

TÍTULO DEL PROYECTO

Estimación y validación de la radiación solar global aplicando modelos empíricos utilizando la amplitud térmica diaria

AUTOR:

Matias Huilca Arbieto: mhuilca@unap.edu.pe

Lelia Quispe Huamán: lquispeh@unap.edu.pe

Ciro William Taipe Huamán: ctaipe@unap.edu.pe

RESUMEN:

La radiación solar global que llega a la superficie terrestre tiene efectos perjudiciales y beneficiosos sobre los recursos naturales, seres vivos y demás materias. Los efectos perjudiciales son acumulativos en el tiempo, por lo que es esencial conocer el comportamiento de la radiación solar global. En la ciudad de Puno la radiación solar global fue medida a partir del año 2014 y no existen registros en el resto de la Región. En esta investigación se propone la aplicación de diferentes modelos para estimar la radiación solar global en Puno y serán evaluadas durante el 2019 y 2021. Se utilizarán principalmente medidas de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y radiación solar global, registradas en la estación meteorológica del Laboratorio de Física de la Universidad Nacional del Altiplano. Los modelos empíricos para estimar la radiación solar global diaria, serán comparados bajo las mismas circunstancias. Se elegirá al modelo que se ajuste mejor a las registradas por la estación meteorológica. La aplicación del modelo propuesto resultará de gran utilidad para obtener una base de datos completa de radiación solar global diaria y sirve para realizar estudios de cambio climático, así mismo para aplicaciones de la energía solar.

Palabras clave:

Modelos empíricos, Radiación Solar global, Amplitud térmica, Evaluación

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A escala global hay escasísimas medidas de radiación solar especialmente en el siglo XX, y por esta razón se ha impulsado la generación de modelos empíricos que permitan la estimación de la radiación solar global (Sanchez & Wild, 2012).

En el Perú en la mayoría de sus regiones, especialmente Puno, pese al gran recurso energético solar no se cuenta con datos de radiación solar global que permitan su uso, en proyectos, investigaciones y emprendimientos de energía solar. Esta falta de datos es una de las principales causas por las que no se desarrollan proyectos de energía solar en la región. Además, la cuantificación y beneficios de la radiación solar global es desconocida por la población y no existen medios de información *insitu* para realizar consultas; así mismo, el control de los niveles de la radiación solar superficial tiene una importancia fundamental en zonas alto andinas donde

existe mayor radiación solar. Puno está ubicada en la zona circunlacustre del lago Titicaca está ubicada a más de 3810 m.s.n.m. (Dejollx y litis, 1991) y goza de bastante afluencia turística tanto nacional e internacional, por lo que la población y los recursos naturales están expuestos a la radiación solar global.

El estudio de la radiación solar global plantea responder a la siguiente interrogante:

¿Es posible determinar un modelo empírico adecuado para estimar y predecir la radiación solar global diaria en el pasado a largo plazo en la zona circunlacustre del lago Titicaca en base a parámetros meteorológicos?

Y las siguientes interrogantes específicas:

¿Cómo analizar la distribución espacial de la disponibilidad de la radiación solar global en la ciudad de Puno?

II. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación nace de la necesidad de mejorar la densificación espacial del conocimiento de la radiación solar global diaria en Puno y la falta de datos en las estaciones meteorológicas lo que justifica el interés de investigar la radiación solar global mediante la aplicación de modelos empíricos.

La predicción de radiación solar global nace del interés de realizar estudios de cambio climático, toma de decisiones de proyectistas e inversionistas, y las aplicaciones de las energías renovables, en especial la energía solar en el presente y en los años venideros (Camayo et al. 2019). Se sabe que los combustibles fósiles son el mayor contribuyente al cambio climático y al calentamiento global y la única esperanza de reducir la emisión de gases de efecto invernadero es encontrar métodos más limpios para desarrollar formas renovables de energía como la energía solar. Además, la radiación solar es el motor del sistema climático del planeta, resulta de vital importancia establecer su cuantificación (Feng et al. 2018).

