

## Estimación de la radiación solar diaria y ángulos de inclinación óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani.

José Armando Gastelo-Roque<sup>1</sup>, Arturo Morales-Acevedo<sup>2</sup>, Jian Edgar Tineo-Soto<sup>1</sup>

### Resumen

La ciudad de Lambayeque es una ciudad con mucho potencial solar, pero no se dispone de información relevante para la instalación de sistema fotovoltaicos. En el presente trabajo se aplica el modelo propuesto por Hargreaves Samani para estimar la irradiación solar diaria en la Ciudad de Lambayeque (6°42'S, 79°54'O) y se determina el ángulo óptimo para captar la mayor radiación solar. Se eligió el modelo de HS en razón de su simplicidad. Este modelo determina la radiación solar incidente en función de la diferencia de temperaturas máxima y mínima registradas y de una constante de ajuste. Para los datos de temperaturas máxima y mínima diarios se usaron datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI, mientras que los valores promedios mensuales de radiación se obtuvieron de datos proporcionados por la NASA. Luego, mediante un ajuste por mínimos cuadrados se obtuvo la constante de ajuste en el modelo de Hargreaves-Samani. En base a esto se pudo calcular la radiación diaria. Finalmente, se obtuvieron los valores de inclinación óptimos a partir de las expresiones generales de astronomía solar para la ubicación en estudio. El valor promedio de irradiación solar global obtenidos a partir del procedimiento descrito fue de 5.38 kWh/m<sup>2</sup>, proporcionando una energía total anual de 1.96 MWh/m<sup>2</sup> con mayor radiación durante los meses de Diciembre – Febrero. En base a esto se concluye que la Ciudad de Lambayeque posee una alta rentabilidad en aplicaciones de radiación solar, de acuerdo a OLADE (1982) el cual indica que radiaciones superiores a 5 kWh/m<sup>2</sup> son muy rentables. Se recomienda un ángulo de inclinación de 10°, con el cual se obtiene una ganancia de 2.5%. Estos resultados se aplicarán a la simulación de sistemas fotovoltaicos instalados en la localidad de Lambayeque, Perú.

**Palabras Clave.** – Energía solar, Hargreaves-Samani, estimación radiación solar, Lambayeque, ángulo óptimo.

## Estimation of the daily global solar radiation and optimum tilt angles for Lambayeque (Peru) using the Hargreaves-Samani model.

### Abstract

Lambayeque is a city with great solar radiation potential, but there is no available relevant information for installation of PV systems. Therefore, in this work we apply the Hargreaves-Samani (HS) method to estimate the daily solar radiation in Lambayeque (6°42'S, 79°54'O) and its determined the optimum tilt angle in which the greatest amount of solar radiation is obtained. The HS model was chosen due to its simplicity. This method determines the incident solar radiation as a linear function of the difference between the maximum and minimum temperatures each day. The maximum and minimum temperatures data were provided by Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI, while the monthly averages of solar radiation were obtained from NASA databases. Then, by least-squares fitting, the Hargreaves-Samani proportionality constant was obtained. Based on this procedure, the daily solar radiation could be estimated. Additionally, the optimum inclination for solar modules to be installed in Lambayeque city was also evaluated for this specific location from astronomical solar motion expressions. The Lambayeque solar radiation was determined to be 5.38 kWh/m<sup>2</sup> in average, providing a total energy around 1.96 MWh/m<sup>2</sup> each year. Hence, Lambayeque has a high potential for profitable solar energy applications, in agreement with OLADE (1982), which indicates that daily solar irradiances above 5 kWh/m<sup>2</sup> are very cost effective. Its recommended a tilt angle of 10° with which a gain of 2.5% is obtained. These results will be applied for simulation of photovoltaic systems in Lambayeque, Perú.

**Keywords.-** Solar energy, Hargreaves-Samani, estimation of solar radiation, Lambayeque, optimum tilt angle.

<sup>1</sup>Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque – Perú.

jgastelor@unprg.edu.pe

<sup>2</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN. México DF-México

amorales@solar.cinvestav.mx

Recibido: 1 noviembre 2016

Aceptado: 27 diciembre 2016

## INTRODUCCIÓN

El gran incremento de la demanda de energía eléctrica producido en las últimas décadas ha llevado a buscar alternativas para producir energía eléctrica las cuales sean amigables con el medio ambiente. La energía solar es una de las alternativas más atractivas ya que es muy abundante y su acceso a ella es prácticamente gratuito.

