presencia de nubes, es mayor que el coeficiente de determinación (0.97) para cielos con presencia de nubes, esto se debe en gran medida a la presencia de nubes que generan errores en las variables del modelo aplicado.

La importancia de esta fórmula empírica (ecuación 2.22) para determinar el IUV para cielos presencia de nubes, es que depende solo de la radiación solar global medida  $Rad_{med}$  y de los valores calculados  $Rad_{cal}$  y  $IUV_{s-n}$  con el programa SMARTS. Esta importancia se pone de manifiesto en el costo ya que es más económico disponer un equipo que pueda medir la  $Rad_{med}$  con respecto a un equipo que mide el IUV. Por otro lado, los trabajos de investigación mencionan que se puede obtener  $Rad_{med}$  a partir de las temperaturas extremas de un determinado día como por ejemplo la fórmula de Bristow Campbell. También otra aplicación de esta fórmula empírica es para **reconstruir el comportamiento del IUV en series de tiempo** en un determinado lugar a partir de datos de temperaturas extremas (Bristol, 1984).

## CONCLUSIONES

- El análisis estadístico sobre el comportamiento del IUV y la radiación solar global durante el periodo de estudio muestra, que el factor geométrico de la declinación solar del sol respecto a la tierra, tiene una relación inversa con el IUV siendo este factor el que ocasiona la variabilidad del IUV, notándose valores muy altos del IUV en la estación de verano particularmente en enero, febrero y mínimos en la estación de invierno, particularmente en junio y julio, luego aumentan en noviembre y diciembre completándose el ciclo. También el factor atmosférico de la capa de ozono muestra una relación inversa con el IUV. Por otro lado, hay una relación directa del ángulo cenital con el IUV.
- El modelo aplicado para estimar el IUV tiene un buen compromiso con las mediciones y permite estimar los IUV para cielos claros, siendo la correlación es aproximadamente **0.988**. A partir de la buena correlación el modelo permite estimar el porcentaje debido al IUV-A y el IUV-B.
- El modelo propuesto para cielos con presencia de nubes y utilizando el modelo SMARTS, también muestra un compromiso aceptable, siendo el coeficiente de determinación **0.97**. Según los indicadores estadísticos se considera el modelo empírico aplicado como bueno durante el periodo de mediciones.





## RECOMENDACIONES

- Debido a su importancia de los efectos nocivos del IUUV que causa en la salud de la población, es necesario continuar con las mediciones para obtener el comportamiento de un año típico en la región de Puno.
- Por ello, se recomienda la instalación de equipos de estación meteorológica confiables y estandarizados, como Vaisala, Kipp-Zonen, para monitorear en varios lugares de la región y obtener un mejor registro del IUUV, Rad, aerosoles, la capa de ozono estratosférico.
- Respecto al modelo empírico del IUUV se recomienda aplicar, en otras ciudades de país para observar su comportamiento y su relación con la ubicación geográfica del lugar.
- Debido al avance en la literatura sobre el IUUV, es recomendable buscar nuevos modelos empíricos para estimar el IUUV, que mejoren el coeficiente de determinación, el grado de correlación con las mediciones, esto con la finalidad de tener modelos más confiables que permitan no solo estimar, sino también, predecir su comportamiento en días posteriores

## BIBLIOGRAFÍA

- Adhikari. (2013). Estimation of Global Solar Radiation for Four Selected Sites in Nepal Using Sunshine Hours, Temperature and Relative Humidity. *Journal of Power and Energy Engineering*, 01(03), 1–9. <https://doi.org/10.4236/jpee.2013.13003>
- Alfaro. (2009). *Anexo 1: ESTADISTICA Y PROBABILIDADES CON R*. <http://isbn.bnpp.gov.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=114538>
- Allen. (2008). Photocatalytic titania based surfaces: Environmental benefits. *Polymer Degradation and Stability*, 93(9), 1632–1646. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.04.015>
- Ångström. (1961). Techniques of Determining the Turbidity of the Atmosphere. *Tellus A*, 13(2), 214–223. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1961.tb00078.x>
- Ångström. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11(2), 156–166. <https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>
- Ångström. (1964). The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16(1), 64–75. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i1.8885>
- Anton. (2007). Modelos empíricos para la estimación de la irradiancia solar ultravioleta [Universidad de Extremadura]. In *Historia*. <file:///C:/Users/MATIAS/Downloads/Dialnet-ModelosEmpiricosParaLaEstimacionDeLaIrradianciaSol-1310.pdf>
- Aragones. (2009). *Relación de la radiación ultravioleta y el pterigión primario Relation of ultraviolet radiation and primary pterygium*. 22(1), 1–9. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s0864-21762009000100011&script=sci\\_arttext](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s0864-21762009000100011&script=sci_arttext)
- Badarinath. (2008). Influence of natural and anthropogenic activities on UV Index variations - A study over tropical urban region using ground based observations and satellite data. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 59(3), 219–236. <https://doi.org/10.1007/s10874-008-9103-4>
- Barbero. (2006). Determination of daily solar ultraviolet radiation using statistical models and artificial neural networks. *Annales Geophysicae*, 24(8), 2105–2114.

<https://doi.org/10.5194/angeo-24-2105-2006>

Bilbao. (2010). Estimation of UV-B irradiation from total global solar meteorological data in central Spain. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(5), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2009JD012505>

Bird. (1986). *Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earths Surface for Cloudless Atmospheres*. 87. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0087:SSSMFD>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0087:SSSMFD>2.0.CO;2)

Blumthaler. (1992). Solar UV-A and UV-B radiation fluxes at two Alpine stations at different altitudes. *Theoretical and Applied Climatology*, 46(1), 39–44. <https://doi.org/10.1007/BF00866446>

Blumthaler. (1994). *Simultaneous spectroradiometry: a study of solar UV irradiance at two altitudes*. 21(25), 2805–2808. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/94GL02786>

Briggs. (2006). *Blue/uv-a receptors: historical overview*. 171–197. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/1-4020-3811-9\\_10](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/1-4020-3811-9_10)

Bristol. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Post Positivesme*, 31(0427), 159–166. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)

Calbó. (2005). Empirical studies of cloud effects on UV radiation: A review. *Reviews of Geophysics*, 43(2), 1–28. <https://doi.org/10.1029/2004RG000155>

Caldwell. (1971). *Solar UV irradiation and the growth and development of higher plants*. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-68090-8\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-68090-8_7)

