ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL EN LA CIUDAD DE PUNO MEDIANTE LA APLICACION DEL MODELO BRISTOW Y CAMPBELL

ESTIMATION OF GLOBAL SOLAR RADIATION IN THE CITY OF PUNO THROUGH THE APPLICATION OF THE MODEL BRISTOW AND CAMPBELL

Lelia Quispe Huamán [1], lilians_1431h@hotmail.com

Matias Huillca Arbieto [2], mhuillca@gmail.com

[1] Universidad Nacional de Juliaca Puno Perú.

[2] Universidad Nacional del Altiplano Puno Perú.

[3] Guina Sotomayor Alzamora[3], guinas@gmail.com

[3] Instituto de Matemática y Ciencias Afines (IMCA), Universidad Nacional de Ingeniería.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo estimar la radiación solar global con el modelo Bristow y Campbell, considerando las temperaturas máximas y mínimas diarias desde setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Universidad Nacional del Altiplano, en las coordenadas geográficas latitud -15.83°, longitud -70.03° y altitud 3827 msnm. El análisis de resultados de las radiaciones solares globales estimadas y medidas muestra un buen desempeño, siendo la correlación anual de 0.99, mientras que en la transmitancia atmosférica fue mayor a 0.5. Los valores máximos y mínimos obtenidos correspondieron a los meses de noviembre del 2015 con $6.9782\ KWh/m^2$ y julio del 2016 con $4.8981\ KWh/m^2$ respectivamente, el promedio anual fue de $5.8988\ KWh/m^2$. Los resultados muestran que la aplicación del modelo, resulta de gran utilidad para la obtención de radiación solar global en la ciudad de Puno y son muy rentables para las aplicaciones de la energías renovables, según la Organización Latinoamericana de Energía. Sin embargo, la exposición de radiación solar a niveles altos, tiene efectos perjudiciales sobre la mayoría de seres vivos, así mismo altera los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Palabras claves: Radiación Solar Global, temperatura máxima y mínima, Bristow y Campbell, transmitancia atmosférica máxima.

ABSTRACT

The objective of this work is to estimate the global solar radiation using the Bristow and Campbell model, using daily maximum and minimum temperature data from September 2015 to August 2016, this data was recorded by a meteorological station located at the Universidad Nacional del Altiplano, at the geographical coordinates: -15.83° latitude, -70.03° longitude and 3827 meters over the sea. In the analysis of estimated and measured global solar radiation, a good performance was observed, with an annual correlation of 0.99, while the atmospheric transmittance was higher than 0.5; the values obtained were maximum for November 2015 with $6.9782\ KWh/m^2$ and minimum for July 2016 with $4.8981\ KWh/m^2$, the annual average was $5.8988\ KWh/m^2$. The results demonstrated that the application of the model is very useful for obtaining global solar radiation in Puno city and are very profitable for renewable energy applications, according to the Latin American Energy organization.

Keywords: Global Solar Radiation, maximum and minimum temperature, Bristow and Campbell, maximum atmospheric transmittance.

1. INTRODUCCION

La radiación solar se define como la radiación electromagnética que llega a la tierra desde el sol, siendo extremadamente esencial para la vida (Querino, Moura, & Lyra, 2006); también, es la principal fuente de energía renovable que soporta la biosfera y estimula los procesos físicos, químicos y biológicos en la tierra. La energía recibida por el sistema tierra-atmosfera es también crucial para equilibrar la energía (Manzano, Martin, Valero, & Armenta, 2015), siendo elemento primordial para el proceso de la fotosíntesis, además de otros procesos ecológicos y ambientales relacionados a la temperatura del aire y suelo, afectando la trasferencia de calor por medio de la evaporación y transpiración (Silva, Silva, Finzi, & Dias, 2012). El funcionamiento de todos los ecosistemas terrestres y marinos está sustentado en la fijación fotosintética de la energía solar. La cadena de transformaciones biológicas de la energía esencia de todos los procesos vitales, comienza con la captación de la radiación solar por parte de los pigmentos fotosintéticos y almacenamiento de ella en enlaces químicos. La producción de biomasa vegetal no es más que una expresión de esta forma de acumulación de energía, lo cual provee al hombre de alimentos, materias primas y combustibles (Castillo H., 1981). Pero, no toda la radiación solar consigue efectivamente ingresar a la superficie terrestre, esto se debe a que interactúa con componentes atmosféricos al atravesar la masa óptica y sufre la acción de procesos de reflexión, dispersión y absorción. Así, el 51% de la radiación extraterrestre está disponible para procesos en medios físicos y biológicos, siendo la fracción que efectivamente llega a la superficie terrestre denominada radiación solar global (Beruski , Pereira, & Sentelhas, 2015). La radiación solar se divide en radiación solar directa y radiación solar difusa, la primera es la energía que llega a la tierra directamente sufriendo alteración en el camino por la diferencia de densidad en la atmosfera, y la segunda es toda radiación dispersada por la atmosfera debido a la presencia de diversas partículas (Da Silva, Santos, Marqes, Da Silva, Gomes, & Sacardi , 2014); el preciso conocimiento de la radiación solar se considera como primer paso para la evaluación de su disponibilidad y sirve para diferentes aplicaciones, como en áreas de la meteorología, climatología, hidrología, modelos de simulación de cultivos y estimación de evapotranspiración (Hassan , Youssef, Mohamed, & Ali, 2016), (Quej, Almorox, Ibrakhimov , & Saito, 2016), y también para la predicción de eficiencia de la energía solar fotovoltaica y térmica se necesitan datos de radiación solar global, así mismo para la ganancia de calor en edificios (Yao , Li , Wang, Jiang, & Hu , 2014). Cuando la radiación solar global no es disponible, se puede estimar con fórmulas empíricas, dependiendo de otras variables meteorológicas (Dumas, y otros, 2015); algunos investigadores han desarrollado modelos empíricos que utilizan la temperatura del aire para estimar la radiación solar global, como los modelos Hargreaves y Bristow y Campbell (Oliveira, Augusto, Finzi, & Da Silva, 2014). Según (Li, Lou, & Lam, 2015) los modelos empíricos para calcular la radiación solar se encuentran basados en los siguientes factores: Astronómicos (constante solar, distancia tierra-sol, declinación y ángulo de la hora), geográficos (latitud, longitud y elevación de la sitio), geométricos (ángulo acimutal de la superficie, ángulo de inclinación, ángulo de elevación del sol, ángulo de acimut del sol), físicos (dispersión de moléculas de aire, contenido de vapor de agua, dispersión de polvo de los constituyentes atmosféricos tales como O_2, N_2, CO_2,