La ciudad de Lambayeque es una ciudad que presenta un potencial solar muy alto para la generación de electricidad a partir de la energía solar. Para el dimensionamiento de sistemas generadores de energía solar fotovoltaica o térmica es necesario contar con datos diario y hasta horarios de radiación solar (da Silva, da Silva, Júnior, & Carvalho, 2011) (Kaplani & Kaplani, 2007). Así como también con los valores óptimos de inclinación de los colectores solares.

En el presente artículo se estima la radiación solar global diaria en Lambayeque (Perú) y se determina el ángulo de inclinación óptimo con el cual se capta la mayor cantidad de radiación solar.

Para estimar la radiación diaria debido a la condición geográfica en la que se encuentra ubicada la ciudad de Lambayeque y por la disponibilidad de datos de temperatura diaria en la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI los modelos más apropiados son

el propuesto por Brinstow-Campbell (Bristow & Campbell, 1984) y el de Hargreaves Samani (Hargreaves & Samani, 1982).

Ambos modelos utilizan la irradiación solar extraterrestre, la diferencia de temperaturas diaria para el lugar y una serie de constantes para calcular la irradiación solar extraterrestre diaria.

Torrez et al (Torrez, Burgoa, & Ricaldi, 2013) concluyen que por simplicidad e inmediatez se puede trabajar perfectamente con el modelo de Hargreaves Samani, sin sacrificar precisión, por lo que en el presente trabajo se utiliza este modelo para estimar la irradiación global diaria en la ciudad de Lambayeque, en este modelo la irradiación solar diaria se relaciona de manera lineal con la raíz cuadrada de la diferencia ( $\Delta T$ ) entre la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y temperatura mínima ( $T_{min}$ ), modulada por la constante solar y un coeficiente "a" de la siguiente manera:

$$H = aH_0\sqrt{T_{max} - T_{min}}$$

en donde:

$H$ =Irradiación solar diaria [Wh/m<sup>2</sup>]

$H_0$ =Irradiación solar extraterrestre diaria [Wh/m<sup>2</sup>]

$T_{max}$ =Temperatura máxima diaria [°C]

$T_{min}$ =Temperatura mínima diaria [°C]

## METODOLOGÍA.

### Localización y datos meteorológicos.

Lambayeque es una ciudad costera localizada al noroeste del Perú, perteneciente a la región de Lambayeque; dista 790 km de la ciudad de Lima, la capital del Perú. Se ubica a 6°42' de latitud sur y 59°54' de longitud oeste, es decir a -6.72° de latitud y -79.90° de longitud. La Fig. 1 muestra la localización de la ciudad.



**Figura N° 1:** Localización de Lambayeque

Presenta un clima árido con una temperatura caliente-árida y una clasificación BWh-BSh en la escala de Köppen-Geiger según (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006), presentando un alto nivel de irradiación anual. El potencial solar de esta ciudad y región es muy alto, pero no se dispone de datos de radiación diaria, irradiancia o valores de ángulo óptimo para colectores solares, lo cual representa un problema al momento de realizar estudios de factibilidad para centrales de energía solar.

**Tabla 1.**

*Irradiación global promedio en un plano horizontal [kWh/m<sup>2</sup>/día]*

Mes	Irradiación Global (kWh/m <sup>2</sup> /día)
Enero	5.70
Febrero	5.55
Marzo	5.84
Abril	5.38
Mayo	4.88
Junio	4.47
Julio	4.48
Agosto	4.91
Septiembre	5.59
Octubre	5.95
Noviembre	5.98
Diciembre	5.86
Promedio Anual	5.38

Para el presente estudio utilizamos los datos de irradiación global, directa y difusa proporcionados por la Surface Meteorology and Solar Energy, Atmospheric Science Data Center de la NASA (NASA, 2017) los cuales se encuentran en su sitio web. Los datos corresponden a valores promedios mensuales de irradiación sobre una superficie horizontal para una zona entre las latitudes -6.5 y 7.5 de latitud y -80 y -79 de longitud medidos en base a un periodo de 22 años (Julio 1983 - Junio 2005).

Si bien estos datos no están específicamente centrados en la localidad y solo son valores promedio mensuales, es la información más fiable de la que se dispone.

También se cuenta con el Atlas Solar del Perú, 2003 (SENAMHI, 2016) elaborado por el SENAMHI pero los valores proporcionados por este atlas son generales a nivel regional, no son diarios ni en forma puntual o detallada además posee un margen de error muy significativo.