Calvin. (2009). *The solar system. Utilization of Space*. <https://solarviews.com/eng/solarsys.htm>

Cañada. (2000). Influences of the clearness index for the whole spectrum and of the relative optical air mass on UV solar irradiance for two locations in the Mediterranean area, Valencia and Cordoba. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D4), 4759–4766. <https://doi.org/10.1029/1999JD901106>

- Cañada, J. (2008). Study of erythemal, UV (A+B) and glob. *International Journal of Climatology*, 2029(March 2008), 2011–2029. <https://doi.org/10.1002/joc.1569>
- Ccora. (2020). *Boletín mensual vigilancia de la radiación UV-B en ciudades del país* (Vol. 01). [https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/354/Vigilancia-radiación-UV-B-ciudades-País\\_Abr-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/354/Vigilancia-radiación-UV-B-ciudades-País_Abr-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- CIE. (2002). *Spectral Weighting of Sunlight*. [https://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/scheer/docs/sunbeds\\_co121c\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/scheer/docs/sunbeds_co121c_en.pdf)
- Di Sarra. (2002). Effects of desert dust and ozone on the ultraviolet irradiance at the Mediterranean island of Lampedusa during PAUR II. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(18), PAU 2-1-PAU 2-14. <https://doi.org/10.1029/2000JD000139>
- Dolin. (1994). *Solar ultraviolet radiation and ocular disease: a review of the epidemiological and experimental evidence*. I(3). <https://doi.org/doi.org/10.3109/09286589409047224>
- Escamilla. (2010). *Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales* [Universidad Politécnica de Cataluña Departamento]. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9992/PFC\\_Raul\\_Escamilla.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9992/PFC_Raul_Escamilla.pdf)
- Fabo. (2004). *Ultraviolet B but not Ultraviolet A Radiation Initiates Melanoma*. 6372–6376. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-04-1454>
- Fioletov. (2009). On the relationship between erythemal and vitamin D action spectrum weighted ultraviolet radiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 95(1), 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.11.014>
- Foyo. (1998). Ground based ultraviolet (290-385 nm) and broadband solar radiation measurements in south-eastern Spain. *International Journal of Climatology*, 18(12), 1389–1400. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199810\)18:12<1389::AID-JOC318>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199810)18:12<1389::AID-JOC318>3.0.CO;2-N)

- Foyo. (1999). A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290-385 nm). *Journal of Applied Meteorology*, 38(7), 1020–1026.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1020:ASAWMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1020:ASAWMT>2.0.CO;2)
- Foyo. (2001). On the use of a cloud modification factor for solar UV (290-385 nm) spectral range. *Theoretical and Applied Climatology*, 68(1–2), 41–50.  
<https://doi.org/10.1007/s007040170052>
- Foyo, I. (2003). The influence of cloudiness on UV global irradiance (295-385 nm). *Agricultural and Forest Meteorology*, 120(1–4), 101–111.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.023>
- Frederick. (1993). *Empirical Studies of Tropospheric Transmission in the Ultraviolet: Broadband Measurements*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032<1883:ESOTTI>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032<1883:ESOTTI>2.0.CO;2)
- Gallagher. (2006). Adverse effects of ultraviolet radiation: A brief review. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 92(1), 119–131.  
<https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2006.02.011>
- Gandia. (2015). Relationship between UVB and broadband solar radiation in Spain. *International Journal of Climatology*, 35(July 2014), 1761–1771.  
<https://doi.org/10.1002/joc.4088>
- Gray. (2010). Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 48(4).  
<https://doi.org/10.1029/2009RG000282>
- Grifoni. (2022). Protective Measures From Solar Ultraviolet Radiation for Beach Lifeguards in Tuscany (Italy): Shade and Clothing Strategies. *Safety and Health at Work*, 13(4), 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2022.08.009>
- Gueymard. (2003). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4), 423–453.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>
- Gueymard. (2005). *SMARTS code, version 2.9.5 MANUAL*. September.  
[https://www.researchgate.net/publication/236314699\\_SMARTS\\_code\\_version\\_295\\_User%27s\\_Manual](https://www.researchgate.net/publication/236314699_SMARTS_code_version_295_User%27s_Manual)

- Huillca. (2013). Modelo de la radiación solar uv-b para la ciudad de puno. *RIA*, 15, 55–63. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5893925>
- Huillca. (2015). Modelo Parametrico De La Radiación Ultravioleta Global Para Cielos Claros En La Ciudad De Puno. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 17(1), 2–11. <https://doi.org/10.18271/ria.2015.89>
- Huillca. (2017). Ultraviolet Index in the city of Puno for clear skies. *RIA*, 19, 211–218. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.280>
- Hülсен. (2007). Characterization and calibration of ultraviolet broadband radiometers measuring erythemally weighted irradiance. *Applied Optics*, 46(23), 5877–5886. <https://doi.org/10.1364/AO.46.005877>
- Iqbal. (1983). *An introduction to solar radiation* (1era ed.). Academic Press. [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=3\\_qWce\\_mbPsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Iqbal+M.,+1983.+An+Introduction+to+Solar+Radiation.+Toronto+Canada,+Academic+Press.&ots=h6w0ViK7Rr&sig=8ME\\_c8sXujO9oqwJCjMGkOO5DZc#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=3_qWce_mbPsC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Iqbal+M.,+1983.+An+Introduction+to+Solar+Radiation.+Toronto+Canada,+Academic+Press.&ots=h6w0ViK7Rr&sig=8ME_c8sXujO9oqwJCjMGkOO5DZc#v=onepage&q&f=false)
- Jacovides. (2006). Solar global UV (280-380 nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy*, 31(14), 2728–2738. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.11.021>
- Jacquet. (2003). Effects of ultraviolet radiation on marine virus-phytoplankton interactions. *FEMS Microbiology Ecology*, 44(3), 279–289. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00075-8)
- Johnson. (1996). Analysis of test methods for UV durability predictions of polymer coatings. *Progress in Organic Coatings*, 27(1–4), 95–106. [https://doi.org/10.1016/0300-9440\(94\)00525-7](https://doi.org/10.1016/0300-9440(94)00525-7)
- Junge. (1955). the Size Distribution and Aging of Natural Aerosols As Determined From Electrical and Optical Data on the Atmosphere. In *Journal of Meteorology* (Vol. 12, Issue 1, pp. 13–25). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1955\)012<0013:tsdaao>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1955)012<0013:tsdaao>2.0.co;2)
- Justus. (1985). A Model for Solar Spectral Irradiance and Radiance at the Bottom and

