



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”
ESCUELA DE POSGRADO



MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN ENERGÍA

**“Estudio de modelos matemáticos empíricos para estimar la
radiación solar global en la provincia de Lambayeque”**

TESIS

**Presentada para optar el Grado Académico de Maestro en
Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en
Energía**

AUTOR:

Bach. José Eduardo Toro Tello.

ASESOR:

Dr. Carranza Montenegro Daniel

LAMBAYEQUE, PERU

2023

Constancia de verificación de originalidad

Yo, Dr. Daniel Carranza Montenegro. Docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, usuario revisor del documento titulado, ESTUDIO DE MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA PROVINCIA DE LAMBAYEQUE,

Cuyo autor es, José Eduardo Toro Tello, identificado con DNI: 47080702, declaro que la evaluación realizada por el programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de 20 % verificable en el resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizo dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el recibo digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 03 de Octubre de 2023



.....
Dr. Daniel Carranza Montenegro

DNI:

Docente Asesor




Recibo digital


Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Eduardo Toro
Título del ejercicio: Turni 2023
Título de la entrega: Informe final
Nombre del archivo: REV_03_TESIS_EDUARDO_TORO_07-08.docx
Tamaño del archivo: 1.2M
Total páginas: 71
Total de palabras: 8,746
Total de caracteres: 48,666
Fecha de entrega: 22-ago.-2023 07:33p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2149681914



UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA Y ELÉCTRICA
CON MENCIÓN EN ENERGÍA



"Estudio de modelos matemáticos empíricos para estimar la radiación solar global en la provincia de Lambayeque"

TESIS

Presentada para optar el Grado Académico de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en Energía

AUTOR:
Bach. José Eduardo Toro Tello.

ASESOR:
Dr. Farfán Neyra, José Luis

LAMBAYEQUE, PERU
2023

Derechos de autor 2023 Turnitin. Todos los derechos reservados.

Firma:

Nombre de Asesor: Daniel Carranza Montenegro

Informe final

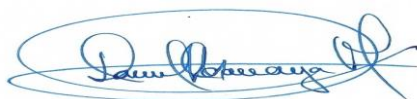
INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	20%	2%	%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	14%
2	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	L. M. Cranston, H. M. Phillips, P. D. Kemp, D. J. Donaghy. "Resiembra natural de plántulas de <i>Plantago lanceolata</i> cv. 'Ceres Tonic' en una pradera establecida", Agro Sur, 2016 Publicación	1%
4	pdffox.com Fuente de Internet	1%
5	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
6	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
7	anes.org.mx Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	<1%

Firma: _



Nombre de Asesor: Daniel Carranza Montenegro

9	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
10	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
11	www.civil.uprm.edu Fuente de Internet	<1 %
12	www.perspectiva.gt Fuente de Internet	<1 %
13	search.bvsalud.org Fuente de Internet	<1 %
14	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
15	faz.ujed.mx Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	scielo.sld.cu Fuente de Internet	<1 %
18	"Datos climatológicos de Chile para la elaboración del modelo Chile-SR", Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012 Publicación	<1 %
19	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1 %

Firma: _



Nombre de Asesor: Daniel Carranza Montenegro

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

010

Siendo las 11:05 horas del día Diecisiete de Noviembre del año Dos Mil Veinte y tres (2023), en la Sala de Sustentación de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, se reunieron los miembros del Jurado, designados mediante Resolución N° 1042-2023-EPG de fecha 15/11/2023, conformado por:

Dr. Luis Jaime Collantes Santisteban PRESIDENTE (A)

Dr. Segundo Abelardo Horta Torres SECRETARIO (A)

Mg. Juan Antonio Tuijalcán Hinojosa VOCAL

Dr. Daniel Carranza Montenegro ASESOR (A)

Con la finalidad de evaluar la tesis titulada "ESTUDIO DE MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA REGIÓN LAMBAYEQUE".

presentado por el (la) Tesisista José Eduardo Tero Tello

sustentación que es autorizada mediante Resolución N° 1722-2023-EPG de fecha 13 de Noviembre del dos mil veinte y tres (2023).

El Presidente del jurado autorizó del acto académico y después de la sustentación, los señores miembros del jurado formularon las observaciones y preguntas correspondientes, las mismas que fueron absueltas por el (la) sustentante, quien obtuvo 17 puntos que equivale al calificativo de BUENO.

En consecuencia el (la) sustentante queda apto (a) para obtener el Grado Académico de:

Mg. en Ingeniería Mecánica, y Eléctrica
con mención en ENERGÍA.

Siendo las 12:10 horas del mismo día, se da por concluido el acto académico, firmando la presente acta.


PRESIDENTE


SECRETARIO


VOCAL


ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres, Domingo y Edita por su apoyo incondicional.

El Autor.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Daniel Carranza Montenegro. quien me guio con paciencia, honestidad e hizo valiosos aportes a mi investigación como asesor.

Resumen

Una de las localidades que cuenta con gran potencial solar es Lambayeque, pese a ello son escasos los datos en cuanto a irradiancia solar y sus medidas in situ. En esta investigación se estimó y predijo la irradiancia solar por día en esta localidad con el uso de modelos matemáticos.

Los Modelos matemáticos para el presente trabajo de investigación son aquellas ecuaciones que estiman la irradiancia solar utilizando la temperatura, la humedad, la altitud, la cobertura de nubes y otros como datos atmosféricos, como. Existen modelos matemáticos diferentes que permiten la estimación de la irradiancia solar. Es así que en la presente tesis se analizaron 5 de ellos, luego del análisis estadístico se seleccionó el modelo de Bristow-Campbell para predecir la irradiancia solar para la ciudad de Lambayeque, ya que ésta estima dicha cantidad física con un valor más cercano al que se derivan de mediciones de SENAHMI Zonal 2 Lambayeque, durante el periodo de 2014 al 2019, además de poseer el menor RMSE y MBE porcentual.

Para los cálculos, el Organismo Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI brindó las temperaturas Máxima y mínima, y los datos para predecir la irradiación solar diaria, fueron comparados los datos obtenidos por 5 modelos matemáticos con los proporcionados por la base de datos NASA POWER y SENAMHI. El valor obtenido de irradiancia solar global es de 3,95 kWh/m²/día, Estos resultados pueden aplicados para futuros sistemas fotovoltaicos en otras localidades del Perú.

Palabras clave: irradiancia solar, temperatura, modelos matemáticos, SENAMHI; NASA POWER.

Abstract

One of the localities with great solar potential is Lambayeque, however, data on solar irradiance and its in situ measurements are scarce. In this research the solar irradiance per day in this location was estimated and predicted with the use of mathematical models.

The mathematical models for the present research work are those equations that estimate solar irradiance using temperature, humidity, altitude, cloud cover and other atmospheric data, such as. There are different mathematical models that allow the estimation of solar irradiance. Thus, 5 of them were analyzed in this thesis, after the statistical analysis, the Bristow-Campbell model was selected to predict the solar irradiance for the city of Lambayeque, since it estimates this physical quantity with a value closer to that derived from measurements of SENAMHI Zonal 2 Lambayeque, during the period from 2014 to 2019, in addition to having the lowest RMSE and percentage MBE.

For the calculations, the National Agency of Meteorology and Hydrology of Peru, SENAMHI provided the maximum and minimum temperatures, and the data to predict the daily solar irradiance, were compared the data obtained by 5 mathematical models with those provided by the NASA POWER and SENAMHI database. The obtained value of global solar irradiance is 3.95 kWh/m²/day. These results can be applied for future photovoltaic systems in other locations in Peru.

Keywords: solar irradiance, temperature, mathematical models, SENAMHI; NASA POWER.

1 CONTENIDO

DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO.....	VII
INTRODUCCIÓN	14
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1 SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	16
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
2.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
2.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
2.4.1 <i>Objetivo General</i>	18
2.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	18
2.5 HIPÓTESIS.....	19
3 BASES TEÓRICAS	20
3.1 ESTADO DEL ARTE.....	20
3.1.1 <i>Antecedentes de nivel internacional</i>	20
3.1.2 <i>Antecedentes de nivel Nacional</i>	21
3.2 FUNDAMENTOS DE ENERGÍA SOLAR	23
3.3 IRRADIACIÓN E IRRADIANCIA	24
3.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR RADIACIÓN SOLAR	25
3.5 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR DE BRISTOW-CAMPBELL.....	26
3.6 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR HARGREAVES-SAMANI.....	27
3.7 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ANNANDALE.....	28
3.8 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ERTEKIN-YALDIZ	29
3.9 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR CHEN	29
4 MARCO METODOLÓGICO	30
4.1 METODOLOGÍA	30
4.1.1 <i>Variables e indicadores</i>	30
4.1.2 <i>Unidad de Análisis</i>	30
4.1.3 <i>Tipo y Nivel de Investigación</i>	31
4.1.4 <i>Periodo de Análisis</i>	31
4.1.5 <i>Fuentes de Información e Instrumentos</i>	31
4.1.6 <i>Técnicas de recolección y procesamiento de datos</i>	31
4.1.7 <i>Análisis estadístico de los datos</i>	32
	X

5	ANÁLISIS Y RESULTADOS	33
5.1	DATOS DE TEMPERATURA	33
5.2	DATOS DE IRRADIACIÓN	44
5.3	MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR BRISTOW-CAMPBELL.....	47
5.4	MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR HARGREAVES-SAMANI.....	51
5.5	MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ANNANDALE.....	54
5.6	MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ERTEKIN-YALDIZ	58
5.7	MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR CHEN	61
5.8	DATOS DE IRRADIANCIA SOLAR EN BASE A TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS DE SENAMHI.....	65
6	CONCLUSIONES	69
7	BIBLIOGRAFÍA	70

Índice de Figuras

<i>Figura 1 Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque año 2014.</i>	23
<i>Figura 2 Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque año 2015</i>	25
<i>Figura 3 Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque año 2015</i>	27
<i>Figura 4 Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque año 2017</i>	29
<i>Figura 5 Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque año 2018</i>	31
<i>Figura 6 Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque año 2019</i>	33
<i>Figura 7 Adecuación del modelo Bristow-Campbell</i>	38
<i>Figura 8 Datos estimados por Bristow-Campbell</i>	39
<i>Figura 9 Análisis entre los datos estimados por el modelo de Bristow-Campbell y los datos obtenidos de NASA</i>	40
<i>Figura 10 Adecuación del modelo de Hargreaves-Samani.</i>	42
<i>Figura 11 Datos estimados por el modelo de Hargreaves-Samani</i>	43
<i>Figura 12 Análisis entre los datos estimados por el modelo de Hargreaves-Samani y los datos obtenidos de NASA.</i>	44
<i>Figura 13 Datos estimados por el modelo de Annandale y los valore reales.</i>	45
<i>Figura 14 Datos estimados por el modelo de Annandale</i>	46
<i>Figura 15 Análisis entre los datos estimados por el modelo de Hargreaves-Samani y los datos obtenidos de NASA.</i>	47
<i>Figura 16 Adecuación del modelo de Ertekin-Yaldiz</i>	48
<i>Figura 17 Estimación del modelo de Erlekin-Yaldiz</i>	49
<i>Figura 18 Análisis entre los datos estimados por el modelo de Erketin-Yaldiz y los datos obtenidos de NASA.</i>	50
<i>Figura 19 Adecuación del modelo Chen</i>	52
<i>Figura 20 Datos estimados del modelo de Chen</i>	53
<i>Figura 21 Análisis entre los datos estimados por el modelo de Chen y los datos obtenidos de NASA</i>	54
<i>Figura 22 Comparación entre valores de modelos y datos de SENAHMI</i>	56

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2014</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2015</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 3 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2016</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2017</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2018</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2014</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7: Irradiación global promedio en un plano horizontal [kWh/m²/día]</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 8: Irradiación directa promedio en un plano horizontal [kWh/m²/día]</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 9: Irradiación difusa promedio en un plano horizontal [kWh/m²/día]</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 10: Indicadores de estadística del modelo de Bristow-Campbell</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 11: Indicadores estadísticos del modelo de Hagreaves-Samani.</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 12: Indicadores de estadística del modelo de Annandale</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 13: Indicadores de estadística del modelo de Erlekin-Yaldiz</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 14: Indicadores de estadística del modelo de Chen.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 15: Valores de b,c y H de Lambayeque 2014-2019</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 16: Análisis entre datos estimados e irradiancia solar en base a las temperaturas máximas y mínimas de Senamhi.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 17: Validación entre valores estimados y SENAMHI con los estimadores estadísticos.</i>	<i>61</i>

En el Perú, la creciente demanda de energía eléctrica y los problemas ambientales con los que convivimos, ha impulsado a los investigadores a profundizar en lo que respecta a la generación de energía limpia y renovable. Es aquí donde entran a tallar las dos famosas fuentes de energía renovable que van en ascenso en el Perú, la solar y la eólica.