Las tablas 1, 2 y 3 muestran los valores promedios mensuales de radiación global, directa y difusa respectivamente.

Respecto a la temperatura los datos fueron obtenidos del sitio web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAHMI) (SENAMHI, 2016), cual registra datos diarios de temperaturas en diversas ciudades del Perú desde hace más de 10 años. Los datos de temperaturas utilizados fueron tomados por la estación meteorológica LAMBAYEQUE-000301 ubicada a una latitud de 6°43'54" S y una longitud 79°54'9" O, estos datos por tanto están ubicados en el mismo lugar y son altamente confiables.

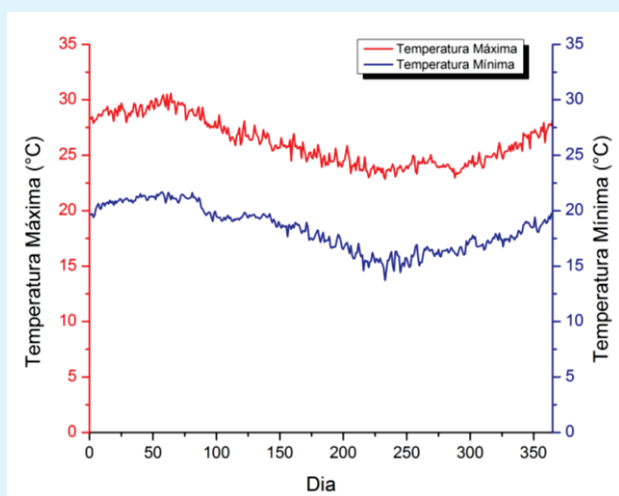


Figura N° 2: Temperaturas diarias máxima y mínima.

La Fig. 2 muestra los valores de temperatura máxima y mínima para la ciudad. Se tomaron los valores de temperatura de los últimos 5 años (2012-2016) y se promediaron. Esto para obtener valores más confiables.

**Tabla 2.**  
*Irradiación directa promedio en un plano horizontal [kWh/m2/día]*

Mes	Irradiación Directa (kWh/m2/día)
Enero	5.12
Febrero	4.62
Marzo	5.20
Abril	5.00
Mayo	4.87
Junio	4.49
Julio	4.33
Agosto	4.49
Septiembre	5.02
Octubre	5.33
Noviembre	5.58
Diciembre	5.53
Promedio Anual	4.97

**Tabla 3.**  
*Irradiación difusa promedio en un plano horizontal [kWh/m2/día]*

Mes	Irradiación Difusa (kWh/m2/día)
Enero	2.20
Febrero	2.31
Marzo	2.16
Abril	1.96
Mayo	1.76
Junio	1.69
Julio	1.75
Agosto	1.91
Septiembre	2.07
Octubre	2.19
Noviembre	2.14
Diciembre	2.12
Promedio Anual	2.02

**Astronomía Solar.**

**Ángulo diario**

$$\Gamma = \frac{2\pi(n - 1)}{360}$$

Donde:

n= número de día en el año juliano

**Declinación**

La declinación solar es el ángulo que forma la línea tierra-sol con el plano del ecuador terrestre a medida que la tierra recorre su órbita, en el hemisferio sur en ángulo de declinación solar varía desde +23.45° en el solsticio de invierno (21 o 22 de junio) hasta -23.45° en el solsticio de verano (20 o 21 de diciembre) y se hace nulo en los equinoccios (22 de marzo y 22 de setiembre).

La declinación se puede calcular mediante distintas ecuaciones existentes como:

Formula de Spencer (Spencer, 1971)

$$\delta(n) = 0.006918 - 0.0399912\cos\Gamma + 0.070257\sin\Gamma - 0.006758\cos2\Gamma + 0.000907\sin2\Gamma - 0.002697\cos3\Gamma + 0.00148\sin3\Gamma$$

Fórmula aproximada de Cooper (Cooper, 1969):

$$\delta(n) = 23.45^\circ \sin\left(\frac{284 + n}{365.5} * 360^\circ\right)$$

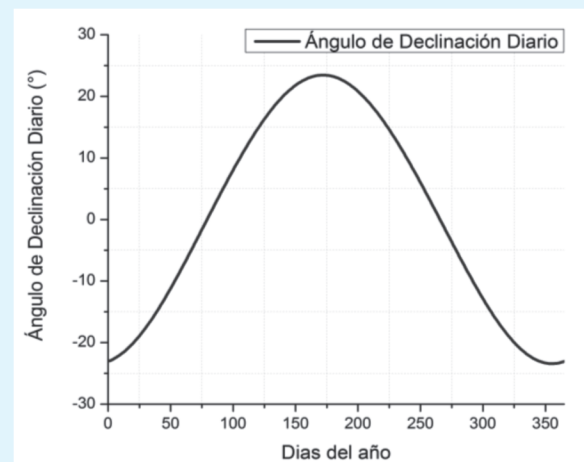
Donde:

Γ=ángulo diario

δ= ángulo de declinación del sol

n= número de día en el año juliano

Debido a que la fórmula de Spencer es fácil de utilizar en cálculos por computadora y posee un menor margen de error, calculamos la declinación mediante esta fórmula. La Fig. 3 muestra los valores de declinación en grados para cada día del año, se indican también los valores para el día 15 de cada mes, la Tabla 4 muestra el valor exacto para cada uno de esos días.



**Figura N° 3:** Valores de declinación diaria en [°], se indican los valores para el 15 de cada mes.

**Tabla 4.**

Valores para el ángulo de declinación en [°] considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.

Mes	Declinación [°]
Enero	<b>21.09</b>
Febrero	<b>12.61</b>
Marzo	<b>2.04</b>
Abril	9.84
Mayo	18.91
Junio	23.33
Julio	21.51
Agosto	13.99
Septiembre	2.96
Octubre	8.59
Noviembre	<b>18.56</b>
Diciembre	<b>23.27</b>

### Ángulo horario

El ángulo horario  $\omega$  indica el desplazamiento angular del sol, de este a oeste, a una tasa de 15 grados/hora debido a la rotación de la tierra. Por convención, se considera el ángulo horario nulo en el mediodía solar, negativo en la mañana y positivo por la tarde. Este ángulo se define sobre el plano del ecuador, como el ángulo entre los meridianos del Sol y de un observador O ubicado en el hemisferio norte.

Lo importante para este trabajo es el valor del ángulo horario a la salida o puesta del sol, el cual se calcula mediante:

$$\cos(\omega_s) = -tg(\phi) * tg(\delta)$$

Donde:

$\omega_s$ = ángulo horario (a la salida o puesta del sol) [rad]

$\delta$ = Ángulo de declinación del sol [°]

$\phi$ =Latitud del Lugar [°]

### Corrección por excentricidad de la orbita

La órbita terrestre no es circular, sino que es elíptica con el sol en un foco, la órbita posee una excentricidad y a consecuencia la distancia de la tierra al sol varía en el tiempo y la irradiación presenta una variación estacional de  $\pm 3\%$  debido a esta excentricidad (Abal, 2012). Para considerar este efecto se utiliza el coeficiente  $F_n$

denominado corrección por excentricidad de la órbita o corrección orbital, que según Spencer (Spencer, 1971) viene determinado por:

$$F_n = 1,000110 + 0,034221 \cos(\Gamma) \\ + 0,001280 \sin(\Gamma) \\ + 0,000719 \cos(2\Gamma) \\ + 0,000077 \sin(2\Gamma)$$

Donde:

$\Gamma$ =ángulo diario. [rad]

### Constante Solar

La constante solar representa el flujo de radiación proveniente del sol que cruza por unidad de área, medida en la parte superior de la atmosfera terrestre y en forma normal a los rayos del sol, considerando una distancia de la tierra al sol de 1 UA (unidad astronómica). El valor de la constante solar considerado en este trabajo es de 1367 W/m<sup>2</sup>. Por lo tanto:

$$G_{CS} = 1367W/m^2$$

### Orientación e inclinación de los módulos para sistemas PV.

Para conseguir la mejor captación de luz y sacar el máximo rendimiento de los paneles solares es importante que se encuentren bien orientados y con el grado de inclinación más adecuado a la temporada de uso de la

instalación fotovoltaica. Como Lambayeque se ubica en el hemisferio sur el módulo debe ser orientado mirando hacia el hemisferio norte. Con respecto a la inclinación se determinará el ángulo óptimo para lograr la mayor captación de sol.