- Top of a Cloudless Atmosphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 24(3), 193–205. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1985\)024<0193:AMFSSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024<0193:AMFSSI>2.0.CO;2)
- Kalliskota. (2000). Comparison of daily UV doses estimated from Nimbus 7/TOMS measurements and ground-based spectroradiometric data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D4), 5059–5067. <https://doi.org/10.1029/1999JD900926>
- Kasten. (1989). Revised Optical Air Mass Tables. *Applied Optics*, 28(22), 4735–4738. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Keppler. (2012). Ultraviolet-radiation-induced methane emissions from meteorites and the Martian atmosphere. *Nature*, 486(7401), 93–96. <https://doi.org/10.1038/nature11203>
- Koepke. (2006). Effects of altitude and aerosol on UV radiation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(1). <https://doi.org/10.1029/2005JD006444>
- Krizek. (2004). Influence of PAR and UV-A in Determining Plant Sensitivity and Photomorphogenic Responses to UV-B Radiation¶ †. *Photochemistry and Photobiology*, 79(4), 307. <https://doi.org/10.1562/2004-01-27-ir.1>
- Kunz. (2006). Plant Responses to UV Radiation and Links to Pathogen Resistance. *International Review of Cytology*, 255(06), 1–40. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(06\)55001-6](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(06)55001-6)
- Ley. (2013). *ley 30102*. [www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/30102.pdf](http://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/Leyes/30102.pdf)
- Li. (2010). A meta-analysis of the responses of woody and herbaceous plants to elevated ultraviolet-B radiation. *Acta Oecologica*, 36(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.09.002>
- Lindfors. (2007). A method for reconstruction of past UV radiation based on radiative transfer modeling: Applied to four stations in northern Europe. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(23), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2007JD008454>
- Liu. (2002). Effect of carbon black on UV stability of LLDPE films under artificial

- weathering conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 75(3), 485–499.  
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(01\)00252-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00252-X)
- Luccini. (2007). *Efecto De Incremento De Radiación Solar Por Nubes Dispersas En El Ambiente De Bahía Paraíso , Península Antártica*. 2005–2008.  
[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=uOOIXMsAAAAJ&citation\\_for\\_view=uOOIXMsAAAAJ:9ZIFYXVOiuMC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=uOOIXMsAAAAJ&citation_for_view=uOOIXMsAAAAJ:9ZIFYXVOiuMC)
- Madronich. (1997). Theoretical Estimation of Biologically Effective UV Radiation at the Earth's Surface. *Solar Ultraviolet Radiation, I*, 23–48. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-03375-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03375-3_3)
- Madronich. (1998). Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 2(1), 5–15.  
<https://doi.org/10.1039/b211155c>
- Mao. (2013). General models for estimating daily global solar radiation for different solar radiation zones in mainland China. *Energy Conversion and Management*, 70, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.004>
- Marín. (2005). The UV Index on the Spanish Mediterranean Coast. *Photochemistry and Photobiology*, 81(3), 659. <https://doi.org/10.1562/2004-11-25-ra-380.1>
- Martinez. (1996). Measurement and Analysis of Ultraviolet Solar. *International Journal*, 16, 947–955. [https://doi.org/https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199608\)16:8<947::AID-JOC55>3.0.CO;2-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199608)16:8<947::AID-JOC55>3.0.CO;2-O)
- Martinez, J. (1999). Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology*, 19(8), 903–911.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19990630\)19:8<903::AID-JOC400>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19990630)19:8<903::AID-JOC400>3.0.CO;2-N)
- Mateos. (2010). Empirical models of UV total radiation and cloud effect study. *International Journal of Climatology*, 30(9), 1407–1415.  
<https://doi.org/10.1002/joc.1983>
- Meunier. (2023). Fotoinmunología: efectos inmunológicos de la radiación ultravioleta e implicaciones en dermatología. *EMC - Dermatología*, 57(1), 1–10.



[https://doi.org/10.1016/s1761-2896\(23\)47539-5](https://doi.org/10.1016/s1761-2896(23)47539-5)

- Miguel. (2011). Measurements and attenuation of erythemal radiation in Central Spain. *International Journal of Climatology*, 32(6), 929–940. <https://doi.org/10.1002/joc.2319>
- Mimbela. (2016). Radiación Ultravioleta. Análisis de su Comportamiento Estacional en Diferentes Sectores de la Región Piura. Costa Norte del Perú Dedios. *Senamhi*, 7(1), 26–30. <file:///C:/Users/MATIAS/Downloads/Dialnet-RadiacionUltravioletaAnalisisDeSuComportamientoEst-6007728.pdf>
- Ogunjobi. (2004). Ultraviolet (0.280-0.400  $\mu\text{m}$ ) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: Analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research*, 71(3), 193–214. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.05.001>
- Pahkala. (2003). Effects of ultraviolet-B radiation on behaviour and growth of three species of amphibian larvae. *Chemosphere*, 51(3), 197–204. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00813-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00813-5)
- Paoletti. (2005). UV-B and Mediterranean forest species: Direct effects and ecological consequences. *Environmental Pollution*, 137(3), 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.028>
- Pribullová. (2008). Typical distribution of the solar erythemal UV radiation over Slovakia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(17), 5393–5401. <https://doi.org/10.5194/acp-8-5393-2008>
- Renaud. (2000). Influence of snow and clouds on erythemal UV radiation: Analysis of Swiss measurements and comparison with models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D4), 4961–4969. <https://doi.org/10.1029/1999JD900160>
- Rivas, M. (2020). Solar ultraviolet A radiation and nonmelanoma skin cancer in Arica, Chile. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 212, 112047. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.112047>
- Román. (2010). *Efectos de los componentes atmosféricos sobre la radiación eritemática y modelo propuesto para la reconstrucción de series* [Universidad de valladolid].