Según el último informe realizado por el Banco Mundial denominado “Solar Photovoltaic Power Potential by Country”, el Perú junto con otros 69 países en el mundo cuentan con excelentes condiciones para desarrollar la tecnología solar ya que supera los 4,5 kWh/m²/día de capacidad instalada

A pesar de contar con una posición privilegiada para implementar proyectos de energía solar, en el Perú vamos retrasados en comparación con países más desarrollados que actualmente están a la vanguardia de esta tecnología, como en Europa. La energía eléctrica que produce el Perú gracias al sol actualmente solo es un 1,5% al 2018. Al día de hoy, el Perú cuenta con 7 centrales fotovoltaicas operativas que sumadas juntan una potencia instalada de 285 MW, una cifra baja con respecto a las posibilidades que tiene nuestro País

Ahora desde el punto de vista geográfico, según el Ministerio de Energía y Minas (Minem) en el Perú, el mayor potencial en cuanto a generación eléctrica solar se encuentra en toda la zona norte y sur. Esto fue expuesto ya en el Sun World 2019 realizado en Perú, el cual trajo las miradas de los demás países a realizar inversiones debido a la capacidad de generación con la que cuenta nuestro país.

Teniendo en consideración que el Perú es una fuente viable de generación energética renovable, es necesario determinar los niveles de radiación solar. Para poder realizar un diseño adecuado de proyectos de esta índole, es fundamental contar con datos diarios u horarios de la radiación solar que se emite en nuestro territorio. Sin estos datos, no hay sustento de que dicha fuente sea estable, haciendo que el proyecto sea o no viable.

La provincia de Lambayeque, situada en el norte del Perú, destaca por su potencial en la generación de energía solar debido a su ubicación geográfica y a las condiciones climáticas favorables. Sin embargo, para aprovechar al máximo esta fuente de energía renovable, es crucial contar con un modelo matemático preciso que estime de manera confiable la radiación solar en la región.

En la actualidad, existen diversos modelos matemáticos para estimar la radiación solar, pero es fundamental determinar cuál de ellos proporciona los resultados más precisos y confiables para Lambayeque. La precisión en la estimación de la radiación solar es crucial para diseñar adecuados proyectos de energía solar, la planificación eficiente de la generación de electricidad y la toma de decisiones estratégicas en el sector energético.

Esta investigación tiene como objetivo principal determinar el modelo matemático que estime la radiación solar con mayor precisión en la región de Lambayeque. Para lograrlo, se realizó un exhaustivo análisis comparativo de los diferentes modelos existentes, teniendo en cuenta variables climáticas, datos históricos de radiación solar y mediciones in situ.

Además, se consideró otros factores relevantes, como la altitud, la latitud, la nubosidad y la temperatura ambiental, que pueden influir en la radiación solar recibida en la región. Asimismo, se tomó en cuenta la variabilidad estacional y diaria de la radiación solar para obtener resultados más precisos y representativos.

Los resultados de esta investigación serán de gran importancia tanto para el ámbito académico como para el sector energético. Los conocimientos adquiridos permitirán mejorar la planificación y el diseño de proyectos de energía solar en Lambayeque, aumentando la eficiencia y rentabilidad de la generación de electricidad a partir de esta fuente renovable.

En resumen, esta tesis se enfoca en determinar el modelo más preciso para estimar la radiación solar en la provincia de Lambayeque, Perú. El estudio contribuirá al avance y desarrollo de la energía solar en el país, impulsando el uso de fuentes de energía limpia y sostenible para el beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La región de Lambayeque, ubicada en el norte de Perú, se destaca por su excepcional potencial energético para la generación de energía solar debido a su privilegiada ubicación geográfica y las favorables condiciones climáticas. No obstante, existe una problemática latente: la falta de un modelo matemático preciso que estime con mayor precisión la radiación solar en dicha región. Esta situación limita la planificación estratégica y el diseño óptimo de proyectos solares, lo que a su vez afecta la viabilidad y rentabilidad de la generación de energía solar en Lambayeque.

En este contexto, es fundamental contar con un modelo matemático confiable y preciso que permita estimar la radiación solar de manera adecuada en la región de Lambayeque. Dicho modelo sería de gran utilidad para el diseño eficiente de proyectos solares, la planificación estratégica de la generación eléctrica y la toma de decisiones informadas en el sector energético.

Esta investigación se propone abordar esta problemática mediante un análisis comparativo exhaustivo de los modelos matemáticos existentes, evaluando su desempeño en relación con las variables climáticas y utilizando datos históricos de radiación solar y mediciones in situ. Asimismo,

se buscó identificar las limitaciones y fortalezas de cada modelo, considerando la idoneidad de su aplicación en la región de Lambayeque.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué modelo matemático estimara con mayor exactitud la radiación solar en la región de Lambayeque?

2.3 JUSTIFICACIÓN

La ausencia de datos diarios u horarios de radiación solar en la región de Lambayeque genera incertidumbre y limita la implementación de proyectos de energía solar en esta zona. Sin información confiable sobre la radiación solar, no es posible respaldar la viabilidad de dicha fuente de energía y llevar a cabo diseños efectivos de proyectos. Por lo tanto, es fundamental desarrollar un estudio exhaustivo que permita determinar los niveles de radiación solar en la región de Lambayeque.

La importancia científica de esta investigación radica en el avance del conocimiento en el campo de la energía solar y su aplicabilidad en el contexto peruano. Al determinar el modelo matemático que estime con mayor exactitud la radiación solar en Lambayeque, se generará información valiosa para cualquier proyecto que busque utilizar esta energía como fuente de energía renovable. Los resultados obtenidos proporcionarán bases sólidas para la toma de decisiones en el diseño y la implementación de proyectos de generación de energía solar en la región, contribuyendo así al desarrollo sostenible y la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables.

Desde una perspectiva económica, esta investigación es relevante debido a la necesidad de evaluar la factibilidad técnica y económica de proyectos de plantas fotovoltaicas en Lambayeque. A medida que el mundo avanza hacia la transición energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, las inversiones en energía solar se vuelven cada vez más atractivas. La

identificación de la radiación solar en Lambayeque permitirá a inversionistas y desarrolladores evaluar la rentabilidad de los proyectos, estimar la generación de energía y calcular los costos asociados, lo cual es esencial para tomar decisiones informadas y atraer inversiones en esta área.

Ambientalmente se justifica debido a que la energía solar es una alternativa prometedora de generación energética renovable, a mayores escalas ayudará a la conservación del medio ambiente, debido a que no contamina. A diferencia de las formas convencionales de obtener energía eléctrica como las centrales térmicas, la solar tiene menor impacto ambiental, pues se evita la expulsión de gases de efecto invernadero.

La presente investigación busca contribuir al conocimiento científico y técnico en el campo de la energía solar en el Perú, específicamente en la región de Lambayeque. A través de la determinación de un modelo matemático preciso para estimar la radiación solar, se espera generar información valiosa para el diseño y la implementación de proyectos de generación de energía solar, impulsar y lograr el desarrollo sostenible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la diversificación de la matriz energética del país. Esta investigación es de gran relevancia tanto a nivel académico como económico, ya que contribuye al avance científico y a la viabilidad de inversiones en energías renovables en la región.

2.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1 Objetivo General

- Determinar el modelo matemático que estime con mayor precisión la radiación solar en la provincia de Lambayeque, Perú.

2.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos meteorológicos de temperaturas máximas y mínimas en Lambayeque.
- Adaptar los modelos matemáticos seleccionados previamente para estimar la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque.

- Comparar los resultados obtenidos mediante los modelos matemáticos con datos obtenidos de irradiación solar de la base de datos NASA POWER y los que se derivan de mediciones de las temperaturas máximas y mínimas de SENAEMI Zonal 2 Lambayeque, durante el periodo de 2014 al 2019.
- Seleccionar el modelo matemático que proporcione estimaciones más precisas y verídicas de la irradiancia solar en Lambayeque.

2.5 HIPÓTESIS

Se encuentra que uno de los modelos matemáticos estudiados proporciona estimaciones más precisas de la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque en comparación con los otros modelos.

En este capítulo, nos referiremos a la investigación que sustenta este trabajo y describiremos los antecedentes teóricos de esta tesis, desde el funcionamiento de las células solares y los fundamentos de los semiconductores hasta la teoría de las perovskitas.

3.1 ESTADO DEL ARTE

3.1.1 Antecedentes de nivel internacional

Un destacado investigador en el campo de la energía fotovoltaica y las películas delgadas es el profesor Michael Gracel, el inventor de las células solares sensibilizadas por colorante (DSSC) y uno de los diseñadores de las células solares de perovskita.

Según el autor, si nos enfocamos en nuestra macrorregión, uno de los laboratorios más importantes de América Latina es el Departamento de Electrónica de Estado Sólido del IPN CINVESTAV en México, que investiga activamente semiconductores y nuevas tecnologías de celdas solares.

Gastelo, J y otros [4], consideraron un modelo que, gracias a su simplicidad, se estimó la radiación global diaria. Los datos que usaron fueron aplicados a la ciudad de Hermosillo, México, de la cual obtuvieron sus datos meteorológicos, proporcionados tanto por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y los datos de radiación solar mensuales promedios fueron extraídos de la NASA. Para validar su proyecto recurrieron a la Red de Estaciones Meteorológicas de Sonora, AGROSON, donde compararon su método con los datos que ahí proporcionan, con una constante resultante de correlación de 0,88 la cual permitió la validación del método que utilizaron. Los resultados obtenidos fueron una irradiación solar promedio global de 5,73 kWh/m²,

siendo en los meses Marzo- Julio donde se dieron los picos más altos, esta irradiación promedio proporcionaría una energía total anual de aproximadamente 2,1 MWh/m².

Watkins, M y Salazar, G [5] elaboraron un modelo que brindó datos directos de radiación solar en la región Catamarca, Argentina. Su modelo usa valores meteorológicos como la temperatura, humedad relativa y heliofanía, a su vez usa valores medios de irradiación directa y difusa. Siendo más confiable que la mayoría de modelos, ya que estuvo entre los 4 con más precisión al estimar radiación directa. Utilizó como fuente 10 años de datos climáticos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Como resultado obtuvieron que sus valores coincidían con los de SWERA, sin embargo, la cantidad de energía que podría producirse era muy baja, 21,6 MJ/m², la cual supone un escenario desfavorable para la poner en marcha centrales de energía solar.

Alvarez, J y otros [6], en su artículo hicieron uso del modelo r.sun para determinar el nivel de radiación en la zona centro-sur de Chile. A su vez, se comparó los resultados con los obtenidos de otros modelos matemáticos como los Hargreaves-Samani (HS) y Bristow-Campbell (BC). Como conclusión determinaron que puede mejorarse la eficacia del modelo r.sun, si se calibrara de forma más exacta las mediciones del suelo y los niveles de nubosidad. Con esto mejorado, este modelo podría usarse también para estimar el nivel de radiación media espacial, ya sea mensual, semanal, diaria o anual.

3.1.2 Antecedentes de nivel Nacional

Díaz, M y Toro, J [7] al no contar Lambayeque con información solar confiable ni detallada se hizo un análisis de varios modelos matemáticos que estimen la radiación solar en base a información meteorológica. De los 5 modelos que se estudió, se seleccionó el modelo de Ertekin-Yaldiz debido a que contaba con un coeficiente de calibración de 1,125 y a la vez

poseía el coeficiente de determinación R^2 más alto con 0,9874. Acto seguido se diseñó un prototipo en Arduino, de modo que esta proporcione la temperatura cada 15 minutos y al finalizar el día dará un promedio, la cual servirá para la aplicación del modelo matemático que eligió. Los resultados que obtuvo fueron 5,38 kWh/m² de radiación solar mensual en Lambayeque, que proporcionaría una energía total anual de 1,96 MWh/m².

Quiñones, H y otros [8] haciendo uso de una metodología del tipo analítica y aplicando el modelo matemático de Fernández-Zayas lograron determinar la estimación solar diaria de la región Amazonas. Este modelo tiene como parámetros de aplicación la radiación solar máxima y la longitud del día solar. Se obtuvo los datos de la estación meteorológica ubicada en la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de la Región Amazonas. Hicieron uso también del software de simulación, MATLAB/GUI, para obtener los datos de la simulación de la radiación. Para validar la precisión del método que emplearon, hicieron uso de un análisis estadístico de “bondad de error y la tabla t”. Los resultados que obtuvieron al finalizar su proyecto fueron datos útiles para cualquier proyecto que incluya la utilización de la energía solar en Bagua, Perú.

Camayo, B y otros [9] usando el modelo matemático de Bristow-Campbell, desarrollado en 1984, y en la superficie de la región de Junín se realizó una estimación de la radiación solar promedio al mes, ya que esta no tenía ningún estudio que aporte esta información. Los datos meteorológicos que utilizaron para llevar a cabo su proyecto fueron proporcionados por 19 estaciones meteorológicas y ecuaciones que proponía el Atlas solar peruano del 2003. Los resultados obtenidos fueron comparados con las consideraciones que impone la OLADE, las cuales son para radiaciones solares mayores a 4 kWh/m²/día son rentables y para 5 kWh/m²/día son muy rentables. Obtuvieron 5,3 kWh/m²/día de radiación media mensual, correspondiéndole un 4,2 kWh/m²/día a la parte selva de la región y un 5,6 kWh/m²/día a la parte sierra.

3.2 FUNDAMENTOS DE ENERGÍA SOLAR

La energía solar es un tipo de energía renovable producida por el sol que puede utilizarse para crear electricidad, calentar agua y lugares, e incluso propulsar automóviles. Es una fuente de energía limpia y sostenible que no emite contaminantes ni degrada los recursos naturales.