O; etc.), meteorológicos (radiación solar extraterrestre, duración de la luz del sol, temperatura, precipitación, humedad relativa, Efectos de nubosidad, temperatura del suelo, evaporación, reflexión, etc.).

De la Física Atmosférica se sabe que a medida que aumente la altura, la atmosfera se hace más tenue, por lo que el valor de la radiación solar debe ser mayor que en sitios menos altos (Iqbal, 1984).

2. MATERIAL Y METODO

En la estimación de la radiación solar global se utilizaron datos de temperatura máxima y mínima diaria, medidos por la estación meteorológica marca Davis Instrument, modelo VANTAGE PRO 2 PLUS de la Escuela Profesional de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Nacional del Altiplano, tiene el mantenimiento y la calibración certificada por el fabricante. Estos datos fueron medidos cada 15 minutos durante el día, desde setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, almacenados en la base de datos del software weatherlink obteniéndose 35136 datos en total.

2.1. MODELO BRISTOW Y CAMPBELL

Se considera el modelo Bristow y Campbell, que explica la relación entre la diferencia de las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire con calor sensible y calor latente. El calor latente depende de la radiación solar diaria y es el responsable de la temperaturas máximas del aire; además, el calor sensible al anochecer debido a la inercia térmica gradualmente se pierde en el espacio como radiación de onda larga y otros flujos radiantes, resultando en el decrecimiento de la temperatura hasta alcanzar su temperatura mínima justo antes del amanecer (Baigorria, Villegas, Trebejo, Carlos , & Quiroz, 2004).

Cuando la radiación solar llega a la superficie de la tierra, una parte se refleja y el otro es absorbido. Por otra parte el suelo se calienta, emite radiación de onda larga que hace que caliente el aire adyacente, contribuyendo a cambiar su temperatura. En base a este argumento Bristow y Campbell sugirieron un modelo físico empírico para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas máximas y mínimas (Queiroz, Nogueira, & De Assis, 2000), como se muestra en la Ecuación (1).

$$\frac{R_g}{R_e} = A\left[1 - e^{-B(T_{max} - T_{min})^C}\right] \qquad (1)$$

Donde:

R_g: Radiación solar global $\left[KWh/m^2\right]$

R_e: Radiación solar extraterrestre $\left[KWh/m^2\right]$

T_{max}: Temperatura máxima $\left[°C\right]$

T_{min}: Temperatura mínima $\left[°C\right]$

A: Transmitancia atmosférica máxima.

B: Constante especifica de la región (Depende de C)

C: Constante especifica de la región (Depende de la amplitud térmica y latitud)

Donde A, B y C son constantes empíricas, con significado físico. El coeficiente A representa la transmitancia atmosférica máxima, que es característica del área de estudio, y depende de la contaminación y elevación de la

zona. Los coeficientes $B(°C^{-1})$ y C determinan el efecto del incremento en la amplitud térmica ΔT en los máximos valores de transmitancia atmosférica (K_t) (Mesa & Varas, 2000).

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciados por la topografía, latitud y altitud, y entre otros factores, los coeficientes B y C propuestos pueden ser aplicados solo en áreas bajo similares condiciones de régimen térmico. Se desarrollaron las ecuaciones empíricas (2) y (3) para determinar el valor de los coeficientes (Camayo, Paucar, Massipe, & Quispe, 2013).

$$C=2.116-0.072(T_{max}-T_{min})+57.574e^{\varphi} \quad (2)$$

Donde:

φ : Latitud

$$B=0.107C^{-2.6485} \quad (3)$$

Se ha utilizado el modelo Bristow y Campbell para numerosos estudios y se han encontrado mejoras en la radiación solar global; también en la simplicidad de datos (Almorox, Bocco , & Willington , 2013).