El conocimiento de la radiación solar global es la base de cualquier estudio climático y su aplicación en la meteorología, industria, agricultura, ingeniería, arquitectura, recursos hídricos, y ecosistemas naturales, aplicaciones de energía solar, turismo y provee información de apoyo a las entidades de salud para prevenir futuras enfermedades asociados a los efectos nocivos a la exposición a la radiación solar (De Souza et al., 2005).

III. HIPÓTESIS

Hipótesis General:

El modelo empírico adecuado permite estimar y predecir la radiación solar global diaria en base a parámetros meteorológicos en la ciudad de Puno.

Hipótesis Específicos:

La disponibilidad de la radiación solar global permite analizar su distribución en Puno.

IV. OBJETIVOS

Objetivo General:

Determinar el modelo empírico adecuado para estimar y predecir la radiación solar global diaria en base a parámetros meteorológicos en la ciudad de Puno.

Objetivos Específicos:

Analizar la distribución espacial de la disponibilidad de la radiación solar global en la ciudad de Puno.

V. ANTECEDENTES

Feng et al. (2020) aplicaron un modelo empírico complejo en China en diferentes zonas climáticas desde 1994 hasta 2016, el cual ofrecía la mejor precisión de predicción con un promedio de error medio absoluto (MAE) de 1.69 MJ/m^2 por día, error cuadrático medio (RRMSE) de 16.2% y el coeficiente de Nash Sutcliffe (NS) de 0.895; por lo tanto, este modelo puede recomendarse como un modelo óptimo para predecir la radiación solar global en China, lo que puede proporcionar información crucial para el diseño e implementación de sistemas solares fotovoltaicos y térmico.

Dhimish y Mather (2019) estudiaron la relación existente entre la radiación solar y la temperatura ambiente en el Reino Unido desde 2015 hasta 2017 en 20 estaciones meteorológicas, obteniéndose valores promedios máximo anuales de radiación solar con valores de 103 KWh/m^2 en Plymouth y el menor valor de 77.3 KWh/m^2 en Aberdeen; y con respecto a la temperatura máxima promedio anual se obtuvo en Plymouth con un valor de $12.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y un valor mínimo de $9.1 \text{ }^\circ\text{C}$ en Edimburgo. Los datos obtenidos en este trabajo son valiosos para crear y validar pronósticos de recursos solares a escala de servicios públicos, operación e integración de la red eléctrica de generación de energía solar. También Rojas et al. (2016) y (Chang et al., 2017)

encontraron una relación estrecha entre la amplitud térmica y la radiación solar global.

Feng et al. (2018) caracterizaron la radiación solar global directa y difusa desde 1959 hasta 2016 en el norte de China, los resultados indican que el modelo empírico y la red neuronal aplicada tienen un buen desempeño de $R=0.49-0.95$. Ha existido una influencia de aerosoles atmosféricos el cual representa el 63 % de cambios desde 1959 hasta 1989 y 2004 hasta 2016, por ende hubo una disminución de la radiación solar global difusa.

Fernández et al. (2015) caracterizaron el comportamiento de la radiación solar global en la ciudad Bahía Blanca en Argentina desde 2001 hasta 2011. La radiación solar promedio durante el estudio fue 187.36 W/m^2 . Entre enero y diciembre se registraron radiaciones mayores de 227.4 W/m^2 y, en junio y julio oscilan entre 51.5 W/m^2 y 110 W/m^2 respectivamente. En el transcurso del día la radiación alcanza su máximo valor entre 13:00 y 13:30 horas. Con respecto a la nubosidad esta reduce hasta en un 10.86 %, además se evidencia una notable variabilidad en los valores observados, el mínimo valor corresponde al año 2001 con 169.4 W/m^2 y el máximo en el año 2010 con un valor promedio de 200.8 W/m^2 , hallándose el rango de variabilidad de 31.4 W/m^2 para todo el periodo, el comportamiento radiativo coincide con las tendencias positivas globales, tratados por Wild (2012), Manara et al. (2016) y Kambezidis (2018), fenómeno denominado *Brightening*.