<http://www5.uva.es/renova/esp/Roman2010.pdf>

- Runeckles. (1994). The impact of UV-B radiation and ozone on terrestrial vegetation. *Environmental Pollution*, 83(1–2), 191–213. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90035-3)
- Sabburg. (2006). Spectral dependency of cloud enhanced UV irradiance. *Atmospheric Research*, 81(3), 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.11.011>
- Sabburg. (2009). Five years of cloud enhanced surface UV radiation measurements at two sites (in the Northern and Southern Hemispheres). *Atmospheric Research*, 93(4), 902–912. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.05.003>
- Santos, J. (2011). Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation. *International Journal of Climatology*, 31(3), 451–460. <https://doi.org/10.1002/joc.2072>
- Serrano. (2006). Daily and annual variations of erythemal ultraviolet radiation in Southwestern Spain. *Annales Geophysicae*, 24(2), 427–441. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-427-2006>
- Sinha. (2002). Life under solar UV radiation in aquatic organisms. *Advances in Space Research*, 30(6), 1547–1556. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00370-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00370-8)
- Sordo. (2013). Cáncer de piel y radiación solar: experiencia peruana en la prevención y detección temprana del cáncer de piel y melanoma Skin cancer and sun radiation: peruvian experience in the prevention and early detection of skin cancer and melanoma. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 30(1), 113–118.  
[www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource\\_ssm\\_path=/media/assets/rpm\\_esp/v30n1/a21v30n1.pdf](http://www.scielosp.org/article/ssm/content/raw/?resource_ssm_path=/media/assets/rpm_esp/v30n1/a21v30n1.pdf)
- Suárez. (2012). Modelamiento y pronóstico del índice ultravioleta solar en Huancayo. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 02(02), 138–147. <https://doi.org/10.18259/acs.2012016>
- Suárez. (2017). Ultraviolet solar radiation in the tropical central Andes (12.0°S). *Photochemical and Photobiological Sciences*, 16(6), 954–971. <https://doi.org/10.1039/c6pp00161k>

- Sweet. (2012). Evidence of melanoma in wild marine fish populations. *PLoS ONE*, 7(8).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041989>
- Teramura. (1991). Changes in growth and photosynthetic capacity of rice with increased UV-B radiation. *Physiologia Plantarum*, 83(3), 373–380.  
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00108.x>
- Toledano. (2005). *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación 'El Arenosillo' de la red AERONE* [Universidad de Valladolid]. <https://doi.org/10.35376/10324/29641>
- Vanicek. (1999). *UV- index for the public : a guide for publication and interpretation of solar UV index forecasts focvr the public. January 2000*, 27.  
[https://www.researchgate.net/publication/288523666\\_UV-Index\\_for\\_the\\_Public](https://www.researchgate.net/publication/288523666_UV-Index_for_the_Public)
- Varo. (2006). *Modelización de la radiación ultravioleta solar*.  
<http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=19022>
- Verbeek. (2011). Degradation as a result of UV radiation of bloodmeal-based thermoplastics. *Polymer Degradation and Stability*, 96(4), 515–522.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.01.003>
- Vu. (1984). Effects of enhanced UV-B radiation (280-320 nm) on ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase in pea and soybean. *Environmental and Experimental Botany*, 24(2), 131–143. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(84\)90014-5](https://doi.org/10.1016/0098-8472(84)90014-5)
- Wang. (2014). UV variability in an arid region of Northwest China from measurements and reconstructions. *International Journal of Climatology*, 35(8), 1938–1947.  
<https://doi.org/10.1002/joc.4099>
- Wenmin. (2022). Mapping clear-sky surface solar ultraviolet radiation in China at 1 km spatial resolution using Machine Learning technique and Google Earth Engine. *Atmospheric Environment*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119219>
- WHO. (2003). *Indice UV Solar Mundial*.  
<https://www.who.int/es/publications/i/item/9241590076>
- WHO. (2004). WHO: Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Tobacco Smoke & Involuntary Smoking*, 83, Volume 83.



<https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/mono83.pdf>

Wright. (2010). Medición y predicción de la radiación solar global UV-B bajo cielos claros y sin nubes. *Uniciencia*, 24(1), 111–120.  
<https://www.redalyc.org/pdf/4759/475947765012.pdf>

Yanfeng. (2017). Classification of solar radiation zones and general models for estimating the daily global solar radiation on horizontal surfaces in China. *Energy Conversion and Management*, 154(September), 168–179.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.043>

Zhang. (2014). Solar ultraviolet radiation exclusion increases soybean internode lengths and plant height. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184(July 2011), 170–178.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.011>





**INFORME DE CALIBRACION**

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – PUNO  
 MODELO DE ESTACION : VANTAGE PRO2 (EU) – W  
 MARCA : DAVIS INSTRUMENTS  
 SERIE UNIDAD ISS : A3788N083 – 6328NZ  
 SERIE UNIDAD CONSOLA : A3788N083 – 6328NZ  
 UBICACIÓN : PUNO  
 FECHA DE CALIBRACIÓN : 14/11/2017  
 FECHA DE EXPIRACIÓN : 30/10/2018

SENSOR DE ESTACION METEOROLÓGICA	MARGEN DE ERROR	PROMEDIO	MAX./MIN.	ERROR PROMEDIO	CORRELACION	REFERENCIA ESTACION PATRON. DAVIS (NIST)
	GENERAL	CLIENTE	CLIENTE	CLIENTE	CLIENTE	
TEMPERATURA-6162	± 0.5 °C	16.50 °C	19.4 / 2.9 °C	0.3 °C	0.97	160310N01
HUMEDAD RELATIVA-6162	± 3 %	29.00 %	53.40 / 24 %	0.4 %	0.96	160310N01
VELOCIDAD DE VIENTO-6410 Anemometer with 7905L "large" wind cups	±2 mph ó ±5%,	3.77 Km/h	14.50 / 0.0 Km/h	0.6Km/h	0.94	160310N03
PRECIPITACIÓN-6162	±4% + 1 cuenta de lluvia	0.0 mm	0.0/0.0 mm	0.0 mm	1.00	160310N02
PRESIÓN BAROMÉTRICA-6162	± 1.0 mb	1029.50 mb	1037.7 / 1002.3 mb	0.2 mb	0.98	AS160310002

**Tipo de Calibración:** Contrastación con Estación Patrón DAVIS.

Se instalan los sensores (Temperatura, Humedad Relativa, Precipitación, Viento y Presión) de la Estación Patrón al lado de la Estación del Cliente.

Se verifica que la consola este recibiendo todos los datos de su respectivo transmisor ISS.

Las lecturas de ambas estaciones se realizan por un periodo de 24 horas, bajo las mismas condiciones, en la cual se hace un seguimiento de los datos para las calibraciones respectivas.