El Sol es una enorme bola de gas caliente compuesta principalmente por hidrógeno y helio. En su núcleo, los átomos de hidrógeno se fusionan para generar átomos de helio, liberando una cantidad considerable de energía en forma de radiación electromagnética. Esta radiación viaja por el espacio en forma de rayos solares.

La radiación solar directa, la radiación solar difusa y la radiación solar reflejada por la atmósfera, las nubes y la superficie terrestre constituyen la energía solar que llega a la Tierra. La radiación solar es captada y aprovechada mediante el uso de sistemas de captación de energía solar, como paneles solares fotovoltaicos y colectores solares. Estos sistemas convierten la energía solar en electricidad y calor respectivamente.

- **Paneles Solares Fotovoltaicos:** Están compuestos por células solares hechas de materiales semiconductores, como el silicio. Estas células solares son capaces de transformar la luz del sol directamente en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Cuando los fotones de luz solar golpean las células solares, los electrones en el material semiconductor se excitan y se mueven, generando una corriente eléctrica. Esta corriente se captura y se utiliza para alimentar dispositivos electrónicos o se almacena en baterías para uso posterior.
- **Colectores Solares:** Utilizan la radiación solar para calentar fluidos. Están compuestos por tubos o conductos que contienen un fluido, generalmente agua o una solución anticongelante. Cuando la radiación solar golpea los tubos, el fluido se calienta y puede ser utilizado para calentar agua en sistemas de calefacción o agua sanitaria. También se utilizan en sistemas de climatización solar, donde el calor captado se utiliza para enfriar o calentar espacios interiores.

Es importante mencionar que la radiación del sol que alcanza la superficie de la tierra puede verse afectada por varios factores, como la inclinación y orientación de los paneles solares, la presencia de nubes o neblina, y la contaminación atmosférica. Por lo tanto, es fundamental realizar estudios y mediciones precisas de la radiación solar en una región específica, como Lambayeque, para optimizar el diseño y la eficiencia de los sistemas solares.

3.3 IRRADIACIÓN E IRRADIANCIA

La irradiación solar es una medida de la potencia radiante por unidad de área que llega a una superficie expuesta al sol. Es una magnitud que describe la cantidad de energía solar que incide en un área determinada en un lapso de tiempo específico. La irradiación se expresa en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

La irradiancia solar, por otro lado, es la cantidad total de energía solar obtenida por unidad de área en un lapso de tiempo específico. Esta se consigue con la integración de la irradiación solar a lo largo del tiempo. La irradiancia se expresa en julios por metro cuadrado (J/m^2) o en waththoras por metro cuadrado (Wh/m^2).

Para medir la irradiancia y la irradiación solar, se utilizan instrumentos como los piranómetros y los actinómetros. Los piranómetros son dispositivos de captación de la radiación solar directa y difusa, midiendo la irradiancia solar total en una superficie horizontal. Por otro lado, los actinómetros miden la irradiancia solar directa utilizando un sensor montado en un seguidor solar para maximizar la captación de radiación solar directa.

Es importante comprender y medir correctamente la irradiancia y la irradiación solar, ya que son parámetros fundamentales para el diseño y la evaluación de sistemas solares, como los paneles fotovoltaicos y los sistemas de captación térmica. Estos sistemas dependen de la cantidad de energía solar de la que se disponga con el propósito de generar electricidad o calor.

Algunos términos relacionados con la irradiancia e irradiación solar se muestran a continuación:

- Radiación solar directa: Se conoce así a la radiación solar que llega directamente del sol sin ser dispersada o absorbida por la atmósfera de la tierra. Es la componente de radiación más intensa y se puede aprovechar directamente en sistemas solares.
- Radiación solar difusa: Es aquel tipo de radiación solar dispersada en la atmósfera por partículas, moléculas y nubes. Esta radiación proviene de todas las direcciones y contribuye a la iluminación y calentamiento general de una superficie.
- Radiación solar global: Es aquella obtenida de la adición de la radiación solar directa y difusa que llega a una superficie. Representa la radiación total que incide en una superficie expuesta al sol.
- Radiación extraterrestre: Es la radiación solar que llegaría a la zona superior de la atmósfera terrestre si no hubiera ninguna absorción o dispersión atmosférica. Es un valor teórico utilizado como referencia

3.4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ESTIMAR RADIACIÓN SOLAR

La estimación de la radiación solar es un aspecto crucial en el diseño y la evaluación de sistemas de energía solar. Para este propósito, se utilizan diversos modelos matemáticos que permiten estimar la irradiancia solar en un lugar y tiempo determinados. Estos modelos se basan en diferentes principios y variables meteorológicas para calcular la radiación solar incidente. En esta sección se analizan los modelos matemáticos más comunes utilizados para estimar la radiación solar para luego discutir sus ventajas y limitaciones.

Los modelos matemáticos empíricos se basan en relaciones estadísticas y empíricas entre variables meteorológicas y la radiación solar medida. Hacen uso de información histórica de radiación solar y variables meteorológicas para desarrollar relaciones matemáticas que permitan estimar la radiación solar en función de variables fácilmente medibles, como la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica y la cobertura de nubes. Estos modelos son más simples

y fáciles de implementar en comparación con los modelos físicos, pero su precisión puede verse limitada por las condiciones específicas del lugar de estudio y la disponibilidad de datos históricos.

Es importante destacar que la elección del modelo matemático más adecuado dependerá de varios factores, como la disponibilidad de datos, la precisión requerida, la complejidad del modelo y las características específicas del lugar de estudio. Además, la validación y calibración de los modelos con datos medidos son fundamentales para evaluar su precisión y mejorar su rendimiento en condiciones locales.

En términos de qué modelos son los mejores y los peores, es importante tener en cuenta que la eficacia de un modelo dependerá de las condiciones específicas del lugar de estudio y la disponibilidad de datos. Algunos modelos pueden funcionar mejor en ciertos escenarios o regiones geográficas, mientras que otros pueden ser más precisos en diferentes situaciones. No existe un modelo único que funcione de manera óptima en todas las situaciones. La selección del modelo debe basarse en la disponibilidad de datos, la precisión requerida y las características específicas del proyecto o estudio. Además, es recomendable realizar validaciones locales utilizando datos medidos para evaluar la precisión de los modelos en el lugar de interés.

Es importante tener en cuenta que ningún modelo matemático es perfecto y todos tienen cierto grado de incertidumbre. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis de sensibilidad y validaciones continuas para mejorar efectuar estimaciones más precisas de la radiación solar.

3.5 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR DE BRISTOW-CAMPBELL

Este modelo es uno de los modelos matemáticos de mayor uso para la estimación de la radiación solar. Se basa en la diferencia de máximas y mínimas temperaturas diarias y utiliza coeficientes específicos de la región para calcular la irradiancia solar. Aunque es ampliamente utilizado, este modelo puede subestimar la radiación solar en regiones con alta nubosidad.

Este modelo es conocido también como correlación BC. Para su utilización es necesario contar con los datos de temperaturas máximas y mínimas o promedios mensuales de la región a

estudiar. También, usan valores teóricos como la transmisividad de la atmósfera y la radiación terrestre incidente. (Bristow, Campbell, & Saxton, 1985)

$$\frac{H_g}{H_o} = a \cdot (1 - e^{-b(T_{max}-T_{min})^c})$$

Donde:

- a, corresponde a la transmisividad de la atmósfera.
- b y c, representan a las constantes específicas de la región.
- H_o , representa a la energía extraterrestre por día dependiente de la latitud y del día del año.
- $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, representa a la diferencia de temperaturas entre la máxima y mínima por día.
- H_g , es la radiación solar global

3.6 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR HARGREAVES-SAMANI

El modelo de Hargreaves-Samani es un modelo empírico simple que utiliza la diferencia de temperaturas diarias para efectuar una estimación de la radiación solar. Aunque es fácil de aplicar, este modelo puede no ser adecuado para regiones con variaciones estacionales significativas o en condiciones climáticas extremas.

Este modelo conocido como correlación HS, se basa en la diferencia entre temperaturas, máxima y mínima del aire del área a estudiar, debido a su relación con el grado de cobertura de las nubes. De este modo la diferencia de temperaturas se usa para indicar el nivel de radiación solar en la superficie terrestre. (Samani, 1985)

$$H = a \cdot H_o \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

Donde:

- H_o : radiación extraterrestre ya determinada.
- $T_{\text{máx}}$: máxima temperatura del día.
- T_{min} : mínima temperatura del día.
- a : es un parámetro de ajuste.
- H es la radiación solar a estimar

3.7 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ANNANDALE

Este modelo es una variación del de Hargreaves-Samani, que incluye una corrección por altitud, y proponen un nuevo coeficiente: (J., Jovanovic, Benadé, & Allen, 2002)

$$H = k \cdot H_o \cdot \sqrt{(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}$$

$$k = (1 + 2,7 * 10^{-5} * Z) * a$$

Donde:

- a representa al coeficiente planteado por Hargreaves
- H_o : radiación extraterrestre ya determinada.
- $T_{\text{máx}}$: máxima temperatura del día.
- T_{min} : mínima temperatura del día.
- Z ; es la elevación sobre el nivel del mar (m).
- H es la radiación solar a estimar

3.8 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ERTEKIN-YALDIZ

Este modelo matemático fue propuesto por Ertekin y Yaldiz para cuando no se cuenten con tantos datos. Se basan en la temperatura promedio y la radiación extraterrestre. (Ertekin & Yaldiz, 2000)

$$H = -4,46 + 0,477 * H_o + 0,22 * T_{avg}$$

Donde:

- T_{avg} : Es la temperatura promedio.
- H_o : radiación extraterrestre ya determinada.
- H es la radiación solar a estimar

3.9 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR CHEN

El modelo de Chen se basa en la diferencia de temperaturas diarias y utiliza un coeficiente específico para estimar la irradiancia solar. Este modelo es relativamente simple de aplicar y ha demostrado buenos resultados en algunas regiones, pero puede no ser adecuado en todas las condiciones climáticas.

Este método no requiere de calcular coeficientes, debido a que todos ya están determinados en la fórmula. Solo bastaría conocer la radiación extraterrestre y las temperaturas máximas y mínimas de la región a estudiar.

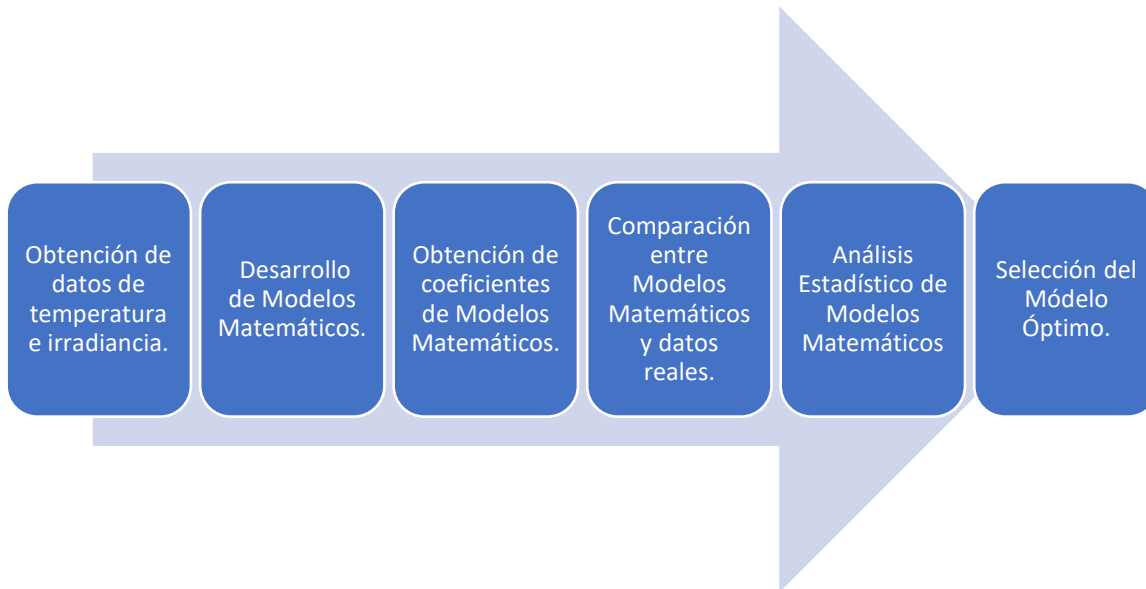
$$H = \{0,28 * \ln(T_{max} - T_{min}) - 0,15\} * H_o$$

Donde:

- H_o : radiación extraterrestre ya determinada.
- $T_{máx}$: máxima temperatura del día, o el promedio mensual.
- T_{min} : mínima temperatura del día, o el promedio mensual.
- H es la radiación solar a estimar

4.1 METODOLOGÍA

La metodología utilizada para llevar a cabo la presente investigación se puede resumir de la siguiente manera:



Los datos se obtendrán mediante la descarga de archivos alojados en la base de datos de la NASA y la extracción de datos meteorológicos al SENAEMI.

4.1.1 Variables e indicadores

Variable independiente

Temperaturas máximas y mínimas.

Variable dependiente

Irradiancia solar.