Winslow et al. (2001), determinaron la radiación solar global durante 30 años en Kansas, Estados Unidos para evaluar espacial y estacionalmente aplicando el modelo Bristow y Campbell modificado en base a las temperaturas extremas y precipitación, llegando a la conclusión que la radiación solar global convergió en 1 MJ/m^2 por día al 72 % de confianza; así mismo, indican que el modelo Bristow y Campbell se utiliza ampliamente cuando no hay datos disponibles de radiación solar global. Otros autores que aplicaron el modelo de Bristow y Campbell son Hassan et al. (2018) y Fernandes et al. (2018).

En la región Junín, Camayo et al. (2019), aplicaron y validaron el modelo Bristow y Campbell en base a la amplitud térmica para estimar la radiación solar global mensual y anual desde 2000 hasta 2017, obteniendo en la sierra un valor promedio de 6 KWh/m^2 y en la selva 4 KWh/m^2 , lo cual indica un

alto potencial de radiación solar global, el cual es rentable para diversas aplicaciones de energía solar. Estos autores también desarrollaron un modelo empírico en base a parámetros físicos en una superficie horizontal para estimar la radiación solar global (Camayo et al., 2015).

Baigorria et al. (2004) aplicaron el modelo Bristow y Campbell, Hargreaves y García con el objetivo de estimar la distribución la radiación solar global en base a las temperaturas extremas en el Perú; así mismo aplicaron el modelo de Ångström y Prescott para determinar la transmitancia atmosférica máxima en el Perú, obteniendo un valor de 0.82 para Puno. De los modelos aplicados el que se desempeñó mejor fue el modelo Bristow y Campbell.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1 El sol fuente de calor de la tierra

El sol es la principal fuente de energía para la tierra (Shine, 2000), y abarca todo el sistema solar, suministra el calor que lo calienta (Manuel, 2009). La superficie del sol está muy cerca de una emisión de un cuerpo negro a una temperatura de aproximadamente $T_2 = 5778$ K. La ecuación de Stefan-Boltzmann ($S_s = \sigma T^4$, con $\sigma = 5.57 \times 10^{-8} \text{ WK}^4/\text{m}^2$), el flujo de energía emitido por la superficie del sol es de aproximadamente $S_s = 63 \text{ MW/m}^2$. El radio del sol es 700000 km. La energía total emitida es de $P_s = 4 \times 10^{20} \text{ MW}$, y esta disminuye por metro cuadrado (Martinez, 2019), y se muestra en la Figura 1

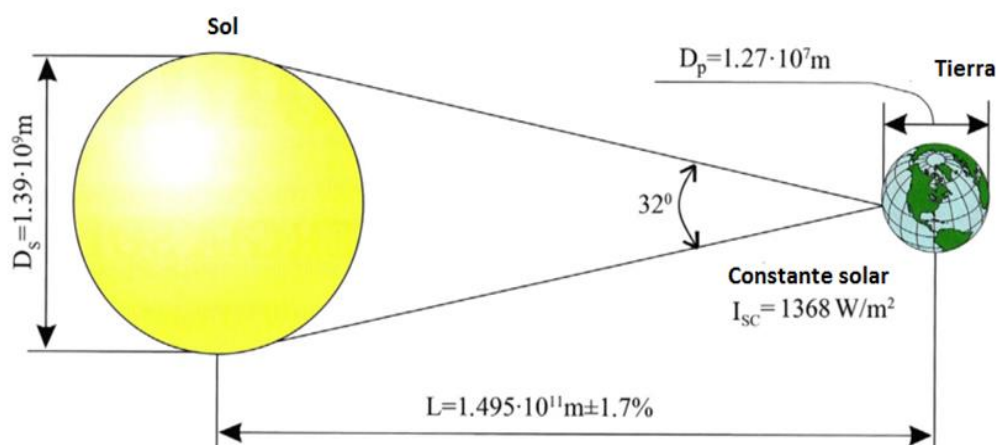


Figura 1. Distancia sol-tierra

Fuente:(Sarbu & Sebarchievici, 2017)

6.2 Radiación solar

La radiación solar se define como la radiación electromagnética que llega a la tierra desde el sol, siendo extremadamente esencial para la vida (Santos et al., 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 et al., 2015).