### **Determinación del ángulo de inclinación óptimo.**

Para lograr la mayor captación de luz solar se deben inclinar los módulos en tal ángulo que la superficie sea perpendicular a los rayos del sol. Como la posición del sol varia a lo largo del año, el ángulo de inclinación óptimo es distinto a largo del año, debido a esto se tienen varias opciones de ángulo óptimo dependiendo de los requerimientos del sistema fotovoltaico a instalar. Así se pueden colocar los módulos para lograr una mayor captación en verano, en invierno o durante todo el año. En este trabajo nos centraremos solamente en obtener el ángulo óptimo al cual se obtiene la mayor radiación durante todo el año. Como se indicó anteriormente la posición del sol varia en el tiempo, lo ideal sería que los módulos también variaran su ángulo de inclinación para captar mayor radiación (seguidor solar) pero esto como se demostrará luego no siempre es factible y posible. En este trabajo se encontrará el valor de energía obtenido suponiéndose la variación de la inclinación de los módulos y el valor para un ángulo de inclinación fijo durante todo el año.

Para encontrar el ángulo óptimo suponiendo que la inclinación del modulo variará en el transcurso del año, se debe calcular el ángulo de declinación del sol para el día específico. Luego el ángulo de inclinación diario en la que el panel se encontrará más perpendicular a la radiación solar vendrá determinado por:

$$\beta = \varphi - \delta; \text{ para el solsticio de verano}$$

$$\beta = \varphi + \delta; \text{ en el solsticio de invierno}$$

$$\beta = \delta; \text{ en los equinoccios}$$

Donde:

$\beta$ : ángulo de inclinación del panel respecto a la horizontal

$\varphi$ = latitud del lugar

La formula anterior proporciona el ángulo óptimo diario para obtener la mayor radiación solar si se supone que los módulos variaran su inclinación en el tiempo (utilización de seguidor solar), ahora para determinar el ángulo óptimo con el cual se obtiene la mayor radiación en todo el año mientras el módulo se mantiene fijo debemos recurrir a la bibliografía.

Viloria recomienda que en zonas de latitud de 0° a 15° se utilice 15° de inclinación.

ABB recomienda se utilice un ángulo de inclinación igual a la siguiente formula. (ABB, 2011)

$$\beta = 3,7 + 0,69(\varphi)$$

Morales-Acevedo recomienda que se utilice un ángulo de inclinación igual al ángulo de latitud más de 15°. (Morales-Acevedo, 1996)

Y últimamente diversos autores recomiendan utilizar un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar.

Arrieta et al recomienda que el ángulo de inclinación mínimo sea de 10° con el fin evitar el estancamiento de agua (Arrieta, Olmos, Izquierdo, & Alvarez, 2012)

Resumiendo:

	Calculo	$\beta$ : Ángulo de Inclinación
Varios Autores	$\beta = \phi$	6.7°
ABB	$\beta = 3,7 + 0,69(\phi)$	8.4°
[6]	$\beta = 10$	10°
Viloria	$\beta = 15^\circ$	15°
Morales-Acevedo	$\beta = \phi + 15$	21.7°

**Radiación solar obtenida a un determinado ángulo de inclinación.**

Para determinar la radiación obtenida a determina ángulo de inclinación se utiliza:

$$Ga(\beta_{opt}) = \frac{Ga(0)}{1 - 4.46 * 10^{-4} * \beta_{opt} - 1.19 * 10^{-4} * \beta_{opt}^2}$$

**RESULTADOS**

**Radiación Solar Extraterrestre**

La radiación solar extraterrestre no tiene el mismo valor que el de la constante solar todos los días, el valor de radiación varia diariamente de acuerdo a las condiciones astronomicas y tambien que este ultimo valor se calcula para un plano horizontal y no para uno normal. Por lo que se debe calcula la radiación solar extraterrestre diaria.

La irradiación solar extraterrestre es la energía por unidad de área sobre un plano horizontal ubicado fuera de la atmosfera. Para calcular la irradiación solar extraterrestre en un día y latitud

determinadas  $H_0$ , utilizamos la siguiente ecuación (Abal, 2012):

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{CS} F_n (\cos\delta \cos\phi \sin\omega_s + \omega_s \sin\delta \sin\phi)$$

Donde:

$H_0$  =Irradiación solar extraterrestre en un día [kWh/m2/día]

$\omega_s$ = ángulo horario [rad]

$F_n$ = Corrección por excentricidad de la orbita

$I_{CS}$ = Constante solar [Wh/m2]

$\delta$ = Declinación diaria [°]

$\phi$ =Latitud del Lugar [°]



La Fig. 4 muestra la irradiación solar extraterrestre diaria para la localidad estudiada.