El usuario está en la responsabilidad de recalibrar el instrumento a intervalos de un año en base a las recomendaciones de SerTec Perú y el

fabricante; cuyo servicio debe ser realizado por personal autorizado de SERTEC.

Los resultados del certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones encontrando que los sensores se encuentran dentro de los Rangos Permisibles.

SerTec Perú, no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.

Este informe de calibración es trazable a patrones internacionales.

Este documento no es válido sin la firma del representante de SerTec Perú.

**César Sánchez Portales**  
Administrador de Servicios.

14/11/2017

Oficina Comercial  
 Av. Costanera 1280 – San Miguel – Lima  
 Teléfonos: (511) 963 959 328 – 942 132 136  
 Email: [csanchez@sertecperu.net](mailto:csanchez@sertecperu.net) / [administracion@sertecperu.net](mailto:administracion@sertecperu.net)

## Anexo 2. Expresiones para parametros estadísticos

**N:** Número de datos

**M:** promedio es unamedida de termino centarl

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

**Md:** Mediana

Es una medida de tendencia central. Se define como el valor que deja a izquierda y derecha el mismo número de datos. Una vez ordenados los datos en orden creciente o decreciente, si el número de datos es impar, la mediana es el valor central; y si es par, la mediana es el valor promedio de los dos valores centrales.

**$Q_1$ :** Primer cuartil es el dato que deja el 25% de los datos por debajo, también llamado percentil 25.

**$Q_3$ :** Tercer cuartil es el dato que deja el 75% de los datos por debajo, también llamado percentil 75.

**RIC :** Rango intercuartil es la diferencia entre el tercer  $Q_3$ y el primer cuartil  $Q_1$

$$RIC = Q_3 - Q_1$$

**V:** Coeficiente de variación intercuartil, se define como:

$$V = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3 + Q_1}$$

**g:** Sesgo es una medida de la asimetría calculada como sigue:

$$g = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - M)^3}{(N-1)(N-2) SD^3}$$

Donde

**N:** Es el número de datos de la serie a tratar,  $x_i$  cada uno de los datos y  $M$  el valor promedio el valor promedio y **SD** es la desviación estándar

**k:** Curtosis

Se relaciona con la forma puntiaguda en una distribución, comparada con una curva en forma de campana. Los valores próximos a cero se corresponden con formas cercanas a este tipo de curvas (distribuciones mesocúrticas). Si  $k$  es positiva, indica que tiene un pico más muy próximo al centro y unas colas más largas que la normal (distribuciones leptocúrticas). Si es negativa, es más plana que lo normal con colas más cortas (distribuciones platicúrticas). La expresión para la curtosis es:

$$k = \frac{N(N+1) \sum_{i=1}^N (x_i - M)^4}{(N-1)(N-2)(N-3)SD^4} - \frac{3(N-1)^2}{(N-2)(N-3)}$$

Donde:

$N$  Es el número de datos de la serie a tratar,  $x_i$  cada uno de los datos y  $M$  el valor promedio y  $SD$  es la desviación estándar

Para validar modelos se utilizan los siguientes índices estadísticos: error medio (Mean Bias Error: MBE), error medio absoluto (Mean Bias Absolute Error: MABE) y error cuadrático medio (Root Mean Square Error: RMSE) definidos como se muestra en las ecuaciones AI.7. AI.8 y AI.9, respectivamente (Miguel et al., 2001).

MBE: Mean Bias Error: Error de sesgo medio

$$MBE = \frac{1}{M} \frac{\sum_{i=1}^N (IUV_{cal,i} - IUV_{med,i})}{N}$$

$$MBE (\%) = \frac{100\%}{M} \frac{\sum_{i=1}^N (IUV_{cal,i} - IUV_{med,i})}{N}$$

MABE: Mean Bias Absolute Error: Error absoluto de sesgo medio

$$MABE = \frac{1}{M} \frac{\sum_{i=1}^N |IUV_{cal,i} - IUV_{med,i}|}{N}$$

$$MABE (\%) = \frac{100\%}{M} \frac{\sum_{i=1}^N |IUV_{cal,i} - IUV_{med,i}|}{N}$$

RMSE: Root Mean Square Error: Error cuadrático medio

$$RMSE = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (IUV_{cal,i} - IUV_{med,i})^2}{N}}$$

$$RMSE (\%) = \frac{100\%}{M} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (IUV_{cal,i} - IUV_{med,i})^2}{N}}$$

Donde  $IUV_{cal}$  es la estimación proporcionada por el modelo a validar,  $IUV_{med}$  el valor de la variable medida en la estación y  $M$  es el valor promedio de esta variable. El valor del RMSE y el MABE sirven para analizar cómo se ajusta el modelo a las medidas. Por otro



lado, el MBE da cuenta de si el modelo sobrestima ( $MBE > 0$ ) o subestima ( $MBE < 0$ ) las medidas.

$R^2$ : Coeficiente de determinación

Es un estadístico usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

*SD*: Desviación estándar

La desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - M)^2}{N}}$$



### Anexo 3. Códigos fuente de la ecuación (2.75) para estimar el IUV

```
PROGRAM indice

IMPLICIT NONE
real(kind=4),dimension(0:400):: Ao
real(kind=4),dimension(0:400):: To
real(kind=4),dimension(0:400):: In

real g
real L
real i
integer j
real a
real b
real suma1
real areal

real A1
real A2
real A3
real A4
real R1
real O1
real d
real mo
real ma
real beta
real alfa
real coseta
real zeta
real fc

Ao(1)=141
Ao(2)=72.951
Ao(3)=38
Ao(4)=20
Ao(5)=10
Ao(6)=4.8
Ao(7)=2.7
```



$A_0(7)=2.7$   
 $A_0(8)=1.35$   
 $A_0(9)=0.8$   
 $A_0(10)=0.38$   
 $A_0(11)=0.16$   
 $A_0(12)=0.075$   
 $A_0(13)=0.04$   
 $A_0(14)=0.019$   
 $A_0(15)=0.007$   
 $A_0(16)=0.000$   
 $A_0(17)=0.000$   
 $A_0(18)=0.000$   
 $A_0(19)=0.000$   
 $A_0(20)=0.000$   
 $A_0(21)=0.000$   
 $A_0(22)=0.000$   
 $A_0(23)=0.000$   
 $A_0(24)=0.000$   
 $A_0(25)=0.000$