Los fotones se caracterizan por su frecuencia o por su longitud de onda, así como por su energía (Bayod, 2019; Riverola et al., 2019). Estos tres parámetros están relacionados, tal como se muestra en las ecuaciones.

$$\text{VII. } C = \lambda \times f \dots\dots\dots(1)$$

Donde. C: velocidad de la luz ($C=3 \times 10^8$ m/s), f es la frecuencia en Hz y λ es la longitud de onda en metros. Por otra parte,

$$\text{VIII. } E = hf = \frac{hc}{\lambda} \dots\dots\dots(2)$$

Dónde: E es la energía de un fotón en Joule J, h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} Js).

6.3 Radiación de onda corta

La radiación de onda corta superficial se refiere a la irradiancia solar total con longitudes de onda en el rango de 300-3000 nm y generalmente se define como la ecuación (3) mencionada por (Roelandts, 2020).

$$I_g = \int_{0.3 \mu\text{m}}^{3.0 \mu\text{m}} I(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots(3)$$

Dónde: $I(\lambda)$ es la irradiancia espectral.

6.4 Radiación solar global en superficies horizontales

Feng et al. (2018) indican que la radiación solar global en superficies horizontales se puede clasificar de la siguiente manera:

- Radiación solar global directa (R_{dir})
- Radiación solar global difusa (R_{dif})

La radiación solar global es la cantidad que se recolecta dentro de una hora y es el total de la radiación solar directa y difusa que se puede obtener de la ecuación (4).

$$R = R_{dir} + R_{dif} \dots\dots\dots (4)$$

La radiación solar global diaria en una superficie horizontal se puede calcular mediante la integración de la ecuación (6).

$$R_g = \int R dt \dots\dots\dots(5)$$

El incremento de la radiación solar difusa es causada en gran parte por el aumento de aerosoles atmosféricos y esto incrementa la radiación solar global (Feng et al., 2018).

6.5 Modelos empíricos

Se aplica modelos empíricos en áreas donde no existen estaciones meteorológicas y los datos de radiación solar global no pueden ser medidos (Saffaripour et al., 2013). Los parámetros para encontrar la radiación solar global, son los modelos empíricos basados en temperaturas y radiación solar extraterrestre (Wang, 2019; Marzo et al., 2017); también horas sol, humedad, presión atmosférica (Saffaripour et al., 2013) pueden utilizarse como predictores en cualquier caso (Oesterle, 2001) y son esenciales en las aplicaciones de la agricultura (Steinmetz et al., 2013), así mismo se deben tener en cuenta las condiciones climáticas y geográficas (Belaid y Mellit, 2016).

Feng et al. (2019) aplicaron modelos empíricos basados en la temperatura del aire, tales como el modelo Hargreaves Samani, Bristow y Campbell, Jahani y el modelo de Fan para predecir la radiación solar global en el futuro, la cual es de gran importancia para la gestión y operación de los sistemas de energía solar.

En esta investigación se utilizarán modelos empíricos para estimar la radiación solar global, las cuales están compuestas por variables y constantes tales como:

R_g : Radiación solar global [KWh/m²], R_e : Radiación solar extraterrestre [KWh/m²],
 T_{max} : temperaturas máxima, T_{min} : temperaturas mínima, A: índice de claridad máxima,
 B: Constante específica de la región (Depende de C), C: Constante específica de la
 región (Depende de la amplitud térmica y latitud). n: Horas de sol efectiva o heliofanía,
 N: Duración astronómica del día para una fecha del año, a+b: Índice de claridad
 máxima, a: índice de claridad mínima.