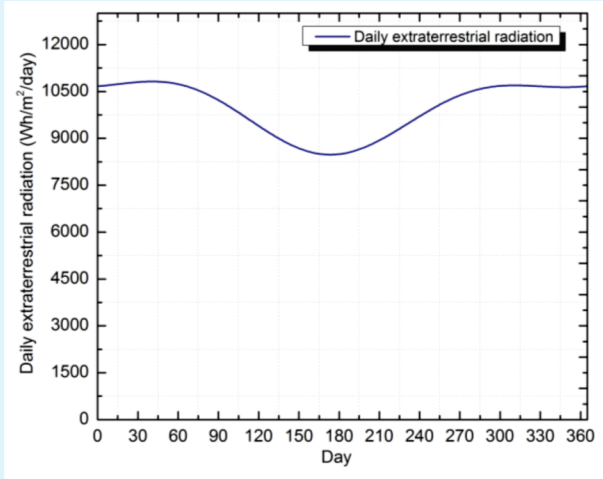


Figura N° 4: Radiación extraterrestre en Lambayeque.

### Determinación de la irradiación solar diaria sobre un plano horizontal en la tierra.

A partir de la radiación solar extraterrestre y los valores máximos y mínimos de temperaturas, se puede estimar la radiación solar diaria sobre la tierra, la cual es diferente a la radiación extraterrestre debido a los efectos climáticos y de la atmosfera.

Para estimar esta radiación hemos utilizado el modelo de Hargraves-Samani. Este modelo utiliza los valores máximos y mínimos de temperatura diarios y mediante una constante de ajuste “a” estima la radiación solar con una buena precisión.

$$H = aH_0\sqrt{T_{max} - T_{min}}$$

Donde:

$a$ =constante de ajuste que representa la transmitancia atmosférica.

$H$ =Irradiación solar diaria [Wh/m<sup>2</sup>]

$H_0$ =Irradiación solar extraterrestre diaria [Wh/m<sup>2</sup>]

$T_{max}$ =Temperatura máxima diaria [°C]

$T_{min}$ =Temperatura mínima diaria [°C]

Los valores de temperaturas los hemos obtenido anteriormente, por lo que la diferencia de temperaturas se puede obtener fácilmente, la Fig. 5 muestra los valores de diferencia diaria de temperatura  $\Delta T$ .

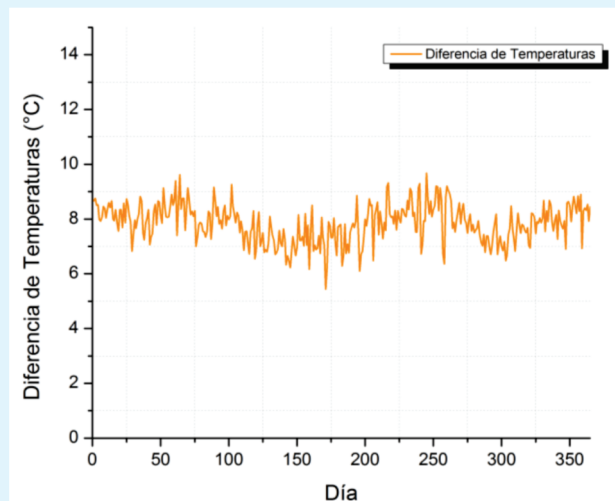


Figura N° 5: Diferencia entre las Temperaturas Máxima y Mínima [°]

La constante de ajuste “a” se obtendrá basándonos en los datos mensuales proporcionados por la NASA, pero dado que los datos son promedios mensuales y no diarios, también se promediaron mensualmente los datos de la raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas multiplicados por la radiación solar extraterrestre, para luego obtener la

constante “a” mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

La Fig. 6 muestra el ajuste para los pares de datos.

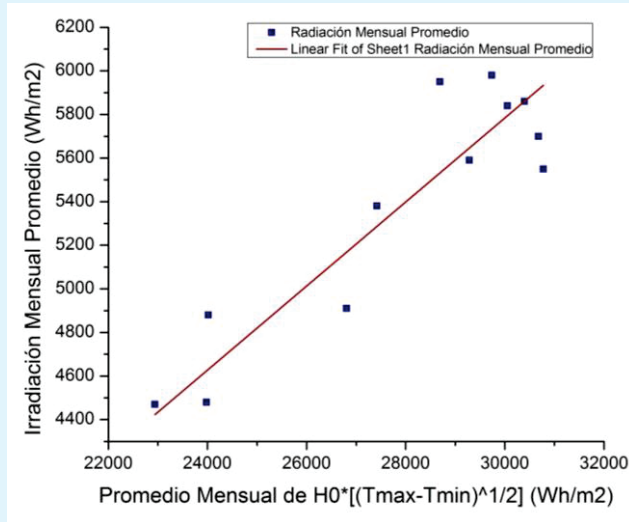


Figura N° 6: Ajuste mediante mínimos cuadrados

El ajuste arroja un valor para la transmitancia atmosférica “a” de 0.193 con un factor de correlación  $R^2 = 0.998$ . Este valor de “a” es muy cercano al valor de 0.19 esperado para zonas en las costas (Hargreaves & Samani, 1982).