$In(1)=162.5$   
 $In(2)=286.25$   
 $In(3)=535$   
 $In(4)=560$   
 $In(5)=527.5$   
 $In(6)=557.5$   
 $In(7)=602.51$   
 $In(8)=705$   
 $In(9)=747.5$   
 $In(10)=782.5$   
 $In(11)=997.5$   
 $In(12)=906.25$   
 $In(13)=960$   
 $In(14)=877.5$   
 $In(15)=955$   
 $In(16)=1044.99$   
 $In(17)=940$   
 $In(18)=1125.01$   
 $In(19)=1165$   
 $In(20)=1081.25$   
 $In(21)=1210$   
 $In(22)=931.25$   
 $In(23)=1200$   
 $In(24)=1033.74$   
 $In(25)=1702.49$



```
print*, "Ingresar el valor del ma:"
read*,ma
print*, "Ingresar el valor del mo:"
read*,mo
print*, "Ingresar el valor del ozono d:"
read*,d
print*, "Ingresar el valor del ozono beta:"
read*,beta
print*, "Ingresar el valor del ozono alfa:"
read*,alfa
print*, "Ingresar el valor del ozono coseta:"
read*,coseta
print*, "Ingresar el valor de zeta:"
read*,zeta
print*, "Ingresar el factor fc:"
read*,fc
g=0

do while(g==0)

b=0.40000E+00
i=0.28000E+00
sumal=0.0
j=1

a=0.005E+00

do while (i<b)
L=i
if (i<=0.298) then
print*, "i=",i
A2=ln(j)
A3=0.9003+0.00325*zeta-(9.04914*10**(-5))*zeta*zeta
A4=1

R1=exp(-0.008735*(ma*(L)**(-4.08)))
A1=exp(-beta*(ma*L**(-alfa)))
To(j)=exp((-1.0)*(Ao(j))*d*mo)
```



Salida del programa del código fuente de la ecuación 1.73 para estimar el IUV a las 11 am (tabla 10)

```
Ingresar el valor del ma:  
0.66298  
Ingresar el valor del mo:  
1.03374  
Ingresar el valor del ozono d:  
0.229  
Ingresar el valor del ozono beta:  
0.04  
Ingresar el valor del ozono alfa:  
0.88  
Ingresar el valor del ozono coqueta:  
0.9671  
Ingresar el valor de zeta:  
14.7211  
Ingresar el factor fc:  
0.615  
i= 2.800000E-01  
i= 2.850000E-01  
i= 2.900000E-01  
i= 2.950000E-01  
i= 3.000000E-01  
i= 3.050000E-01  
i= 3.100000E-01  
i= 3.150000E-01  
i= 3.200000E-01  
i= 3.250000E-01  
i= 3.300000E-01  
i= 3.349999E-01  
i= 3.449999E-01  
i= 3.499999E-01  
i= 3.549999E-01  
i= 3.599999E-01  
i= 3.649999E-01  
i= 3.699999E-01  
i= 3.749999E-01  
i= 3.799999E-01  
i= 3.849999E-01  
i= 3.899999E-01  
i= 3.949999E-01  
i= 3.999999E-01  
El valor del indice es 12.894660
```

Anexo 4. Registro de datos con cielo nublado del año 2018

7 de enero 2018 ( $R^2=0.965$ )

Tiempo	IUVmedido	IUV estimado	Tiempo	IUVmedido	IUV estimado
7.50	1.3	1.38186057	11.75	9.9	10.15004116
7.58	1.5	1.631833896	11.83	11.5	11.58828991
7.67	1.8	1.824253142	11.92	15.3	16.08859866
7.75	2	1.9514861	12.00	11.7	11.57356399
7.83	2.5	2.398109279	12.08	7.5	7.781782273
7.92	2.7	2.525832022	12.17	6.9	7.242812456
8.00	3.1	2.752546996	12.25	5.8	5.857647145
8.08	3.7	3.419548799	12.33	6.1	6.157366812
8.17	3.2	2.786066301	12.42	12.3	14.20837927
8.25	4.6	4.343288025	12.50	9.5	7.03458335
8.33	5.2	4.815291189	12.58	12	11.91339585
8.42	5.4	4.937041113	12.67	11.6	12.33818955
8.50	5.7	5.229901271	12.75	11.1	11.36208873
8.58	6.1	5.508875002	12.83	10.4	10.80917277
8.67	6.4	5.830706027	12.92	12	12.25998407
8.75	6.7	6.153911399	13.00	12.2	12.17307996
8.83	7.1	6.503763607	13.08	11.6	11.555253
8.92	7.5	6.872973705	13.17	11.6	11.54118138
9.00	8	7.275757745	13.25	11.8	11.61797324
9.08	8.4	7.743937351	13.33	11.1	10.98032937
9.17	8.9	8.17387845	13.42	10.3	10.31837886
9.25	9.4	8.621278465	13.50	10.1	10.00412654
9.33	7.8	6.296632492	13.58	9.9	9.893575218
9.42	6.7	5.668022149	13.67	8.9	8.949974579
9.50	8.8	7.210986503	13.75	8.2	8.597923412
9.58	9.4	8.043230826	13.83	8.3	8.435252858
9.67	11.2	10.28378773	13.92	7.9	8.000844953
9.75	11.6	10.62893821	14.00	7.6	7.789753381
9.83	11.8	10.62903958	14.08	7.4	7.717931575
9.92	12	10.90795907	14.17	7.7	8.073406941
10.00	12.3	11.22807732	14.25	6.9	7.507541288
10.08	12.7	11.53015096	14.33	5.3	5.922475562
10.17	12.9	11.85958895	14.42	5.3	6.069240185
10.25	13.4	12.34526711	14.50	3.3	3.241692605
10.33	13.6	12.59836141	14.58	2.9	2.903130826
10.42	13.8	12.88200083	14.67	2.7	2.747459909
10.50	13.9	13.37912403	14.75	2.5	2.631364308
10.58	13.7	13.59754498	14.83	2.4	2.591895915
10.67	8.9	4.835291018	14.92	2.3	2.575328508
10.75	5.2	5.021482485	15.00	2.3	2.540539122
10.83	7.3	7.278300354	15.08	2.2	2.429642714
10.92	8.4	9.69931555	15.17	2.2	2.3630084
11.00	5	5.791968041	15.25	2.1	2.279332586
11.08	5	5.793697274	15.33	2	2.158070691
11.17	5	5.768366554	15.42	1.8	2.010642903
11.25	4.9	5.705811598	15.50	1.7	1.890886904
11.33	11.1	12.05450901	15.58	1.5	1.752397408
11.42	15.1	15.09972511	15.67	1.4	1.604090374
11.50	9.2	8.872849999	15.75	1.3	1.503015637
11.58	10.7	10.01454064	15.83	1.2	1.396047933
11.67	6.8	7.061698722	15.92	1.1	1.274861808