6.5.1 Modelo de Chen

Chen et al. (2004) propusieron un modelo con relación logarítmica entre la radiación solar y temperaturas máximas y mínimas, como se muestra en la ecuación (6).

$$\frac{R_g}{R_e} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) \dots\dots\dots(6)$$

6.5.2 Modelo de García

García (1994), propuso un modelo adaptado al modelo Ångström y Prescott para estimar la radiación solar global en base a la amplitud térmica, como se muestra en la ecuación (7)

$$\frac{R_{\text{eg}}}{R_e} = a + b \frac{\Delta T}{N} \dots\dots\dots(7)$$

6.5.3 Modelo Hargreaves y Samani

Hargreaves y Samani (1985) sugirieron que la radiación solar global, podría estimarse a partir de las temperaturas máximas y mínimas del aire y la radiación extraterrestre, como se muestra en la ecuación (8).

$$\frac{R_g}{R_e} = K_t (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \dots\dots\dots(8)$$

6.5.4 Modelo de Bristow y Campbell

Bristow y Campbell (1984) construyeron 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, como se muestra en la ecuación (9).

$$\frac{R_g}{R_e} = A \left[1 - e^{-B(T_{\max} - T_{\min})^C} \right] \dots\dots\dots(9)$$

6.5.5 Modelo Ångström y Prescott

El modelo Ångström y Prescott es el modelo más frecuentemente usado para estimar la irradiancia solar relativa (R_g/R_e) basado en horas de sol relativos (n/N). Esta ecuación fue sugerida por Prescott en (1940) como una modificación del modelo Ångström propuesto en 1924 (Baigorria et al., 2004). Esta ecuación (10) está dado por:

$$\frac{R_g}{R_e} = a + b \frac{n}{N} \dots\dots\dots(10)$$

VII. METODOLOGÍA

7.1 Lugar de Estudio.

La presente investigación se realizará en la zona circunlacustre de la región de Puno. El lago Titicaca está ubicado a más de 3810 m.s.n.m. (Martínez, 2007), en el altiplano andino Peruano-Boliviano, tienen un área de 8000 km², es cálido y mionomítico (Lazzaro, 1985), se caracteriza por algunas áreas planas pocas profundas por ejemplo la Bahía de Puno (Rossiter y Kawanabe, 2000).



Figura 2. Ciudad de Puno.

Fuente: (SENAMHI, 2021).

7.2 Población y tamaño de muestra

Población.

Para el presente trabajo de investigación se considerará como población al total de datos meteorológicos de la zona de Puno correspondiente a las estacion meteorológica

Muestra

Para el presente trabajo de investigación se considerará como muestra el conjunto de datos recopilados de la estación. Los datos a recopilar serán datos registrados de temperaturas máximas, temperaturas mínimas y radiación solar global del 2019 y 2021.

7.3 Descripción detallada de los métodos, uso de materiales, equipos o insumos

Tipo de la investigación

La presente investigación es de tipo correlacional, teórico y experimental. Es correlacional puesto que se mide el grado de intensidad entre variables. Se espera obtener la correlación lineal entre las radiaciones solares globales estimadas y medidas desde 2019 al 2021 en el área de estudio. Es teórico puesto que la investigación se basará en modelos empíricos como el de Chen, Garcia, Hargreaves y Samani, Bristow y Campbell, Ångström y Prescott. La estimación de la radiación solar global diaria puede ser estimada aplicando modelos empíricos con datos de entrada de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, día juliano y latitud. Es experimental puesto que se va usar datos medidos de radiación solar global, temperaturas máximos y mínimos por las estaciones meteorológicas para estimar la radiación solar global.

Descripción de variables

Variable dependiente

Y: Radiación solar global diaria

Variable independiente

X: Amplitud térmica diaria

Aplicación de prueba estadística inferencial

Se aplicará el coeficiente de correlación, error relativo porcentual, suma residual compuesta, error medio porcentual.