Utilizando el valor de “a” de 0.193, obtenido arriba, se puede determinar la radiación solar global diaria, como se muestra en la Fig. 7 para un año típico.

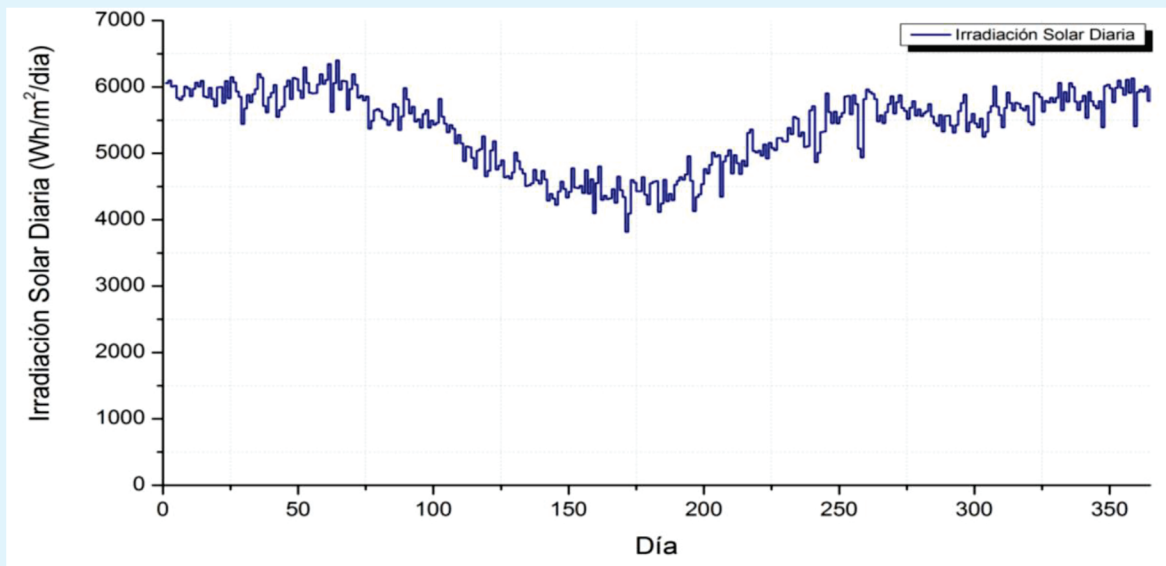


Figura N° 7: Radiación solar global diaria en un año promedio [Wh/m2]

### Determinación del ángulo óptimo de inclinación

Utilizando las fórmulas para determinar el ángulo de inclinación óptimo

(suponiendo se varíe la inclinación a lo largo del año), las recomendaciones de ángulos fijos dados por los autores y la radiación obtenido a un ángulo determinado, se

calcula la radiación obtenida a los diferentes ángulos, mostrado en la Tabla 6.

Para determinar el ángulo óptimo debemos calcular la cantidad de energía anual que se produce para cada ángulo.

**Tabla 4.**  
*Valores de energía anual a diferentes ángulos:*

	0°	óptimo	6.71°	8.4°	10°	15°	21.7°
Energía MWh/m <sup>2</sup>	1.958	2.074	2.007	2.008	2.008	1.998	1.966
Ganancia (%)		5.935	2.523	2.569	2.549	2.063	0.414