4.1.2 Unidad de Análisis

Irradiación solar diaria ($\text{kWh/m}^2/\text{día}$)

4.1.3 Tipo y Nivel de Investigación

Según la orientación general del proyecto, este tiene carácter cuantitativo debido a que se harán uso de datos estadísticos para comprobar un hecho. Evaluando la naturaleza del estudio es del tipo analítica ya que se utilizarán datos disponibles para la obtención de los resultados. Según el propósito de la investigación es de carácter aplicado ya que se adaptó distintos modelos matemáticos para obtener datos reales. Al evaluar la investigación según su diseño, esta tesis presenta un carácter del tipo confirmatorio, ya que se establecerá que modelo es el más preciso.

4.1.4 Periodo de Análisis

Los datos experimentales que se utilizan en el desarrollo de los modelos matemáticos se derivan de mediciones de SENAEMI Zonal 2 Lambayeque, durante el periodo de 2014 al 2019.

4.1.5 Fuentes de Información e Instrumentos

Para usar los modelos matemáticos es necesario contar con información real, como las temperaturas mínimas y máximas en la región a estudiar, la radiación extraterrestre y datos atmosféricos generales.

Los datos de irradiación global tanto directa como difusa, fueron extraídos de la Surface Meteorology and Solar Energy, Atmospheric Science Data Center de la NASA.

Los datos meteorológicos fueron adquiridos del sitio web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAEMI), el cual brinda información en las áreas de hidrología, meteorología, agrometeorología y asuntos ambientales en el Perú, desde hace más de 13 años. Es con estos datos con los que se compara cada modelo matemático para corroborar su efectividad y la precisión con la que miden.

4.1.6 Técnicas de recolección y procesamiento de datos

Para poder usar los modelos matemáticos es necesario contar con información real es decir las temperaturas mínimas y máximas en la región de estudio.

4.1.7 Análisis estadístico de los datos

Para efectuar la validación y comparación de los diversos modelos se hizo uso de los siguientes estimadores estadísticos:

- Factor de determinación $[R^2]$ la cual establece qué tan bien la línea de regresión este mas cerca al punto de distribución, el modelo más eficiente se mostrara cuando $[R^2]$ este más cerca la unidad.
- Error medio cuadrático porcentual $[RMSE\%]$ que representa el producto de cada modelo.
- Evaluando la desviación entre la estimación y el valor observado, si RMSE es mínimo, esto significa que el modelo tiene un mejor rendimiento.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}}$$
$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} * 100$$

- Error medio de sesgo porcentual $[MBE\%]$ a la par que RMSE, indica el desempeño del modelo y también refiere si el modelo utilizado tiende a sobreestima o subestima.

$$MBE = \sum \frac{y_i - \bar{y}_i}{n}$$
$$\%MBE = \frac{MBE}{\bar{y}} * 100$$

Donde:

y_i : Dato estimado, \bar{y}_i : Dato medido, n : Número de datos.

5.1 DATOS DE TEMPERATURA

Considerando un espacio muestral constituido por un conglomerado de datos de temperaturas promedio tanto máximas y mínimas por día que fueron registradas por el SENAMHI Zona 2 – Lambayeque para el período 2014 -2019 en la estación meteorológica de Lambayeque, se procede a fijar la temperatura máxima y mínima promedio mensual, en el periodo mencionado.

Tabla 1 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima provincia de Lambayeque 2014

Mes	Tmax	Tmin
Enero	29,0	21,2
Febrero	28,6	21,0
Marzo	29,5	20,8
Abril	27,6	18,8
Mayo	27,5	21,1
Junio	26,4	20,0
Julio	23,7	16,9
Agosto	23,3	16,1
Setiembre	23,4	16,0
Octubre	23,4	17,0
Noviembre	23,4	17,2
Diciembre	26,4	18,0
Promedio	26,0	18,7

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

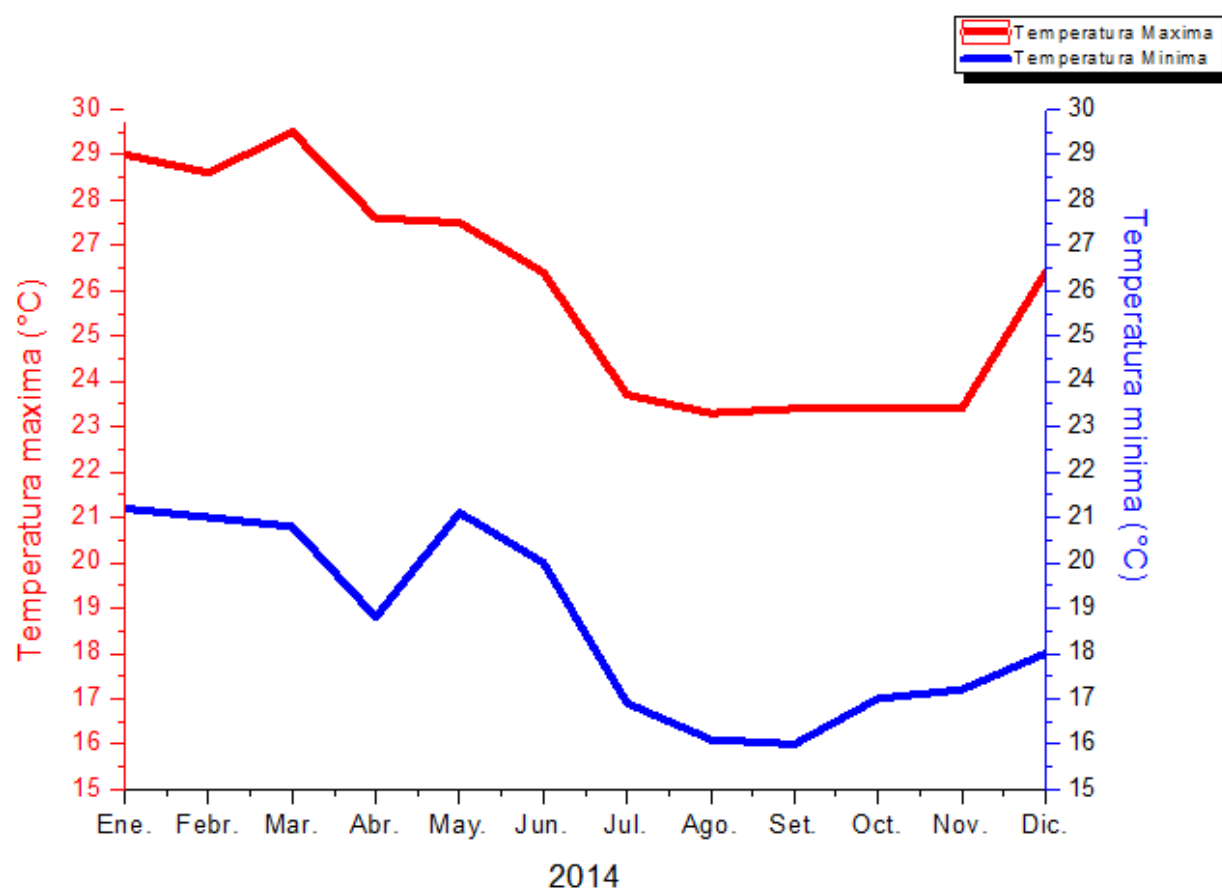


Figura 1: Temperaturas máxima y mínima de Lambayeque en el año 2014.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2015

Mes	<u>Tmáx</u>	<u>Tmín</u>
Enero	26,3	20,4
Febrero	28,9	21,3
Marzo	29,6	22,3
Abril	28,8	21,3
Mayo	27,5	21,5
Junio	24,6	20,5
Julio	24,9	19,6
Agosto	23,6	18,7
Setiembre	24,3	18,3
Octubre	24,3	18,1
Noviembre	24,6	20,1
Diciembre	26,5	20,9
Promedio	26,3	20,3

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

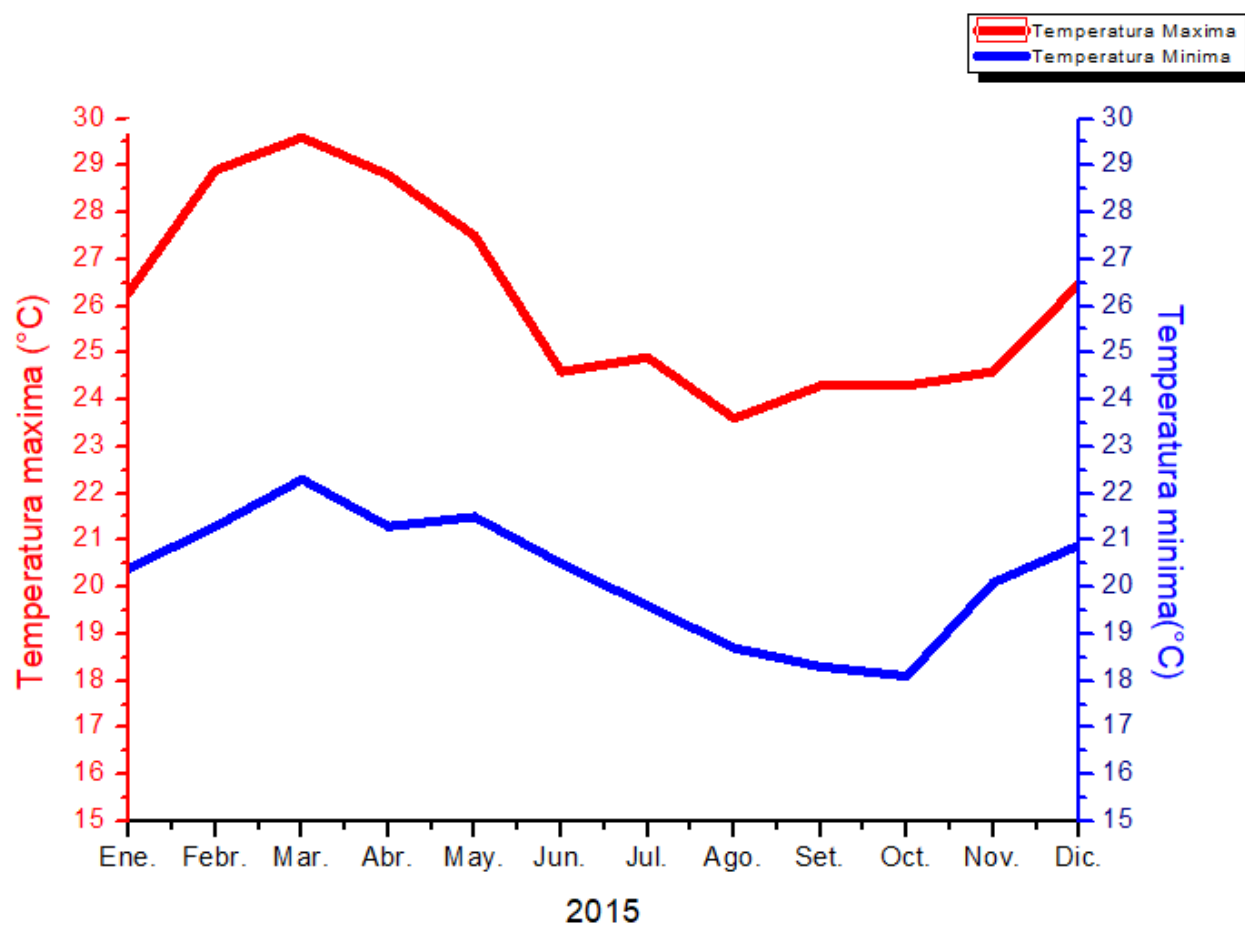


Figura 2 Temperaturas máxima y mínima en Lambayeque año 2015.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual provincia de Lambayeque 2016

Mes	Tmáx	Tmín
Enero	27,9	22,4
Febrero	30,0	23,1
Marzo	30,5	22,5
Abril	28,2	20,5
Mayo	26,2	18,2
Junio	25,2	17,4
Julio	24,2	16,6
Agosto	23,8	16,6
Setiembre	23,7	17,0
Octubre	24,0	16,9
Noviembre	24,8	16,5
Diciembre	26,4	18,5
Promedio	26,2	18,9