Inicialmente este modelo fue empleado en las localidades de Pullman, Great Falls y Tacoma de los Estados Unidos, en donde se mostró que su desempeño del modelo fue capaz de explicar entre un 70% y 90% de la variación de la radiación solar. En el modelo se empleó la amplitud térmica ΔT durante el día. De acuerdo a los estudios, los valores para los coeficientes A, B y C son 0.7; entre 0.004 y 0.010; y 2.4 respectivamente (Bristow & Campbell, 1984).

Cabe resaltar que este método es originalmente para estimaciones diarias, también se puede probar para cálculos y aplicaciones mensuales (Bandyopaddhyay , Raghuwansshi , Bhadra, & Sinh, 2008).

2.2. FACTORES ASTRONOMICOS

Los factores astronómicos fundamentales para la estimación de la radiación solar global son: latitud $\varphi = -15.83°$.

El aporte correspondiente del factor de corrección (E_0) mostrada en la Ecuación (5), considera las perturbaciones producidas por la rotación de la tierra (Iqbal, 1984).

$$E_0 = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (5)$$

Donde:

d_n : Día juliano.

La declinación solar (δ) corresponde a la posición angular del sol al mediodía solar respecto al plano de la ecuación, positivo hacia el norte (Recalde, Cisneros, Vaca, & Ramos, 2015), y se puede calcular mediante la ecuación (6).

$$\delta = 0.409.sen\left[\frac{2\pi d_n}{365} - 1.39\right] \quad (6)$$

El ángulo horario (ω) mostrada en la ecuación (7) representa el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra (Recalde, Cisneros, Vaca, & Ramos, 2015).

$$\omega = \cos^{-1}\left(-tg\phi tg\delta\right) \quad (7)$$

2.3. RADIACION EXTRATERRESTRE

Para comprender el comportamiento de la radiación solar extraterrestre (R_e) se debe considerar que el sol es una estrella variable debido a fenómenos como las manchas y fáculas solares, presentes principalmente en las zonas de convección, superficie y atmosfera, provocando que el sol emita radiación variable a lo largo del año (Recalde, Cisneros, Vaca, & Ramos, 2015). Se conoce que estas variaciones son menores a $\pm 1.5\%$; sin embargo, la distancia tierra sol varia un 6.7% a lo largo del año (Gray, y otros, 2010)

El cálculo de la radiación solar extraterrestre mostrada en la ecuación (4) es indispensable para determinar la radiación solar global diaria con cualquier modelo que se desee emplear, necesariamente para poder estimar se requiere conocer el valor de la constante solar.

$$R_e = \frac{24(60)}{\pi} E_0 I_{cs} \left(\omega sen\varphi sen\delta + \cos\varphi \cos\delta sen\omega\right) \quad (4)$$

Dónde:

I_{cs} = Constante solar $0.082\left[MJm^{-2}dia^{-1}\right]$

2.4. TRANSMITANCIA ATMOSFERICA (K_t)

La diferencia entre la temperatura máxima y mínima está relacionado al grado de cobertura de nube en una localización. El cielo claro condiciona el resultado de temperaturas altas durante el día T_{max} por que la atmosfera es transparente y en bajas temperaturas durante la noche T_{min} por que la radiación de onda larga es menos absorbida por la atmosfera (Nogueira, Silva, Lêdo, & Araujo, 2012).

Iqbal (1983) postulo ciertos limites para definir los tipos de dias basados en (K_t).

Tabla 1: escala de Iqbal donde se define el tipo de día basado en k_t

Transmitancia atmosférica	Tipo de día
$K_t \geq 0.6$	Días claros
$0.3 < K_t < 0.6$	Días parcialmente nublados
$K_t \leq 0.3$	Días nublados

Fuente: (Iqbal, 1984)

Aunque esta división es arbitraria puede ser considerada para definir el tipo de día según el estado de la atmosfera (Rodriguez, Hernandez, & Simbaqueva, 2015).

La distribución de la radiación solar, transmitancia atmosférica y el conocimiento del tipo de cobertura del cielo son de suma importancia para áreas urbanas y rurales, pues influencias en diversos procesos termodinámicos (Gomes, Alves , Alves, & Chiletto , 2009).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. APLICACION DEL MODELO A VALORES DIARIOS.

El modelo físico empírico está definido para valores diarios. Como la ciudad de Puno está sujeta a alteraciones constantes de las temperaturas máximas y mínimas por tal motivo se dan los días atípicos, también por la presencia del Lago Titicaca como efecto termorregulador hace que las temperaturas no sean muy bajas; además, la radiación solar global son altas mayores a $4KWh/m^2$ durante el año, consideradas muy rentables en las aplicaciones de energías renovables. También, son perjudiciales no solo para la población, sino también para los ecosistemas terrestres, acuáticos; siendo necesario informar oportunamente a la población.

La hoja de cálculo se realizó en Microsoft Excel para cada día de los meses del 2015 y 2016. El respectivo cálculo se muestra en la siguiente TABLA 2, como ejemplo para el mes de julio del 2016.

tabla 2: radiación solar global diaria estimada y medida, amplitud térmica y transmitancia atmosférica máxima del mes de julio del 2016.