11 de febrero del 2018 ( $R^2=0.963$ )

Tiempo	IUV medido	IUV estimado	Tiempo	IUV medido	IUV estimado
7.50	0.6	0.561187483	11.83	8.5	8.98219047
7.58	0.7	0.669321223	11.92	12.3	12.69404854
7.67	0.8	0.794715681	12.00	11.8	11.24366192
7.75	0.8	0.86615416	12.08	12.1	11.69315708
7.83	0.9	0.973317967	12.17	12	11.91955941
7.92	1.1	1.159481006	12.25	9.5	9.306858701
8.00	1.4	1.45691201	12.33	7.8	8.222761663
8.08	1.8	1.777288066	12.42	7.5	7.961918147
8.17	2.1	2.080206472	12.50	8.2	8.521609858
8.25	2.3	2.249248751	12.58	8.1	8.291247338
8.33	2.5	2.408831924	12.67	8.7	8.803004919
8.42	2.6	2.561150074	12.75	8.7	8.583669178
8.50	2.8	2.73124773	12.83	11.7	9.072104646
8.58	2.9	2.912150841	12.92	15.8	14.6362461
8.67	3.2	3.126857511	13.00	14.6	14.06278394
8.75	3.2	3.088505947	13.08	15	14.41266103
8.83	3.9	3.641496035	13.17	11.9	10.64804988
8.92	4.6	4.460239575	13.25	9.3	9.045698313
9.00	4.7	4.634404638	13.33	6.1	5.698044686
9.08	4.9	4.993931718	13.42	11.5	10.53452974
9.17	4.6	4.871500492	13.50	13.1	12.43507325
9.25	3.8	4.054997195	13.58	12.7	11.77737396
9.33	3.6	3.897399601	13.67	12.3	11.21445134
9.42	3.4	3.908383998	13.75	9.6	9.383206798
9.50	4.3	4.649994103	13.83	8.2	6.451942286
9.58	4.4	4.658069333	13.92	10.7	10.07149263
9.67	4.5	4.894462991	14.00	9.5	8.82666389
9.75	6.1	6.196927484	14.08	4.7	3.723620364
9.83	6.3	6.298557319	14.17	7.1	3.780649753
9.92	7.9	7.674865502	14.25	5	4.519258538
10.00	8.5	8.140329166	14.33	6.2	5.544635871
10.08	8	7.724693329	14.42	5.3	3.486075009
10.17	7.2	7.162318901	14.50	7.1	7.494374391
10.25	6.5	6.968649434	14.58	3.9	3.355339718
10.33	7.2	7.805383162	14.67	4.6	3.489978085
10.42	6.5	7.107691627	14.75	4.6	3.740433428
10.50	6	6.810838664	14.83	3.9	2.788252364
10.58	5.7	6.638130853	14.92	5.1	5.430411962
10.67	6.6	7.471172257	15.00	3.7	3.442981903
10.75	7.6	8.167271766	15.08	4.1	3.913813162
10.83	7.7	8.189453237	15.17	3.6	3.273235599
10.92	10.8	10.66378088	15.25	3.3	3.133088234
11.00	10.7	10.4594514	15.33	3.7	3.708101041
11.08	12.4	12.03660715	15.42	3.6	3.500889326
11.17	11.9	11.6844786	15.50	3.4	3.089541817
11.25	12.3	11.71299343	15.58	3.4	3.409874845
11.33	13.9	11.488415	15.67	3	2.089065694
11.42	14.4	11.12963892	15.75	3.4	3.261975879
11.50	14.5	13.71539453	15.83	3.1	2.944418366
11.58	11.3	10.85935988	15.92	2.8	2.652843564
11.67	13.9	11.08233408	16.00	2.3	2.167131323

20 marzo del 2018 ( $R^2=0.971$ )

Tiempo	IUV medido	IUV estimado	Tiempo	IUV medido	IUV estimado
7.50	1.1	0.820893548	11.83	13.9	13.7175782
7.58	1.3	1.01078557	11.92	10.2	7.79764927
7.67	1.4	1.241523093	12.00	6.7	6.2217492
7.75	1.6	1.362897998	12.08	12.3	12.0456747
7.83	1.7	1.490232898	12.17	12.1	11.0024744
7.92	1.8	1.595190105	12.25	9.8	9.11455407
8.00	2	1.786533876	12.33	9.5	8.74460336
8.08	2.4	2.190174811	12.42	10.1	9.34810426
8.17	2.9	2.538883508	12.50	9.8	9.16219088
8.25	3.1	2.711476191	12.58	10.9	10.0836966
8.33	3.1	2.64098088	12.67	12	11.0524226
8.42	3.9	3.489533338	12.75	12.5	11.3553701
8.50	4.5	3.888210477	12.83	12	10.9139809
8.58	4.6	4.409870369	12.92	11.4	10.3953812
8.67	3.6	3.518684614	13.00	11.2	10.2063558
8.75	4.6	4.463275539	13.08	11.1	10.1858525
8.83	4.3	3.222988949	13.17	10.8	9.94796999
8.92	4.7	3.57262061	13.25	9.5	8.84624193
9.00	3.6	3.496245585	13.33	8	7.47483387
9.08	3.8	3.600967751	13.42	7.2	6.99623376
9.17	7.5	6.938336472	13.50	7.2	7.07356217
9.25	5.2	3.581702041	13.58	7.4	7.18123381
9.33	4.5	3.968260492	13.67	6.7	6.55156462
9.42	9.6	8.659122462	13.75	6.6	6.41324765
9.50	9.8	8.488263878	13.83	6.4	6.19726939
9.58	9.7	8.629405345	13.92	6.2	5.87962723
9.67	5.6	3.953831071	14.00	6.2	5.92760067
9.75	8.1	7.332085617	14.08	6.2	5.87751919
9.83	8	7.435044623	14.17	5.9	5.61243979
9.92	9.1	6.152212859	14.25	5.9	5.54343093
10.00	12	10.60429666	14.33	5.8	5.37977138
10.08	9.7	7.483641309	14.42	5.6	5.26804597
10.17	4.9	4.743466293	14.50	5.7	5.31136434
10.25	4.7	4.691508251	14.58	5.3	4.9200955
10.33	4.3	4.81383471	14.67	4.9	4.44103928
10.42	6.5	6.291322812	14.75	4.3	3.82069948
10.50	6.6	6.365705843	14.83	3.7	3.36988448
10.58	6.1	5.886255228	14.92	3.5	3.13529298
10.67	5.5	5.56271553	15.00	3.2	2.9291627
10.75	6.6	6.461659398	15.08	3.2	2.83526946
10.83	7.5	6.364695801	15.17	3.5	3.22404474
10.92	10.9	9.930208047	15.25	3.6	3.2985907
11.00	9.9	8.085868361	15.33	3.5	3.15432804
11.08	5.5	5.771997275	15.42	3.4	3.00060139
11.17	5.6	6.038779897	15.50	3.3	2.8544992
11.25	5.7	5.948411221	15.58	3.1	2.68171806
11.33	7.1	6.720425256	15.67	3	2.52514078
11.42	12.8	12.81252097	15.75	2.8	2.38321696
11.50	13.7	13.24987456	15.83	2.6	2.20191317
11.58	9.7	9.013357532	15.92	2.3	1.86594732
11.67	7	8.522137864	16.00	1.8	1.41677371