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

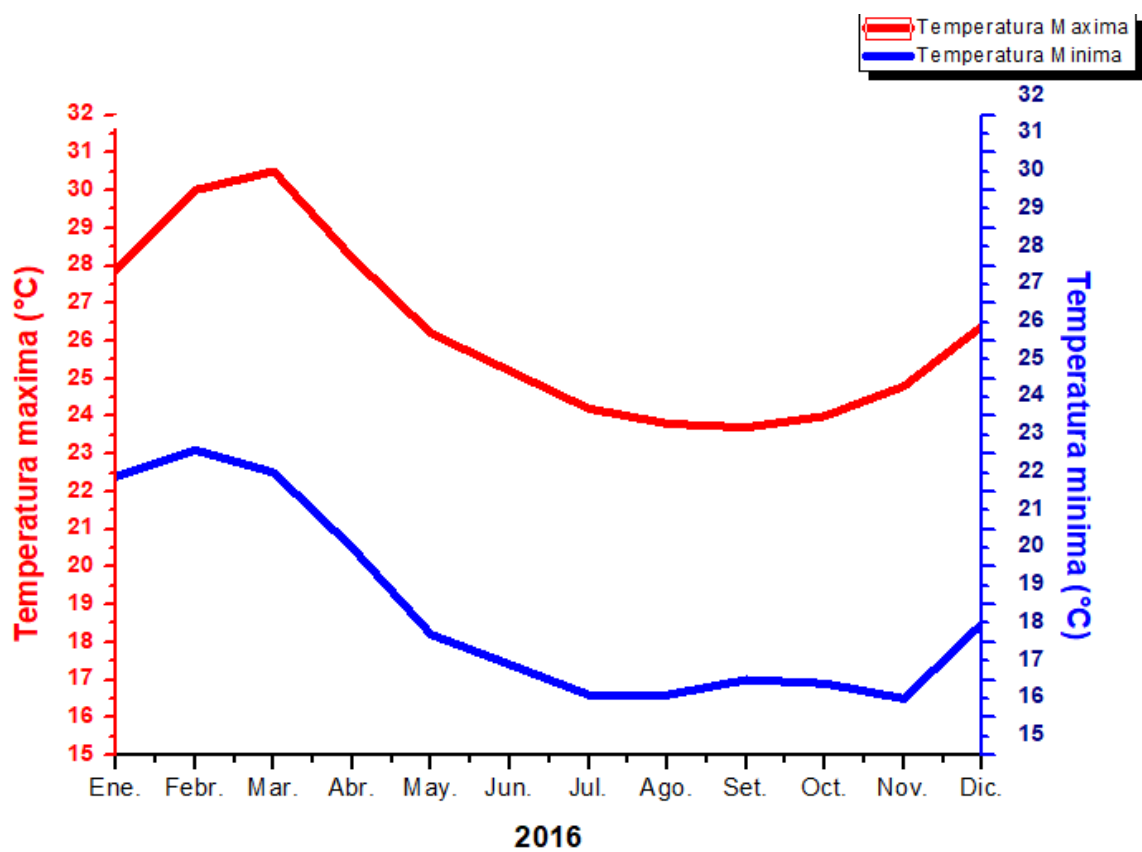


Figura 3: Temperatura máxima y mínima en Lambayeque año 2016.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2017

Mes	Tmáx	Tmín
Enero	30,5	21,0
Febrero	31,7	22,3
Marzo	31,6	23,5
Abril	28,4	20,6
Mayo	27,0	18,8
Junio	25,3	18,0
Julio	22,4	16,3
Agosto	22,9	16,0
Setiembre	23,1	15,7
Octubre	23,1	15,5
Noviembre	23,6	14,9
Diciembre	26,5	16,5
Promedio	26,3	18,3

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

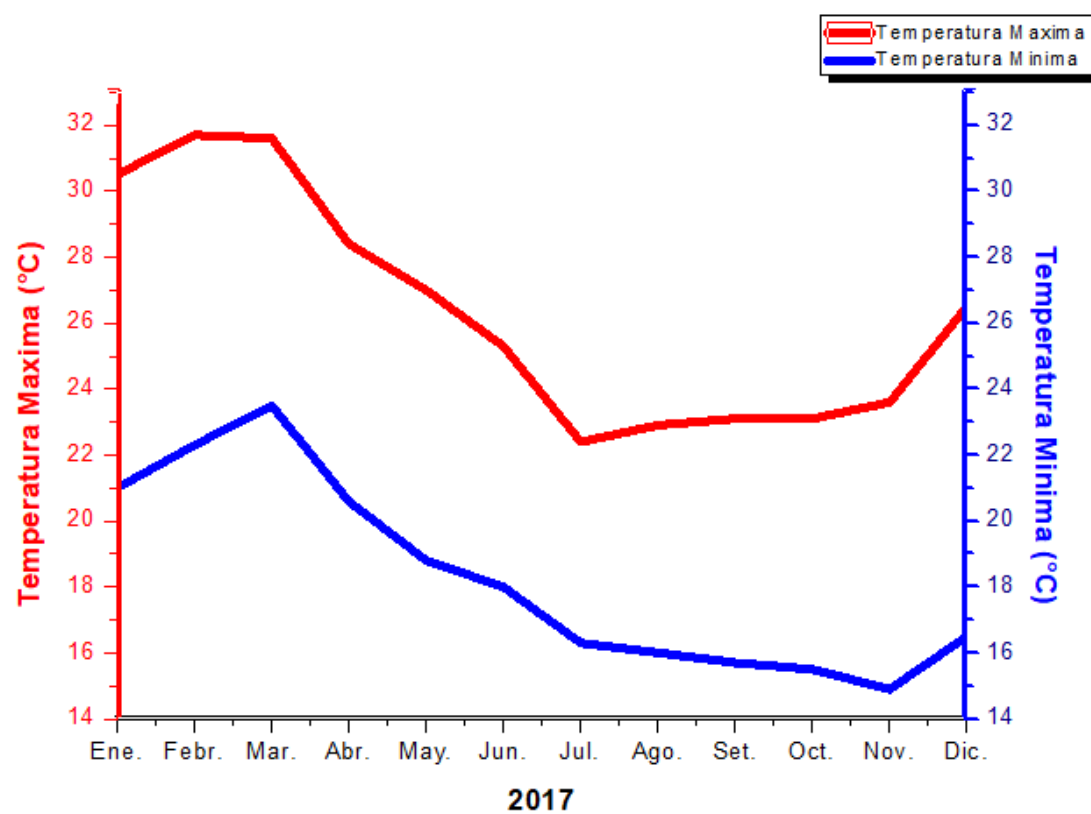


Figura 4: Temperatura máxima y mínima en Lambayeque año 2017.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2018

Mes	Tmáx	Tmín
Enero	27,8	18,7
Febrero	28,5	20,2
Marzo	27,1	19,2
Abril	27,1	18,8
Mayo	24,4	17,4
Junio	22,4	16,7
Julio	22,7	16,3
Agosto	22,6	16,0
Setiembre	22,9	15,9
Octubre	24,2	16,5
Noviembre	25,6	18,3
Diciembre	27,6	19,7
Promedio	25,2	17,8

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

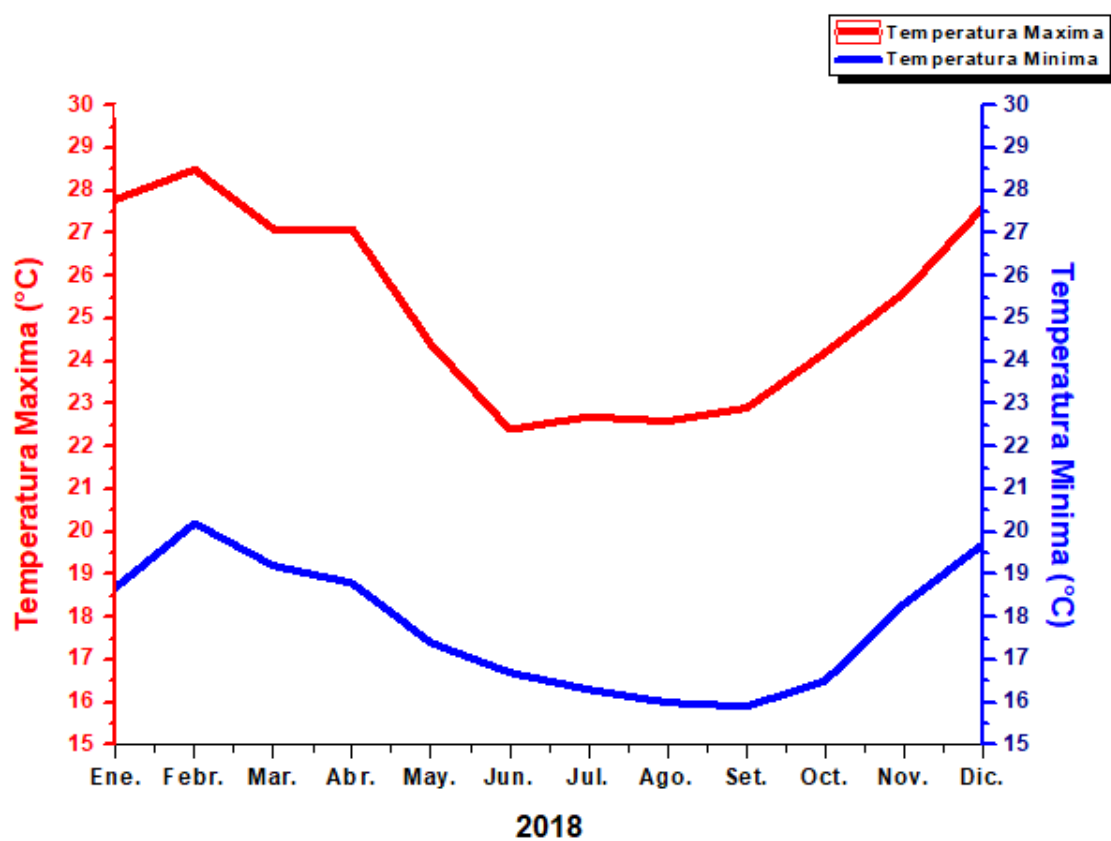


Figura 5 : Temperatura máxima y mínima en Lambayeque año 2018.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Promedio mensual de temperaturas máxima y mínima de Lambayeque 2019

Mes	Tmáx	Tmín
Enero	29,9	21,8
Febrero	30,3	23,6
Marzo	29,0	21,2
Abril	27,2	19,8
Mayo	26,9	19,1
Junio	24,5	17,1
Julio	22,3	15,9
Agosto	21,5	15,2
Setiembre	22,4	15,6
Octubre	23,2	16,0
Noviembre	24,5	17,7
Diciembre	26,9	19,7
Promedio	25,7	18,6

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

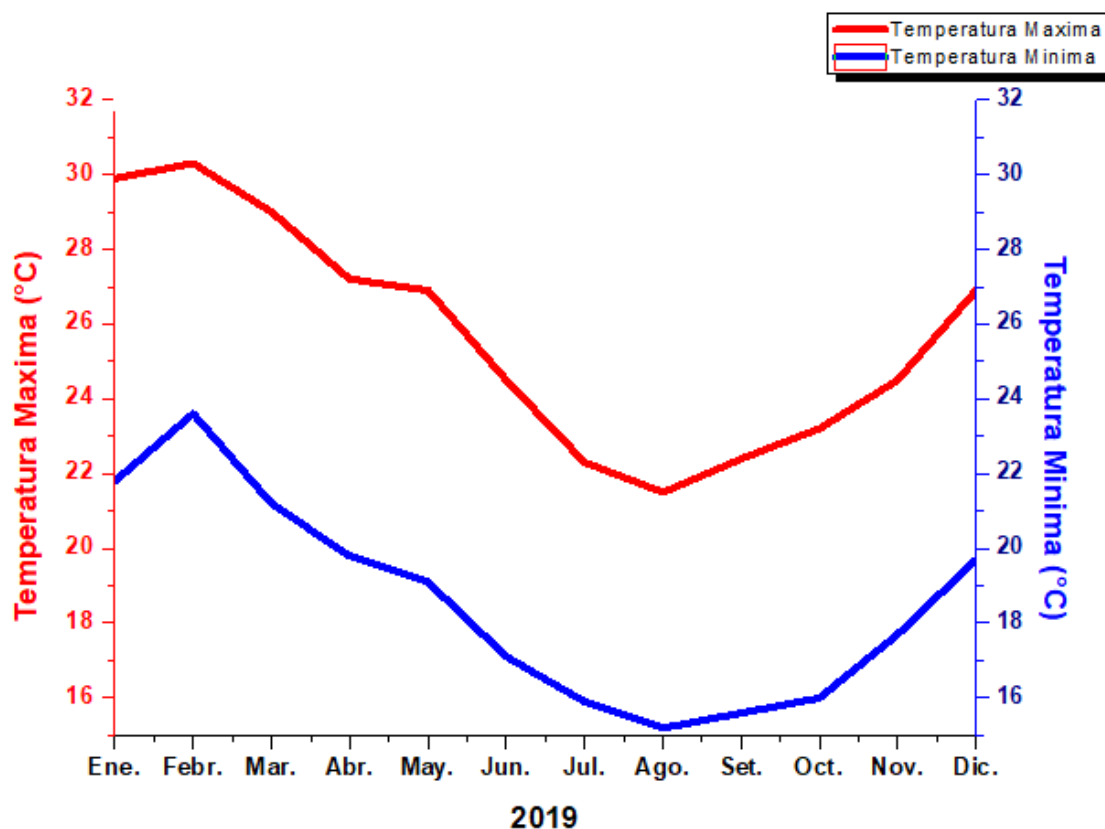


Figura 6: Temperatura máxima y mínima en Lambayeque año 2019.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 DATOS DE IRRADIACIÓN

La información acerca de irradiación global, directa y difusa que fueron obtenidos de la Prediction Of Worldwide Energy Resources de la NASA (NASA, 2018) corresponden a la duración de la radiación media mensual durante un período de 22 años (de julio de 1983 a junio de 2005) sobre la superficie horizontal de la región entre las latitudes -6,5 y 7,5 grados de latitud y -80 y -79 grados de latitud.

En las tablas 7, 8 y 9 brindan los promedios por mes de los tres tipos de radiación; global, directa y difusa en la ciudad de Lambayeque

Tabla 7: Irradiación global promedio en un plano horizontal [kWh/m²/día]

Mes	Irradiación Global (kWh/m ² /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

Fuente: (NASA, 2018)

Tabla 8: Irradiación global 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

Fuente: (NASA, 2018)

Tabla 9: 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

Fuente: (NASA, 2018)

5.3 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR BRISTOW-CAMPBELL

Este modelo es uno de los adecuados también se reconoce como ecuación BC, que utiliza el diferencial de temperatura máxima y mínima diarias o medias mensuales de estos valores, también usa indicadores teóricos de radiación extraterrestre, que son accesibles de obtener.