FECHA	A (Cte)	Dia juliano d_n	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]	Factor de correccion E_0	Declinacion δ	Angulo horario ω	Radiacion extraterrestre (MJ/m^2)	C (cte)	B (cte)	Radiacion solar global estimada $R_g(KWh/m^2)$	Radiacion solar global medida $R_g(KWh/m^2)$	Amplitud termica $\Delta T[°C]$
01-jul	0.932	183	14.3	2.6	0.9670	0.4017	1.4501	26.3289	1.2736	0.0564	4.9458	4.9473	11.7
02-jul	0.831	184	13.6	2.1	0.9670	0.4003	1.4505	26.3663	1.2880	0.0547	4.3803	4.3797	11.5
03-jul	0.780	185	15.1	1.8	0.9670	0.3988	1.4510	26.4071	1.1584	0.0725	4.3828	4.3823	13.3
04-jul	0.547	186	15.0	1.8	0.9671	0.3972	1.4516	26.4512	1.1656	0.0713	3.0697	3.0683	13.2
05-jul	0.909	187	16.2	1.9	0.9671	0.3954	1.4522	26.4987	1.0864	0.0859	5.2652	5.2645	14.3
06-jul	0.765	188	13.8	0.1	0.9671	0.3936	1.4528	26.5495	1.1296	0.0775	4.3706	4.3710	13.7
07-jul	0.931	189	6.1	2.3	0.9672	0.3916	1.4534	26.6036	1.8424	0.0212	1.5119	1.5143	3.8
08-jul	0.726	190	15.5	2.8	0.9673	0.3895	1.4541	26.6609	1.2016	0.0658	4.0437	4.0418	12.7
09-jul	0.899	191	14.1	1.3	0.9674	0.3873	1.4549	26.7215	1.1944	0.0668	5.0347	5.0337	12.8
10-jul	0.904	192	15.7	1.1	0.9674	0.3850	1.4556	26.7853	1.0648	0.0906	5.3322	5.3310	14.6
11-jul	0.956	193	13.9	1.3	0.9675	0.3826	1.4565	26.8523	1.2088	0.0648	5.3455	5.3463	12.6
12-jul	0.922	194	14.3	0.3	0.9676	0.3800	1.4573	26.9224	1.1080	0.0815	5.3844	5.3880	14.0
13-jul	0.895	195	15.3	1.2	0.9678	0.3774	1.4582	26.9956	1.1008	0.0830	5.2545	5.2580	14.1
14-jul	0.901	196	15.8	1.6	0.9679	0.3746	1.4591	27.0718	1.0936	0.0844	5.3182	5.3157	14.2
15-jul	0.857	197	17.6	1.6	0.9680	0.3717	1.4600	27.1510	0.9640	0.1179	5.2914	5.2943	16.0
16-jul	0.908	198	15.4	1.6	0.9682	0.3687	1.4610	27.2332	1.1224	0.0788	5.3355	5.3397	13.8
17-jul	0.767	199	14.8	4.2	0.9683	0.3656	1.4620	27.3183	1.3528	0.0481	4.0171	4.0190	10.6
18-jul	0.910	200	15.1	3.7	0.9685	0.3624	1.4631	27.4063	1.2952	0.0539	4.9649	4.9645	11.4
19-jul	0.751	201	14.7	3.8	0.9687	0.3591	1.4642	27.4971	1.3312	0.0502	4.0188	4.0190	10.9
20-jul	0.944	202	14.4	3.3	0.9688	0.3557	1.4653	27.5906	1.3168	0.0516	5.1167	5.1165	11.1
21-jul	0.927	203	14.5	2.9	0.9690	0.3521	1.4664	27.6869	1.2808	0.0556	5.1522	5.1522	11.6
22-jul	0.969	204	14.4	3.1	0.9692	0.3485	1.4676	27.7859	1.3024	0.0531	5.3369	5.3373	11.3
23-jul	0.914	205	14.5	1.9	0.9694	0.3448	1.4688	27.8875	1.2088	0.0648	5.3077	5.3078	12.6
24-jul	0.878	206	15.9	2.0	0.9697	0.3409	1.4700	27.9916	1.1152	0.0802	5.3171	5.3148	13.9
25-jul	0.918	207	15.2	2.1	0.9699	0.3370	1.4713	28.0983	1.1728	0.0702	5.4563	5.4593	13.1
26-jul	0.902	208	14.7	0.4	0.9701	0.3329	1.4726	28.2074	1.0864	0.0859	5.5615	5.5653	14.3
27-jul	0.875	209	14.7	2.1	0.9704	0.3288	1.4739	28.3188	1.2088	0.0648	5.1598	5.1580	12.6
28-jul	0.901	210	15.8	2.4	0.9706	0.3246	1.4753	28.4326	1.1512	0.0737	5.4668	5.4635	13.4
29-jul	0.908	211	15.7	2.5	0.9709	0.3202	1.4766	28.5487	1.1656	0.0713	5.4997	5.4987	13.2
30-jul	0.881	212	15.3	0.6	0.9712	0.3158	1.4780	28.6669	1.0576	0.0922	5.5750	5.5775	14.7
31-jul	0.865	213	15.5	-0.2	0.9714	0.3113	1.4794	28.7873	0.9856	0.1112	5.6250	5.6208	15.7
	0.870	Promedio									4.8981	4.8984	