**Tabla 5.**  
Valores de radiación obtenidos a diferentes ángulos de inclinación:

	0°	óptimo	6.71°	8.4°	10°	15°	21.7°
Enero	5.706	6.647	6.292	6.347	6.394	6.516	6.617
Febrero	5.550	6.026	5.911	5.939	5.963	6.012	6.022
Marzo	5.839	5.987	5.984	5.987	5.986	5.959	5.867
Abril	5.396	5.372	5.310	5.287	5.261	5.161	4.975
Mayo	4.895	4.875	4.666	4.627	4.587	4.442	4.203
Junio	4.471	4.485	4.192	4.148	4.104	3.947	3.695
Julio	4.479	4.478	4.229	4.189	4.147	4.001	3.762
Agosto	4.893	4.860	4.746	4.717	4.686	4.571	4.371
Septiembre	5.574	5.621	5.615	5.606	5.595	5.536	5.404
Octubre	5.948	6.295	6.239	6.259	6.274	6.295	6.264
Noviembre	5.980	6.804	6.523	6.571	6.613	6.718	6.793
Diciembre	5.864	6.985	6.531	6.594	6.650	6.797	6.927

Observamos que el ángulo al cual se obtiene mayor energía es el de 8.4°. Para evitar los problemas de estancamiento de agua sería conveniente utilizar un ángulo de 10° con respecto a la horizontal.

### CONCLUSIONES

Este trabajo fue realizado con la finalidad de proporcionar datos diarios de irradiación solar que sirvieran para facilitar y promover las aplicaciones en energía solar. Así también proporcionar un modelo factible para realizar la evaluación de la energía solar en la ciudad de Lambayeque y en el Perú de una manera rápida y confiable.

Para estimar la radiación solar se utilizó el modelo de Hargreaves-Samani. El método utilizado tiene la ventaja de estimar la radiación solar a partir los datos de temperaturas máximas y mínimas, los cuales son fáciles de obtener y se cuenta con estos

en casi todo el país. Con estas consideraciones concluimos en que:

- a) En ausencia de datos de radiación solar, el modelo de Hargreaves-Samani es un método aplicable y confiable para estimar la radiación solar en Lambayeque.
- b) Se obtuvo un valor para la transmitancia atmosférica “a” igual a 0.193, el cual es ligeramente superior al esperado de 0.19 para ubicaciones en la costa
- c) La ciudad de Lambayeque tiene una irradiación solar global de 5.38 kWh/m<sup>2</sup>/día en promedio anual, proporcionado una energía total anual de

- 1.96 MWh/m<sup>2</sup>, por lo que posee un potencial solar muy rentable de acuerdo con la clasificación de la Organización Latinoamericana de Energía OLADE, la cual menciona que radiaciones anuales promedio radiaciones solares mayores de 4,0 kWh/m<sup>2</sup>/día son rentables y de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/día muy rentable. Los valores de irradiación más altos corresponden a los meses de Diciembre – Febrero.
- d) Se recomienda un ángulo de inclinación de 10° orientado al norte con el cual se obtiene una ganancia del 2.5% de radiación solar
- e) Se observa que la ganancia obtenida al utilizar un seguidor solar de un eje es menos del 6% por lo que recomendamos realizar un estudio de la factibilidad de su uso en instalaciones de sistemas fotovoltaicos para Lambayeque.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abal, G. (2012). *Fundamentos de Energía Solar: Radiación Solar*. Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Republica.
- ABB. (2011). Cuaderno de Aplicaciones Prácticas Nro 10 Plantas fotovoltaicas. En ABB, *Cuaderno de Aplicaciones Prácticas*. España: ABB.
- Arrieta, M., Olmos, L., Izquierdo, J., & Alvarez, R. (2012). Design of an solarphotovoltaic system prototype optimizing the slope angle. *Prospect*, 10(1), 97-107.
- Bristow, K., & Campbell, G. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(2), 159-166.
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Sol Energy*, 12, 333-346.
- da Silva, C., da Silva, V., Júnior, J., & Carvalho, H. (2011). Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(3), 281-288.
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.
- Kaplanis, S., & Kaplani, E. (2007). A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation values. *Renewable Energy*, 32(8), 1414-1425.

doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.06.014>

Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130

Morales-Acevedo, A. (1996). *La electricidad que viene del sol. Una fuente de energía limpia*. Ciudad de México: Grupo Editorial Iberoamericana.

NASA, A. S. (22 de Marzo de 2017). *Surface meteorology and Solar Energy*. (NASA) Recuperado el 15 de Febrero de 2017 , de

<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov>

SENAMHI. (15 de Setiembre de 2016). *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI*. (Ministerio del Ambiente del Perú) Recuperado el 3 de Marzo de 2017, de <http://www.senamhi.gob.pe>

Spencer, J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), 172. Obtenido de <http://www.citeulike.org/user/pbett/article/13208903>

Torrez, R., Burgoa, A., & Ricaldi, E. (2013). Modelos de estimación de la radiación solar para el altiplano central de Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 23, 1-7.