27 de abril ( $R^2=0.910$ )

Tiempo	IUVmedido	IUV estimado	Tiempo	IUVmedido	IUV estimado
7.50	1.2	1.0339074	11.83	7.6	5.6538837
7.58	1.3	1.1810347	11.92	4	2.6890123
7.67	1.5	1.3402255	12.00	4	2.7323841
7.75	1.7	1.475514	12.08	8.1	7.58266
7.83	1.8	1.6008262	12.17	5.7	5.9310116
7.92	2	1.7457614	12.25	4.1	2.5385299
8.00	2.2	1.9073979	12.33	7.8	7.3733782
8.08	2.4	2.1049234	12.42	9.8	9.0792829
8.17	2.6	2.3113846	12.50	7.4	8.2585011
8.25	2.8	2.4951118	12.58	5.6	3.0431076
8.33	3.1	2.6965113	12.67	4.9	3.2051859
8.42	3.4	2.9412121	12.75	7	5.5201914
8.50	3.7	3.1670879	12.83	8	7.6749983
8.58	4	3.3730005	12.92	4.4	2.7675622
8.67	3.9	3.6004094	13.00	6.9	7.6829911
8.75	2.8	1.3814253	13.08	6.9	5.7490931
8.83	3	1.3918945	13.17	8.1	7.3224391
8.92	4.8	4.4092881	13.25	8.1	7.3370053
9.00	4.7	4.496268	13.33	7.2	6.7348991
9.08	3.9	3.0681455	13.42	8	7.0216254
9.17	5.2	4.5535406	13.50	7.4	6.5165764
9.25	5	2.6648386	13.58	5.6	4.9554544
9.33	4.5	2.925999	13.67	5.1	4.2243033
9.42	6.4	5.912971	13.75	5.9	5.1870728
9.50	5.6	5.2810114	13.83	5.5	4.8153442
9.58	6.8	6.261475	13.92	5.4	4.7198793
9.67	7.1	6.348032	14.00	5.4	4.7189826
9.75	7.6	6.7058591	14.08	6.1	5.2853315
9.83	4.7	5.5513835	14.17	6.2	5.2818887
9.92	8	7.1517903	14.25	5.5	4.7153178
10.00	8.3	7.4476319	14.33	5.3	4.5160527
10.08	8.6	7.6050407	14.42	4.6	3.9157055
10.17	8.8	7.7741852	14.50	3.8	3.172553
10.25	9.2	7.9882503	14.58	3.1	2.5312235
10.33	8.9	8.1608563	14.67	2.5	1.9242098
10.42	8.7	8.3052458	14.75	2.6	2.2223255
10.50	4.2	2.0124737	14.83	2.6	2.172854
10.58	5	4.9730554	14.92	2.5	2.0018349
10.67	4.3	2.6841018	15.00	2.7	2.2514112
10.75	4.6	3.3248213	15.08	2.9	2.4342814
10.83	4.2	2.8998909	15.17	3	2.429742
10.92	7.6	8.0192537	15.25	2.6	2.1126396
11.00	10.2	9.6830483	15.33	2.4	1.9960717
11.08	5.5	3.0204533	15.42	2.1	1.6968747
11.17	5.1	2.5300333	15.50	1.9	1.5806952
11.25	4.9	2.9530868	15.58	1.5	1.1148316
11.33	6.6	3.4203651	15.67	1	0.5746504
11.42	8.6	9.9374312	15.75	0.9	0.5235351
11.50	3.9	2.3067382	15.83	0.8	0.5084726
11.58	4.2	2.8521655	15.92	0.7	0.52633
11.67	4.1	2.5535326	16.00	0.7	0.4771031



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo MATÍAS HUILLCA ARDIETO  
identificado con DNI 06157310 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA, MENCIÓN: INGENIERÍA AMBIENTAL  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" ESTIMACION DEL INDICE DE RADIACION SOLAR  
ULTRAVIOLETA EN LA CIUDAD DE PUNO

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mio; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 03 de NOVIEMBRE del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo MATÍAS HUILLCA ARDIETO  
identificado con DNI 06157310 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA, MENCIÓN: INGENIERÍA AMBIENTAL  
informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" ESTIMACION DEL INDICE DE RADIACION SOLAR  
ULTRAVIOLETA EN LA CIUDAD DE PUNO

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mio; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 03 de NOVIEMBRE del 20 23

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo MATÍAS HUILLCA ARBIETO  
identificado con DNI 06157310 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

SCIENCIAS DE LA INGENIERIA AGRICOLA; MENCION INGENIERIA AMBIENTAL

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

" ESTIMACION DEL INDICE DE RADIACION SOLAR  
ULTRAVIOLETA EN LA CIUDAD DE PUNO

Es un tema original.


Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 03 de NOVIEMBRE del 20 23

  
FIRMA (obligatoria)



Huella