VIII. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES	2021											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1. Revisión bibliográfica												
2. Redacción del proyecto												
3. Presentación del proyecto												
4. Recolección de datos												
5. Organización y procesamiento de datos												
6. Evaluación y comparación de datos												
7. Análisis de datos y resultados												
8. Presentación del informe final												

IX. PRESUPUESTO

N°	Descripción	Cantidad	Costo Total (S/.)
1	Material bibliográfico de las últimas investigaciones	60	S/ 2000.00
2	Computadora con Windows 8	1	S/. 4000.00
3	Software de procesamiento de datos	2	S/. 2000.00
4	Material de oficina	5	S/. 500.00
5	Horas de búsqueda de información en internet.	500	S/. 500.00
6	Otros imprevistos (pasajes, viáticos, exploración)		S/. 2000.00
	TOTAL		S/. 11000.00

X. BIBLIOGRAFÍA

- 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*, 24(9), 1121–1136. <https://doi.org/10.1002/joc.1060>
- Bayod-rújula, A. A. (2019). Solar photovoltaics (PV). In *Solar Hydrogen Production* (pp. 237–295). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00008-4>
- Belaid, S., & Mellit, A. (2016). Prediction of daily and mean monthly global solar radiation using support vector machine in an arid climate. *Energy Conversion and Management*, 118, 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.082>
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 13(3), 576.
- Camayo-Lapa, B. F., Massipe-Hernández, J. R., Torres-Ten, A., Pomachagua-Paucar, J. E., & Quispe-Flores, M. O. (2015). Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la Región de Junín , Perú Campbell-Bristow development Model for Estimating Global Solar radiation in the Region of Junín , Perú.
- Camayo Lapa, B. F., Condezo Hurtado, D. E., Ramos Cadillo, A. Y., Massipe Hernández, J. R., & Becquer Vivas, A. C. (2019). Estimation of global solar radiation, using extreme temperatures, applying the bristow-campbell model in the junín region. *Ingeniare*, 27(4), 643–651. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000400643>
- Chang, T., Liu, F., Ko, H., & Huang, M. (2017). Oscillation characteristic study of wind speed ,

- global solar radiation and air temperature using wavelet analysis. *Applied Energy*, 190, 650–657. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.149>
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., & Zhao, W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, 45(11–12), 1759–1769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>
- De Souza, J. L., Nicácio, R. M., & Moura, M. A. L. (2005). Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, 30(8), 1203–1220. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.013>
- Dejollx, C., & Iltis, A. (1991). *El lago Titicaca : síntesis del conocimiento limnológico actual*.
- Dhimish, M., & Mather, P. (2019). Exploratory evaluation of solar radiation and ambient temperature in twenty locations distributed in United Kingdom. *Urban Climate*, 27, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.001>
- Feng, Y., Chen, D., & Zhao, X. (2018). Estimated long-term variability of direct and diffuse solar radiation in North China during 1959–2016. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1–2), 153–163. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2579-1>
- Feng, Y., Gong, D., Jiang, S., Zhao, L., & Cui, N. (2020). National-scale development and calibration of empirical models for predicting daily global solar radiation in China. *Energy Conversion and Management*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112236>
- Feng, Y., Gong, D., Zhang, Q., Jiang, S., Zhao, L., & Cui, N. (2019). Evaluation of temperature-based machine learning and empirical models for predicting daily global solar radiation. *Energy Conversion and Management*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111780>
- Fernandes, D. S., Heinemann, A. B., Amorim, A. de O., & da Paz, R. L. F. (2018). Estimation of global solar radiation based in temperature observations for the Goiás state. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 33(3), 558–566. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333014>
- Fernández, M. E., Campo, A. M., & Gentili, J. O. (2015). Comportamiento temporal de la radiación solar global en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Climatología*, 15(August), 51–64.
- García J. V. (1994). *García J V (1994) Principios físicos de la climatología. 244 p.* (Universidad Nacional Agraria La Molina, Ed.) (Ediciones).

- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Ambient Air Temperature. *American Society of Agricultural Engineers*, 96–99.
- Hassan, M. A., Khalil, A., Kaseb, S., & Kassem, M. A. (2018, February 1). Independent models for estimation of daily global solar radiation: A review and a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.002>
- Kambezidis, H. D. (2018). The solar radiation climate of Athens: Variations and tendencies in the period 1992–2017, the brightening era. *Solar Energy*, 173, 328–347. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.076>
- Lazzaro, X. (1985). Poblaciones,biomasas y producciones fitoplanctonicas del lago Titicaca. *Ecología En Bolivia NP*, (7), 23–63.
- Manara, V., Brunetti, M., Celozzi, A., Maugeri, M., Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2016). Detection of dimming/brightening in Italy from homogenized all-sky and clear-sky surface solar radiation records and underlying causes (1959-2013). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(17), 11145–11161. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11145-2016>
- Manuel, O. K. (2009). Earth's heat source - The sun. *Energy & Environment*, 20, 131–144.
- Manzano, A. ., Martín, M. L. ., Valero, F. ., & Armenta, C. . (2015). A single method to estimate the daily global solar radiation from monthly data. *Atmospheric Research*, 166, 70–82. <https://doi.org/>
- Martinez-Gracia, A. (2019). Solar energy availability. In *Solar Hydrogen Production* (pp. 113–149). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814853-2.00005-9>
- Martínez Gonzales, R. (2007). *Cooperación sobre el Lago Titicaca; Technical documents in hydrology: PC-CP series; Vol.:32; 2007.*
- Marzo, A., Trigo, M., Alonso-Montesinos, J., Martínez-Durbán, M., López, G., Ferrada, P., ... Batlles, F. J. (2017). Daily global solar radiation estimation in desert areas using daily extreme temperatures and extraterrestrial radiation. *Renewable Energy*, 113, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.01.061>
- Oesterle, H. (2001). Reconstruction of daily global radiation for past years for use in agricultural models. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(3), 253–256. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00248-3](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00248-3)
- Riverola, A., Vossier, A., & Chemisana, D. (2019). Fundamentals of solar cells. In *Nanomaterials*

- for Solar Cell Applications* (pp. 3–33). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813337-8.00001-1>
- Roelandts, R. (2020). Solar radiation. In *Advanced Remote Sensing*, (Second Edi, Vol. 134, pp. 157–191). [https://doi.org/10.1016/S0151-9638\(07\)89237-4](https://doi.org/10.1016/S0151-9638(07)89237-4)
- Rojas Serrano, J., Vásquez Vega, A., García Acevedo, F., Parra Peñaranda, D., & Castro Becerra, E. (2016). Estimating missing data in historic series of global radiation through neural network algorithms. *Sistemas & Telemática*, 14(37), 9–22. <https://doi.org/10.18046/syt.v14i37.2239>
- Rossiter, A., & Kawanabe, H. (2000). Ancient Lakes : Biodiversity, Ecology and Evolution. *Advances in Ecological Research*, 31, 624.
- Saffaripour, M. H., Mehrabian, M. A., & Bazargan, H. (2013). Predicting solar radiation fluxes for solar energy system applications. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(4), 761–768. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0179-2>
- Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2012). Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8635–8644. <https://doi.org/10.5194/acp-12-8635-2012>
- Santos Querino, C. A., Lima Moura, M. A., Da Fonseca Lyra, R. F., & Lopes Mariano, G. (2006). Avaliação E Comparação De Radiação Solar Global E Albedo Com Ângulo Zênital Na Região Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 42–49.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2017). Solar Radiation. In *Solar Heating and Cooling Systems* (pp. 13–28). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811662-3.00002-5>
- Shine, K. P. (2000). Radiative forcing of climate change. *Space Science Reviews*, 94, 363–373.
- Steinmetz, S., Nunes Deibler, A., & Baptista da Silva, J. (2013). Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. *Ciência Rural*, 43(2), 206–211. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000200003>
- Wang, Z. (2019). The Solar Resource and Meteorological Parameters. In *Design of Solar Thermal Power Plants* (pp. 47–115). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815613-1.00002-x>
- Wild, M. (2012). Enlightening Global Dimming and Brightening. *American Meteorological Society*, 14(July 2011), 7927. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1>
- Winslow, J. C., Hunt, E. R., Piper, S. C., & Hunt, E. R. (2001). *A globally applicable model of daily*

solar irradiance estimated from air temperature and precipitation data. Ecological Modelling (Vol. 143).