Este modelo (Bristow, Campbell, & Saxton, 1985) toma indicadores de entrada en fenómenos físicos exponenciales típicos y restringe sus valores máximos y mínimos a valores posibles dentro de su rango de variación.

Es decir, la energía máxima que puede ser alcanzada es un evento extraterrestre, y en un día totalmente cubierto la energía es cero.

$$\frac{H_g}{H_o} = a \cdot (1 - e^{-b(T_{max}-T_{min})^c})$$

Donde:

a, es la transmisividad de la atmosfera.

b y c, son indicadores de relación que son precisados a tomar en cuenta en el efecto del incremento del gradiente de temperatura sobre la máxima transmitancia de la atmósfera. Estos indicadores se muestran de la siguiente manera:

$$b = 0,107c^{-2,6485}$$

$$c = 2,116 - 0,072\Delta T + 57,574\exp(\varphi)$$

H_o , es la energía extraterrestre diaria dependiente de la latitud (φ) y día del año

H_g , es la radiación solar global

$\Delta T = T_{max} - T_{min}$, es el diferencial de temperaturas entre la máxima y mínima diarias.

Esta ecuación se puede manifestar de la consecuente forma para acondicionar al ajuste por mínimos cuadrados:

$$\frac{H_g}{H_o} = a \cdot (1 - e^{-b(T_{max}-T_{min})^c})$$

Luego de desarrollar el modelo Bristow-Campbell (BC) se adquieren los siguientes factores:

$$a = 0,75 \quad , \quad b = 0,05 \quad , \quad c = 1,50$$

Estos se ven corroborados por (Camayo-Lapa et al., 2015) (Anexo 1)

Figura 7: Adecuación del modelo de Bristow-Campbell

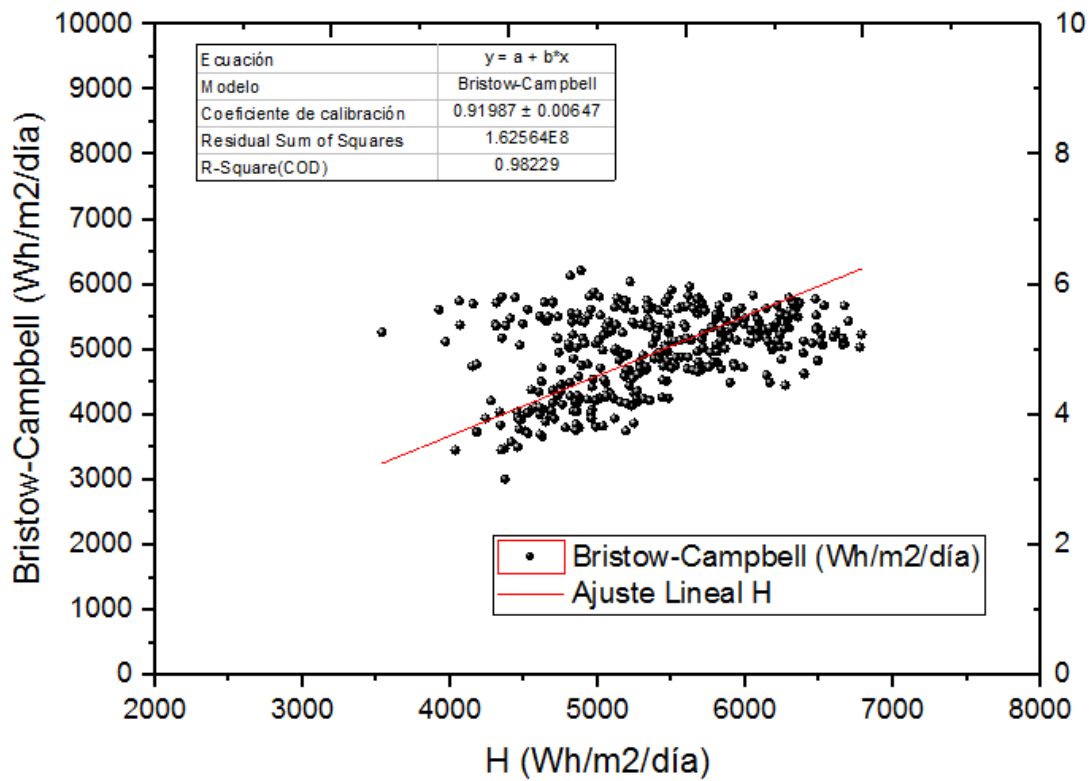


Tabla 10: Indicadores estadísticos para el modelo de Bristow-Campbell

Parámetro	Valor
Modelo	<i>Bristow-Campbell</i>
Factor de calibración	0,9191
Número de Datos Utilizados	365
Factor de Determinación R^2	0,98221
RMSE	668,2841
RMSE%	13,1191%
MBE	-125,4321
MBE%	-0,5781%

Fuente: Elaboración propia

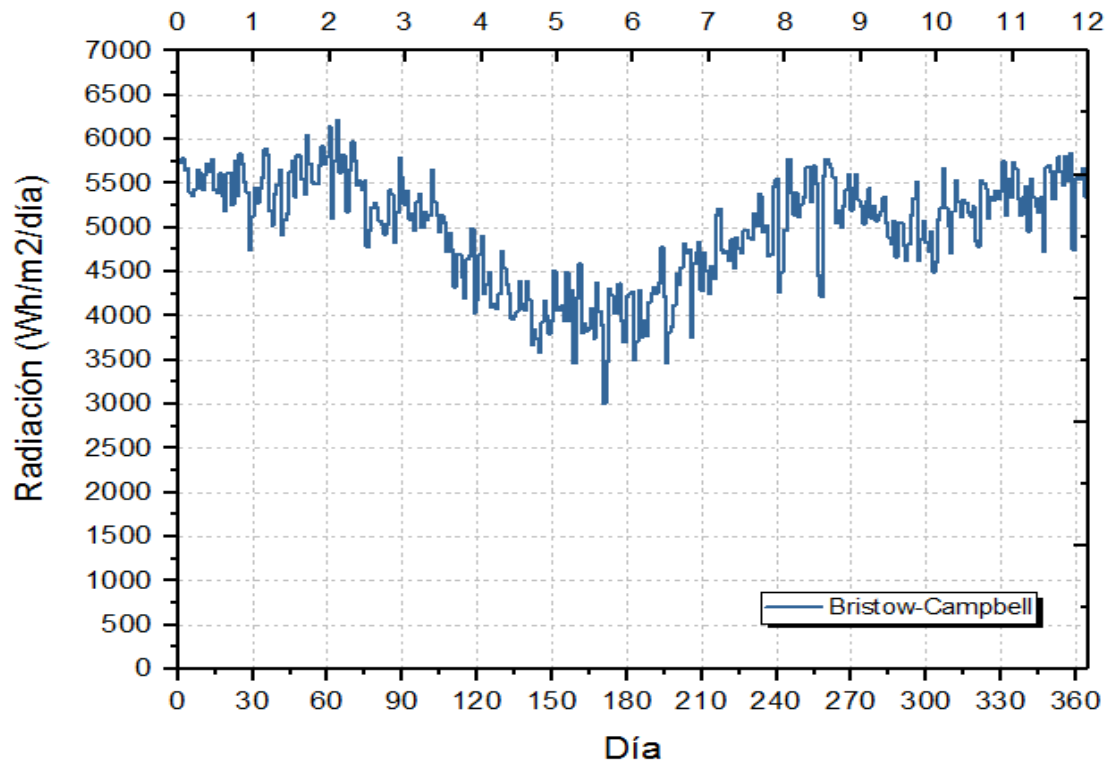


Figura 8: Datos estimados por Bristow-Campbell

Fuente: Elaboración propia

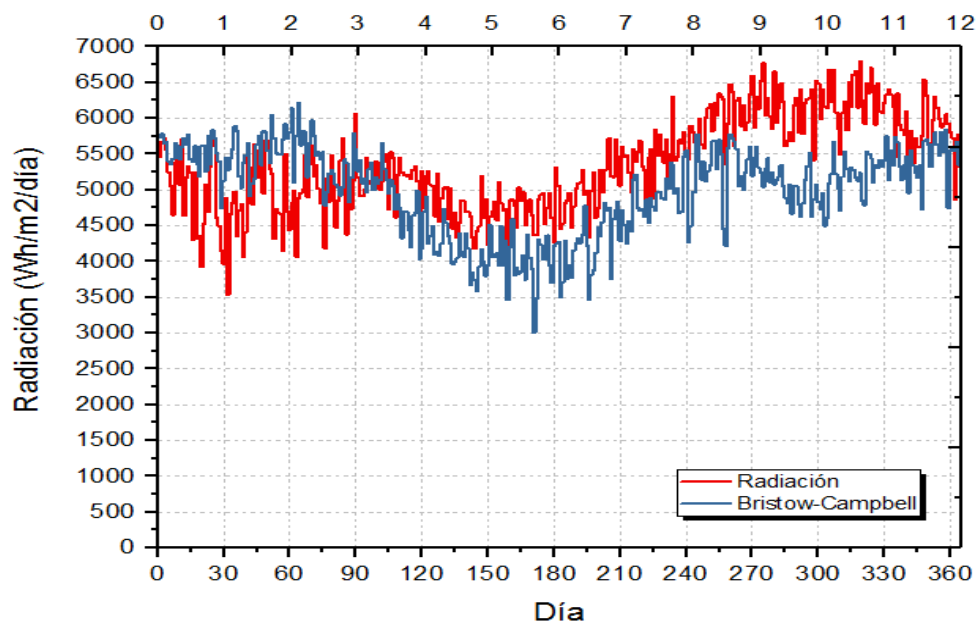


Figura 9: Análisis entre los datos estimados por el modelo de BC y los datos obtenidos de NASA.

Fuente: Elaboración propia

5.4 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR HARGREAVES-SAMANI

Este modelo empírico simple utiliza las temperaturas máximas y mínimas diarias del aire del área a estudiar para estimar la radiación solar. Aunque es fácil de aplicar, este modelo puede no ser adecuado para regiones con variaciones estacionales significativas o en condiciones climáticas extremas. (Samani, 1985)

$$H = a \cdot H_o \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

Donde:

- H_o : radiación extraterrestre ya definida.
- $T_{m\acute{a}x}$: temperatura máxima del día, o el promedio mensual.
- $T_{m\acute{i}n}$: temperatura mínima del día, o el promedio mensual
- a : es una constante de ajuste.
- H . es la radiación solar a estimar.

Para desarrollar este modelo, se tuvo que comparar la radiación extraterrestre (calculada en la sección anterior) la cual debe multiplicarse por la raíz cuadrada a la diferencia de temperatura con los datos de radiación de esta localidad. De esta forma, utilizando la corrección de mínimos cuadrados, se puede obtener la constante "a" de Hargreaves-Samani, con la cual el modelo estima la radiación solar en Lambayeque con el menor error posible.

Para obtener el desarrollo del modelo de Hargreaves-Samani, en primer lugar se obtiene el cálculo de los valores de diferencia de temperatura máxima y mínima.

Para lograr la coincidencia y el desarrollo del modelo, utilizamos el software OriginPro y obtuvimos la coincidencia que se muestra en la Figura 10 y los parámetros estadísticos que se muestran en la Tabla 11.

Los patrones de radiación estimados por el modelo de Hargreaves-Samani se muestran en la Fig.11 y se comparan con los valores de radiación reales en la Fig.12.

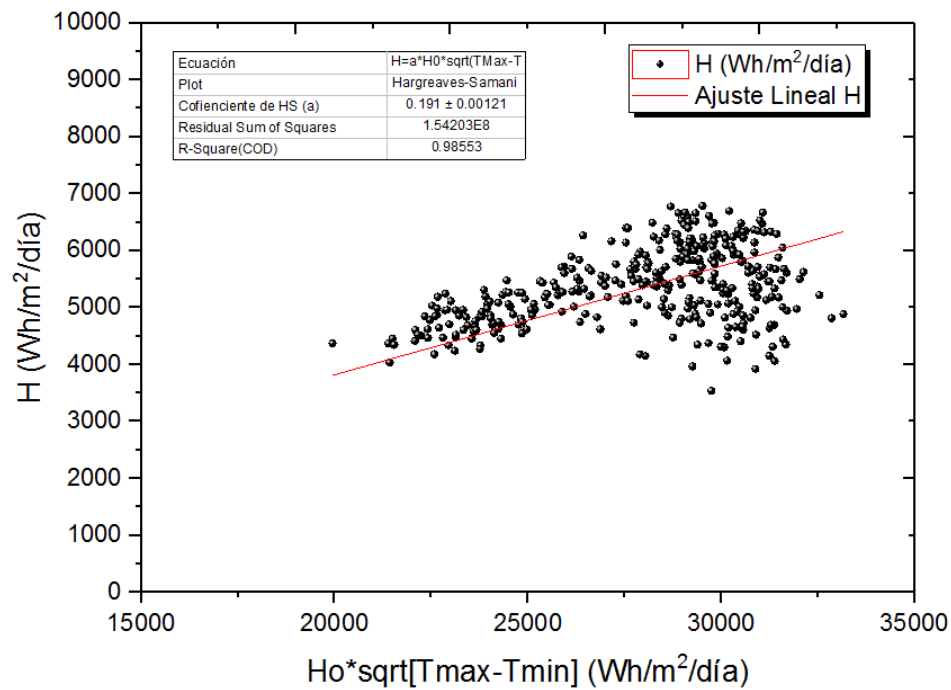


Figura 10: Adaptación del modelo de Hargreaves-Samani.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51: Indicadores estadísticos para el modelo de Hargreaves-Samani.