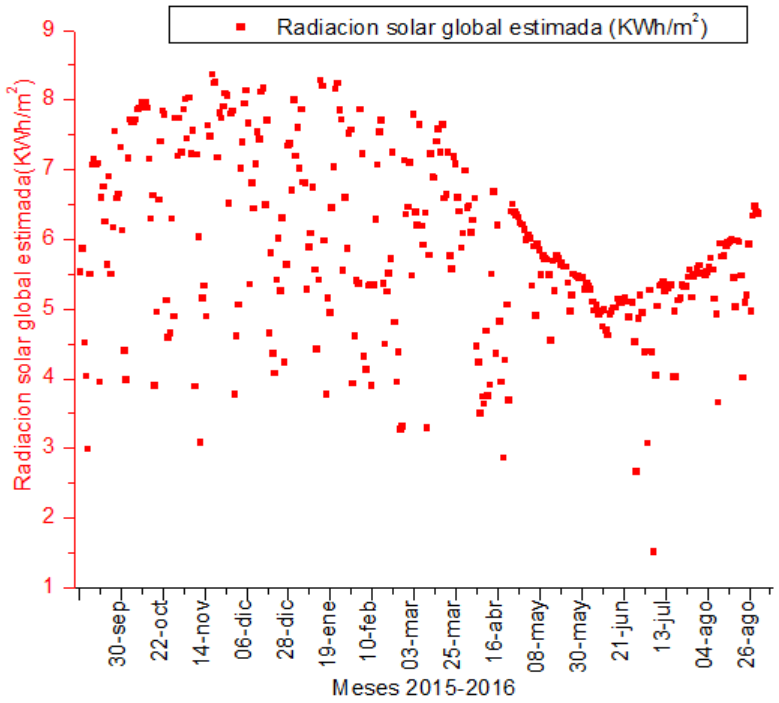
Para la obtención de la radiación solar global probamos distintos valores de transmitancia atmosférica al modelo hasta que la radiación solar global diaria estimada y medida tenga un buen desempeño.

Según la TABLA 2, para el mes de julio del 2016 se observa que la radiación solar global son mayores a $4 KWh/m^2$, excepto los días 04 y 07 de julio del 2016, lo cual indica que es rentable en las aplicaciones de las energía renovables, además la transmitancia atmosférica máxima son mayores a 0.6 lo que indica que en dicho mes los días fueron de cielo despejado, según la TABLA 1, indicada por Muhammad Iqbal (1983).

La ciudad de Puno debe tener una visión clara al momento de planificar su desarrollo sostenible con energía limpia, segura y económica como es la energía solar.

A continuación se muestra en la FIGURA 1, el comportamiento diario de la Radiación solar global estimada durante el 2015 y 2016 en la ciudad de Puno.

Figura 1: radiación solar global estimada diaria 2015-2016.

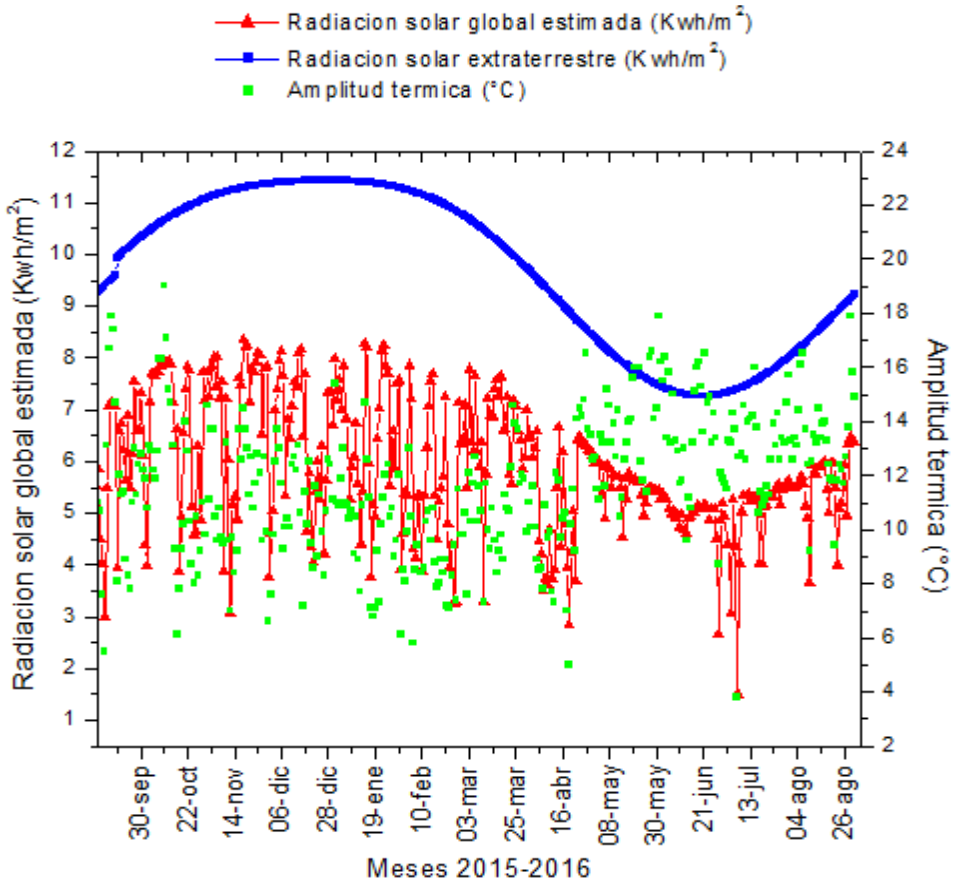


Con los resultados obtenidos se puede cuantificar la disponibilidad de energía solar, para obtener calor y electricidad mediante el uso de colectores solares térmicos (panel solar térmico, concentradores parabólicos, captadores solares de tubo de vacío, etc.), módulos fotovoltaicos y termas solares.

Según la FIGURA 1, también se dieron los días atípicos los días 07 de julio del 2016 con un valor de $1.5119 KWh/m^2$ de radiación solar global, debido a las bajas temperaturas registradas, tales como la temperatura máxima de 6.1°C y temperatura mínima de 2.3°C y de amplitud térmica ΔT de 3.8°C que es muy baja a diferencia de los datos de los demás días del año. Los días atípicos también se dieron el 28 de junio del 2016 con un valor de $2.6551 KWh/m^2$ y el 05 de setiembre del 2015 con un valor de $2.9850 KWh/m^2$.

A continuación se muestra el comportamiento correspondiente de la radiación solar global estimada, radiación solar extraterrestre y la amplitud térmica diarios durante los meses del 2015 y 2016. Como se puede observar el comportamiento entre todas las variables están relacionadas, tal como se aprecia en la FIGURA 2.

Figura 2: Radiación solar global, radiación solar extraterrestre y amplitud térmica diarias 2015-2016.

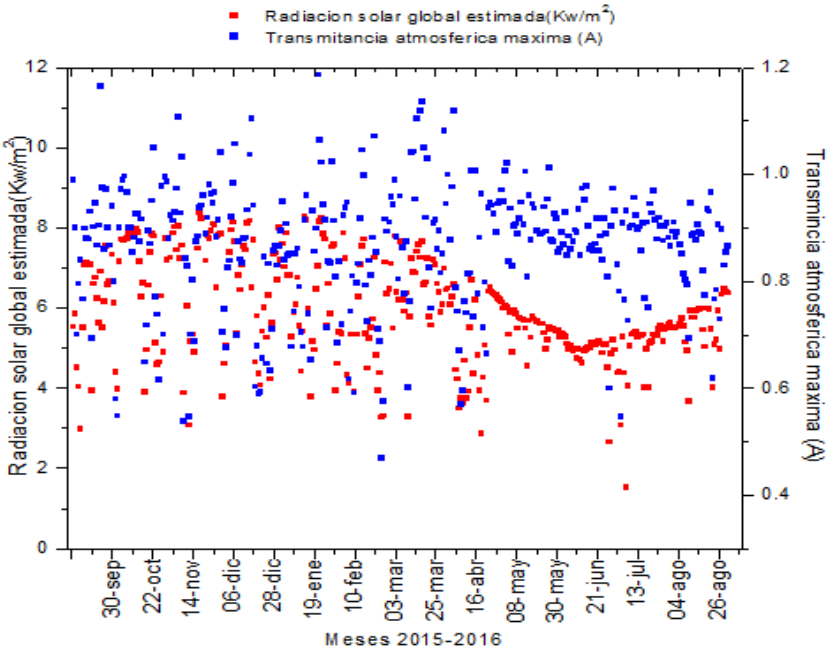


La FIGURA 2, muestra el comportamiento proporcional entre la Radiación solar global y la amplitud térmica, mientras más corta la amplitud térmica, entonces la radiación solar global es más alta y mientras más amplia la amplitud térmica, entonces la radiación solar global es más baja debido al calentamiento o enfriamiento de la superficie.

También, la radiación solar global estimada y la radiación solar extraterrestre tienen similares comportamiento, además se puede observar la radiación solar global es menor a diferencia de la radiación extraterrestre debido a que la energía procedente del sol atraviesa la atmosfera hasta llegar a la superficie terrestre, sufriendo una variación en su señal espectral debido a fenómenos atmosféricos como la absorción y dispersión por el ozono, aerosoles, nubes, masa óptica, CO_2, etc. Otra observación importante es que la radiación solar global tiene un comportamiento disperso en el verano, mientras que en el invierno su comportamiento es más estable.

En este estudio se consideró que la incidencia de la radiación solar no es muy afectada por fenómenos atmosféricos debido a las características ambientales de la localidad; es decir, la ciudad de Puno tiene como principal actividad el turismo y actividad económica con pequeñas industrias, con un bajo efecto de polvo, material particulado y nubes; por lo que se tiene una atmosfera relativamente limpia durante el año.