Parámetro	Valor
Módulo	Hargreaves-Samani
Factor Encontrado	0,1911
Número de Valores Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0,98551
RMSE	650,8721
RMSE%	12,1191%
MBE	-25,6331
MBE%	-0,4781%

Fuente: Elaboración propia

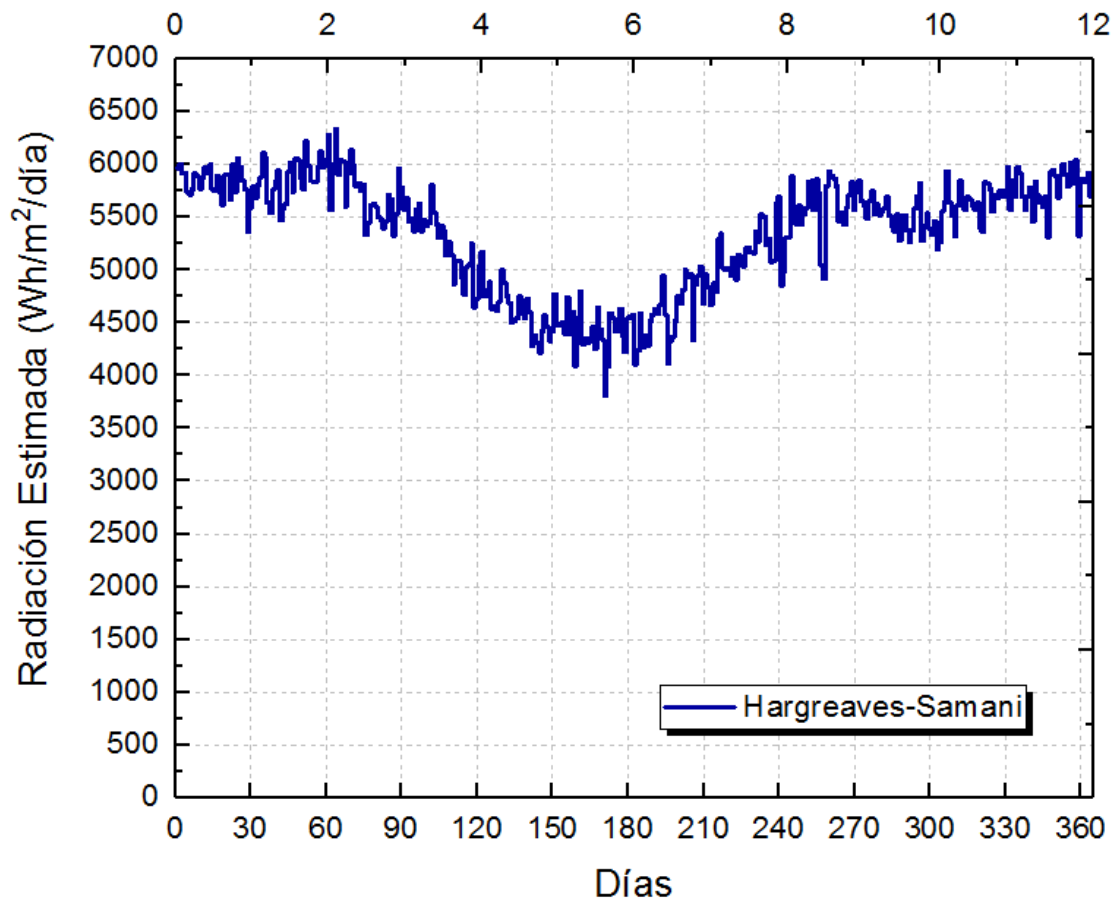


Figura 11: Datos estimados por el modelo de Hargreaves-Samani

Fuente: Elaboración propia

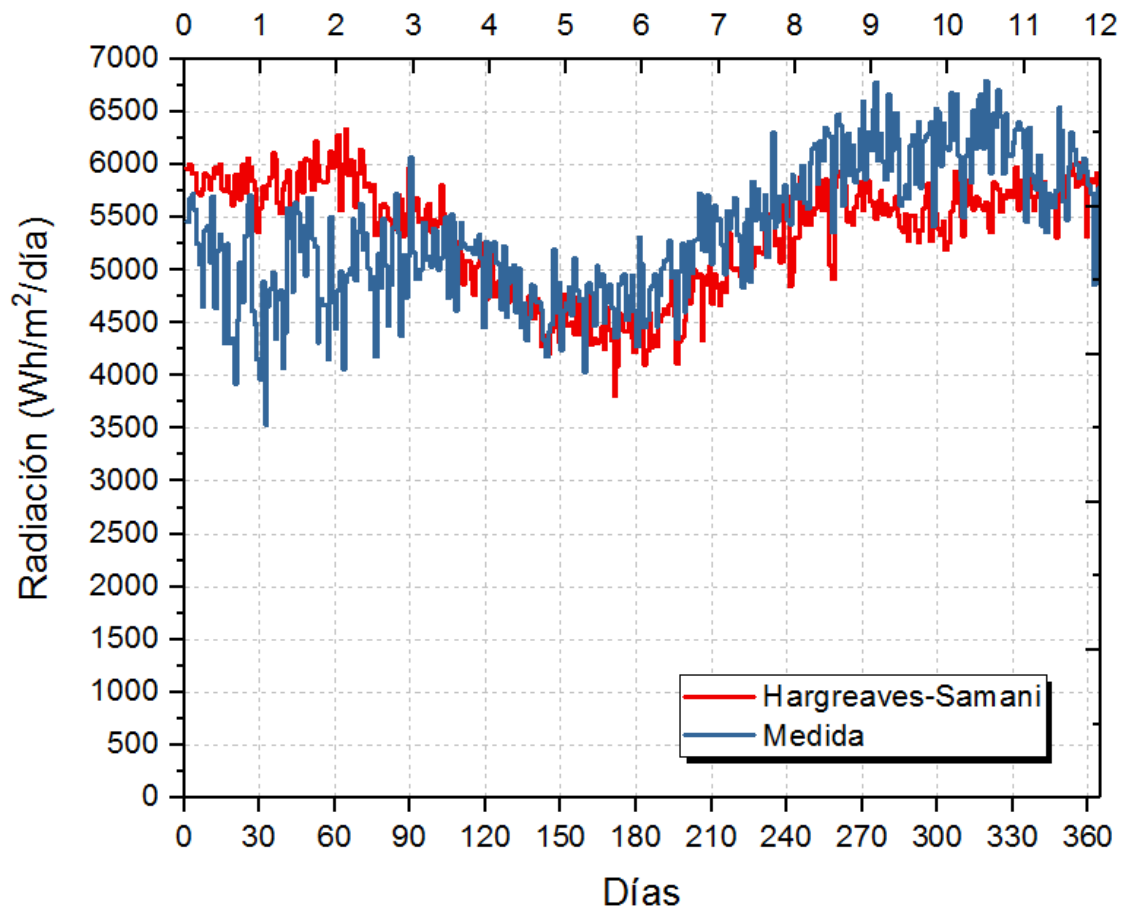


Figura12: Análisis entre los datos estimados por el modelo de Hargreaves-Samani y los datos obtenidos de NASA.

Fuente: Elaboración propia

5.5 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ANNANDALE

Este modelo es una modificación del de Hargreaves-Samani, que incluye una relación por altitud, y proponen un nuevo coeficiente: (J., Jovanovic, Benadé, & Allen, 2002)

$$H = k \cdot H_o \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

$$k = (1 + 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot a$$

Donde:

○ a es el factor planteado por Hargreaves

○ z es la altura sobre el nivel del mar (m).

Se encontró que el coeficiente de Hargreaves-Samani es igual a 0.193. La provincia de Lambayeque ubica a 18 metros sobre el nivel del mar. Por lo tanto, la varianza del modelo de Annandale será ínfima y su factor:

$$k = (1 + 2,7 * 10^{-5} * 18) * 0,191$$

$$k = 0,191$$

Esto significa que hay menos de 3 cifras significativas, por lo que los cálculos del modelo de Annandale se consideran exactamente iguales a los cálculos del modelo de Hargreaves-Samani.

Las estimaciones del modelo de Annandale se muestran en la Figura 13.

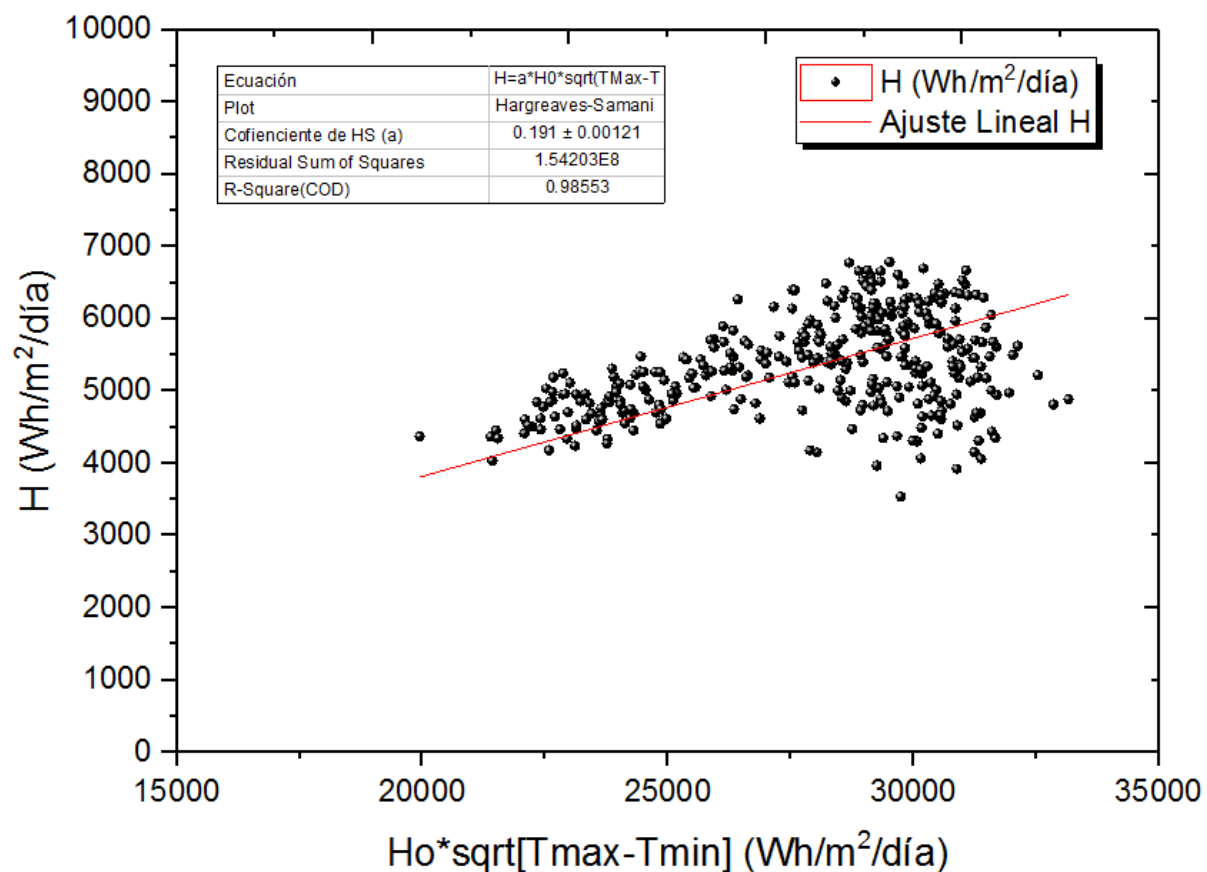


Figura 13: Análisis entre los datos estimados por el modelo de Annandale y los datos obtenidos de NASA.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Indicadores estadísticos para el modelo de Annandale.