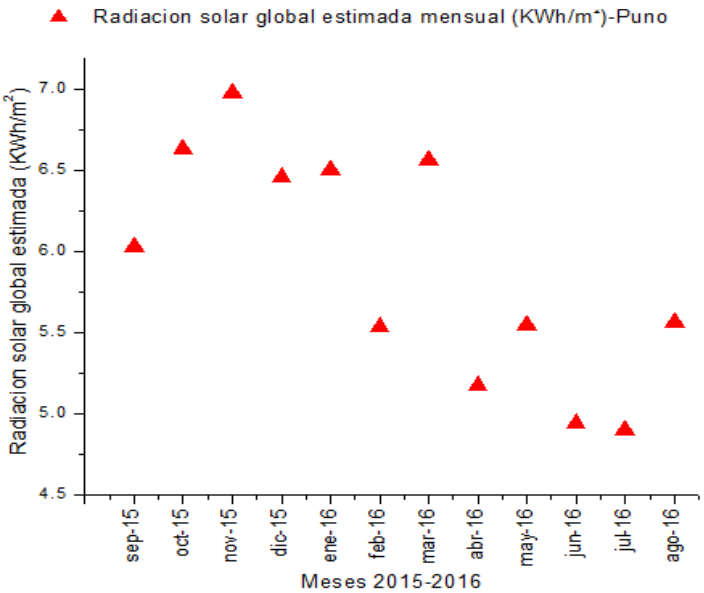
Figura 3: Transmitancia atmosférica máxima y radiación solar global diaria 2015-2016.



En la FIGURA 3, se muestra el comportamiento diario de la Transmitancia Atmosférica máxima durante el periodo de estudio. Los promedios mensuales obtenidos de transmitancia atmosférica máxima para los meses setiembre, octubre, noviembre, diciembre del 2015 y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto del 2016 son 0.889, 0.875, 0.881, 0.815, 0.864, 0.811, 0.932, 0.850, 0.915, 0.881, 0.870 y 0.850 respectivamente.

Además, se puede observar los valores de transmitancia atmosférica en su mayoría fueron mayores de 0.6, el cual indica que la mayoría de los días de los meses entre 2015 y 2016 fueron de cielo despejado, según la TABLA 1 lo cual indica Muhammad Iqbal (1983)

Figura 4: Radiación solar global estimada promedio mensual 2015 y 2016



En la FIGURA 4, se muestra el comportamiento mensual de la Radiación solar global durante el año 2015 y 2016. Los promedios mensuales de radiación solar global estimada para los meses setiembre, octubre, noviembre, diciembre del 2015 y enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto del 2016 son $6.0278\,\mathrm{KWh/m^2}$, $6.6278\,\mathrm{KWh/m^2}$, $6.9782\,\mathrm{KWh/m^2}$, $6.4526\,\mathrm{KWh/m^2}$, $6.4988\,\mathrm{KWh/m^2}$, $5.5375\,\mathrm{KWh/m^2}$, $6.5619\,\mathrm{KWh/m^2}$, $5.1725\,\mathrm{KWh/m^2}$, $5.5437\,\mathrm{KWh/m^2}$, $4.9407\,\mathrm{KWh/m^2}$, $4.8981\,\mathrm{KWh/m^2}$ y $5.5644\,\mathrm{KWh/m^2}$ respectivamente.

Se observa lo siguiente, la radiación solar global máxima se obtuvo en el mes de noviembre del 2015 un valor máximo de $6.9782 KWh/m^2$ y un valor mínimo de $4.8981 KWh/m^2$ que se obtuvo en el mes de julio del 2016. Como era de esperarse para el mes de noviembre ya que la tierra se aproxima al sol; es decir, está por ocurrir el fenómeno llamado perihelio la distancia más corta entre la tierra y sol. De forma similar para el mes de julio que ya ocurrió el fenómeno afelio ya que la tierra se aleja del sol.

4. CONCLUSIONES

El modelo empírico Bristow y Campbell permite estimar la radiación solar global diaria en la ciudad de Puno; con las mediciones de las temperaturas máximas y mínimas, se ha notado un buen desempeño siendo la correlación 0.99.

En el proceso de comparación del modelo con las mediciones se estimó las transmitancia atmosféricas obteniéndose un valor máximo promedio de 0.915 para el mes de marzo del 2016 y un mínimo promedio de 0.811 para el mes de febrero del 2016, tales resultados indican que la mayoría de los días fueron de cielo parcialmente despejado.

Los datos obtenidos de transmitancia atmosférica máxima de los años 2015 y 2016, se podrán aplicar para estimar la radiación solar global de años anteriores, esto para reconstruir la evolución temporal de la radiación solar global en la ciudad de Puno.

Se ha realizado mediciones de radiación solar global, en el periodo de setiembre del 2015 hasta agosto del 2016, obteniéndose un máximo valor promedio de $6.9782 KWh/m^2$ para el mes de noviembre del 2015 y un mínimo valor promedio de $4.8981 KWh/m^2$ para el mes de (Camayo, Paucar, Massipe, & Quispe, 2013) (Castillo H., 1981)julio del 2016; esto debido al cambio estacional.

Al tener la ciudad de Puno un potencial de radiación solar global promedio anual de $5.8988 KWh/m^2$, se considera muy rentable por la Organización latinoamericana de energía (OLADE). Los resultados obtenidos en este trabajo permitirán el desarrollo de energías renovables para el desarrollo de nuevas tecnologías como el uso de colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y otros, así mismo alertar e informar a la población lo nocivo de la radiación solar para los ecosistemas terrestres y acuáticos.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

Almorox, J., Bocco , M., & Willington , E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperaturas at cañada luque, Cordova, Argentina. *Renewable Energy* , 60, 382-387.

Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos , J. F., & Quiroz, R. (2004). Atmospheric transmissivity: distribution and empirical estimation around the Central Andes. *International journal of climatology*, 26, 1121-1136.

Bandyopaddhyay , A., Raghuwansshi , N. S., Bhadra, A., & Sinh, R. (2008). Estimation of monthly solar radiation from measured air temperatura extreme. *Agricultural and forest meteorology*, 148, 1707-1718.

Beruski , G. C., Pereira, A. B., & Sentelhas, P. C. (2015). Desempenho de diferentes modelos de estimativa da radiação solar global em Ponta Grossa, PR. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol: 30, n.2, 205-213.

Bristow, K., & Campbell, G. (1984). On The Relationship between incoming solar radiation and daily maximun and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, n31, 159-166.

Camayo, B. F., Paucar, E. P., Massipe, J. R., & Quispe, M. O. (2013). Validación y aplicación del Modelo Bristow y Campbell para estimar la Radiación Solar Global de la región Junín. *Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Junín.*, XX SPES,Tacna-Peru.

Castillo H., S. F. (1981). Evaluacion de la radiacion solar global y luminosidad en Chile. Calibracion de formulas para estimar radiacion solar global diaria. . *Agricultura tecnica Chile*, 41(3), 145-152.

Da Silva, D. A., Santos, C. A., Marqes, V. V., Da Silva, J., Gomes, N., & Sacardi , M. (2014). Verificação da turbidez atmosférica em Humaitá-AM. *Revista EDUCAmazonia*, Vol. 12, 86-98.

Dumas, A., Andrisani, A., Bonnici, M., Graditi, G., Leanza, G., Madonia, M., y otros. (2015). A new correlation between global solar energy radiation and daily temperatura variations. *Solar energy*, 116, 117-124.

Gomes, F. J., Alves , L. S., Alves, M. C., & Chiletto , E. C. (2009). Índice de claridade em Cuiabá e Chapada dos Guimarães. *Mato Grosso, Brasil.*

Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., y otros. (2010). Solar influences on climate. *Rev. Geophys*, 48, 1-53.

Hassan , G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., & Ali, M. A. (2016). New temperature based models for predicting global solar radiation. *Applied energy*, 179, 437-450.

Iqbal, M. (1984). *Introduction to Solar Radiation.* Toronto: Academic press.

Li, D., Lou, S., & Lam, J. (2015). An análisis of global, direct and diffuse solar radiation. *The 7th international conference on applied energy- ICAE2015. Energy procedia*, 75: 388-393.

Liu , X., Mei, X., Li , Y., Wang , Q., Jensen, J. P., Zhang, Y., y otros. (2009). Evaluation of temperatura-based global solar radiation models in China. *Agricultural and forest meteorology*, 149, 1433-1446.

Manzano, A., Martin, M. L., Valero, F., & Armenta, C. (2015). A single method to estimate the daily global solar radiation. *Atmospheric Research*.

Mesa , F. J., & Varas, E. (2000). Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperatura. *Agricultural and forest meteorology*, 41, 100-231.

Nogueira, D. H., Silva, M. G., Lêdo, E. R., & Araujo, E. M. (2012). Estimativa da radiação solar global (RS) através da amplitude térmica diária. *Workshop international de innovaçoes tecnológicas na irrigação.*

Oliveira, G., Augusto, G., Finzi, R. R., & Da Silva, A. (2014). Comparison between global solar radiation models in Aquidauana, alto pantanal, región Brasil. *Comunicata, scientiae*, 5, 222-228.

Queiroz, M. R., Nogueira, C. B., & De Assis, S. V. (2000). Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. *Departamento de meteorologia Universidad de Pelotas Brasil*, 194-199.

Quej, V. H., Almorox, J., Ibrakhimov , M., & Saito, L. (2016). Empitical models for estimating daily global solar radiation in Yucatan, Mexico. *Energy conversión and management*, 110: 448-456.

Querino, C. A., Moura, M. A., & Lyra, R. (2006). Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 42-49.

Recalde, C., Cisneros, C., Vaca, D., & Ramos, C. (2015). Relacion de la transmitancia atmosférica con heliofania y la diferencia de temperaturas extremas diarias en zona ecuatorial andina. *Informacion tecnológica*, Vol. 26, 143-150.

Rodriguez, D. J., Hernandez, J., & Simbaqueva, O. (2015). Analisis estadístico del índice de claridad atmosférica para la ciudad de Bogota. *Revista científica. ISSN 0124-2253. Bogota, Colombia*, N° 21, pp. 65-70.

Silva, V. J., Silva, C. R., Finzi, R. R., & Dias, N. S. (2012). Modelos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. *Ciência Rural*, Vol. 42: 276- 282.

Teke, A., Yildirin, H. B., & Celik, O. (2015). Evaluation and performance comparison of diferent, models for the estimation of solar radiation. *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 1097-1107.

Yao , W., Li , Z., Wang, Y., Jiang, F., & Hu , L. (2014). Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China. *Energy conversión and management*, 84, 597-612.