Parámetro	Valor
Módulo	Annandale
Factor Encontrado	0,1911
Número de Valores Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0,98551
RMSE	650,8721
RMSE%	12,1191%
MBE	-25,6331
MBE%	-0,4781%

Fuente: Elaboración Propia

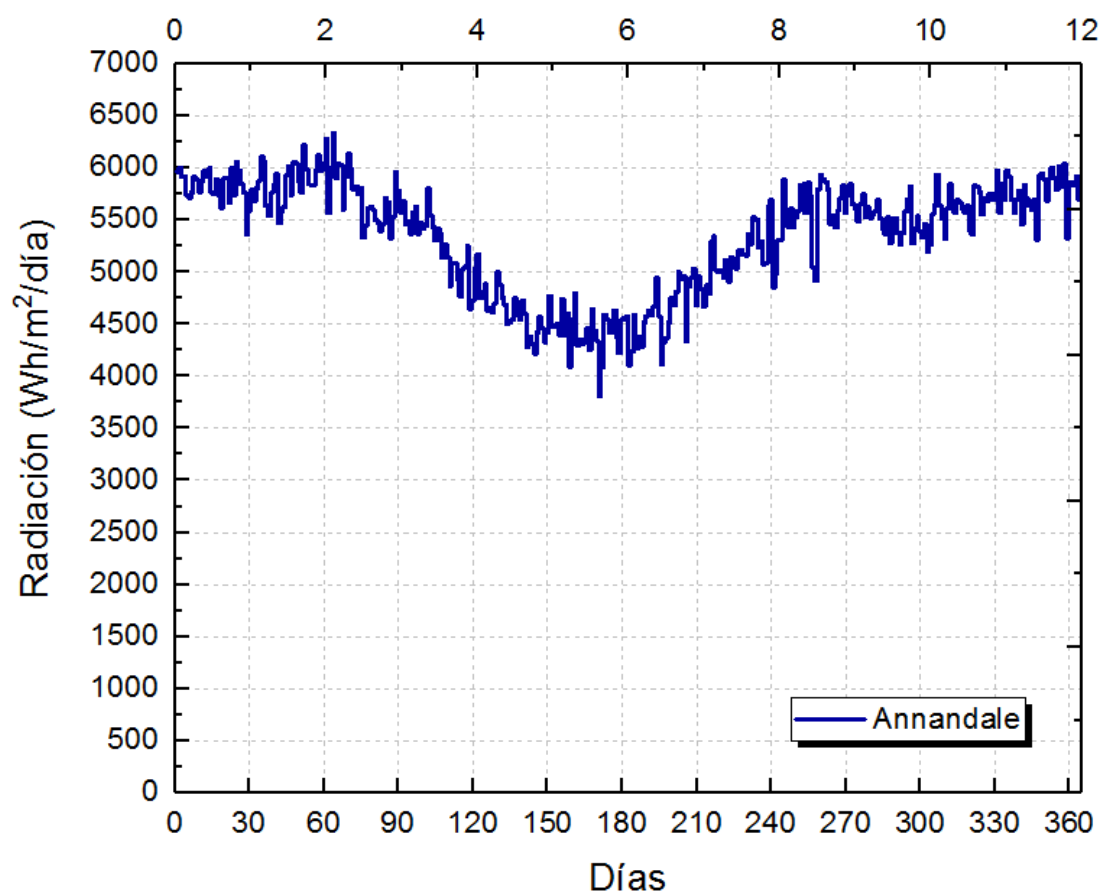


Figura 14: Datos estimados por la ecuación de Annandale.

Fuente: Elaboración propia

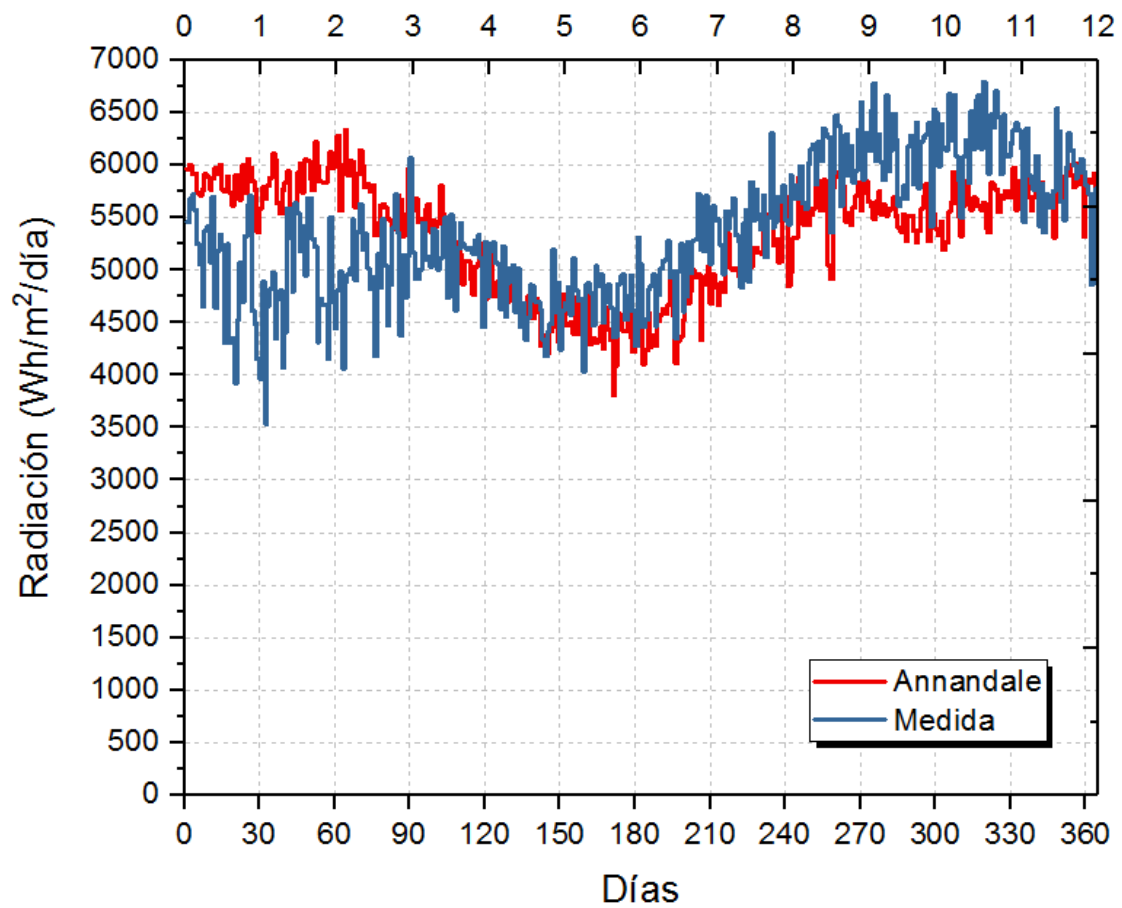


Figura 15: Análisis entre valores estimados por Anandale y los datos obtenidos de NASA.

Fuente: Elaboración propia

5.6 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR ERTEKIN-YALDIZ

Ertekin y Yaldiz propusieron una ecuación matemática para cuando no se cuentan con tantos datos. Se basan en la temperatura promedio y la radiación extraterrestre. (Ertekin & Yaldiz, 2000)

$$H = -4,46 + 0,477 * H_o + 0,22 * T_{avg}$$

Donde:

○ T_{avg} : Es la temperatura promedio.

○ H : Es la radiación solar a estimar

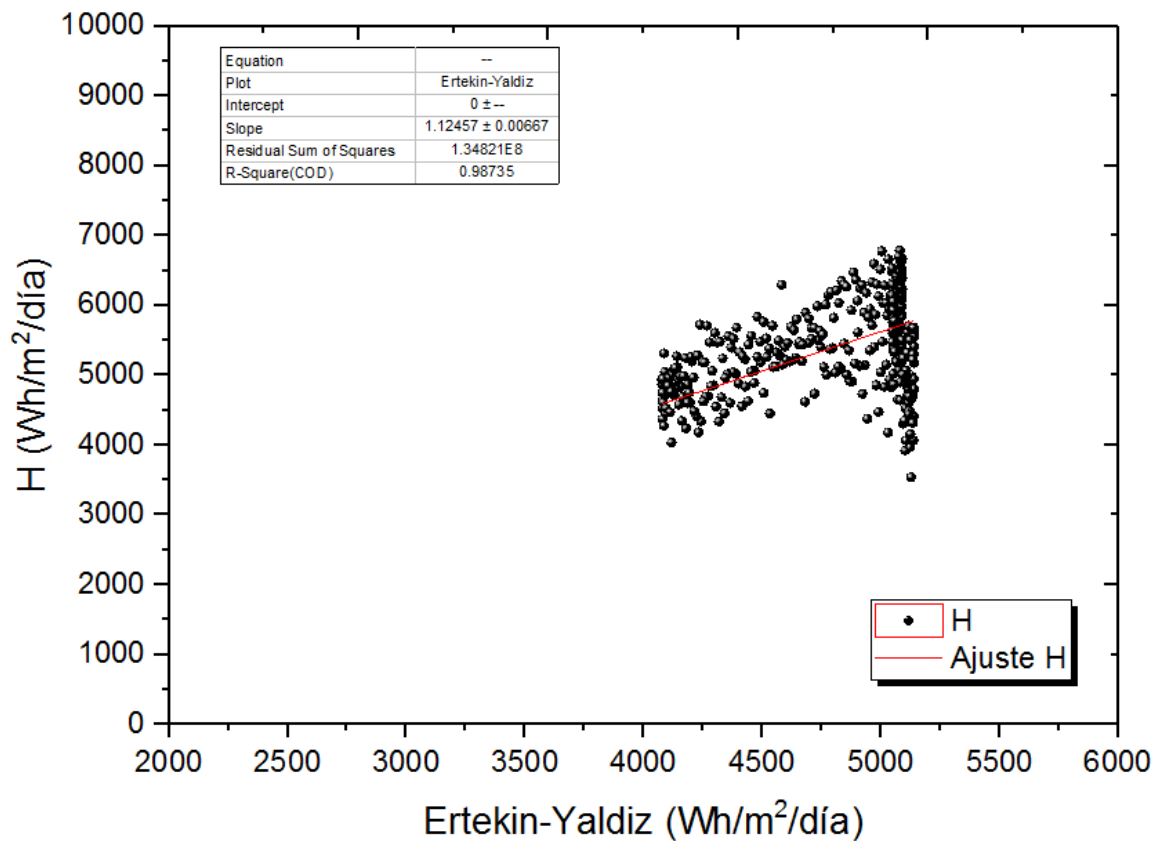


Figura 16: Adecuación del modelo de Ertekin-Yaldiz

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17: Indicadores estadísticos para el modelo de Erlekin-Yaldiz

Parámetro	Valor
Módulo	Ertekin-Yaldiz
Factor de Calibración	1,125
Número de Datos Utilizados	365
Factor de Determinación R²	0,98735
RMSE	608,5951
RMSE%	11,3471%
MBE	-11,6101
MBE%	-0,2161%

Fuente: Elaboración propia

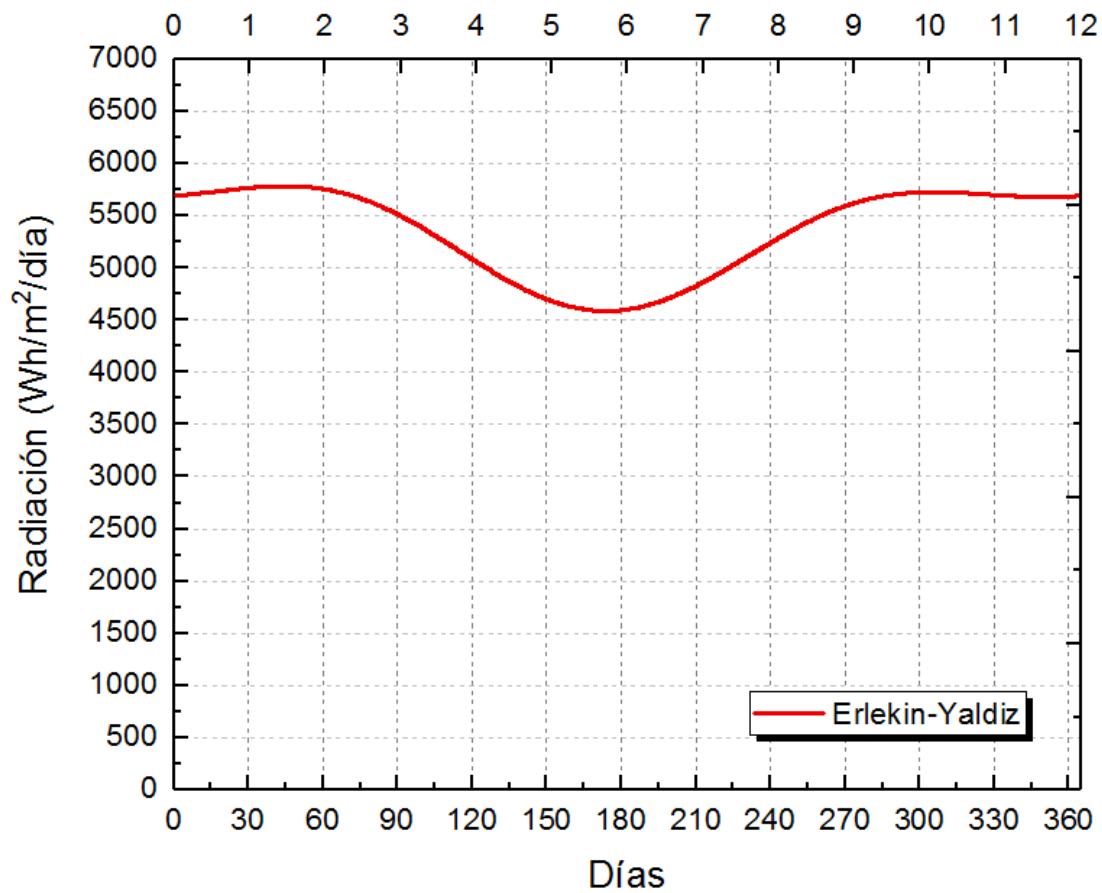


Figura 17 Estimación del modelo de Erlekin-Yaldiz

Fuente: Elaboración propia

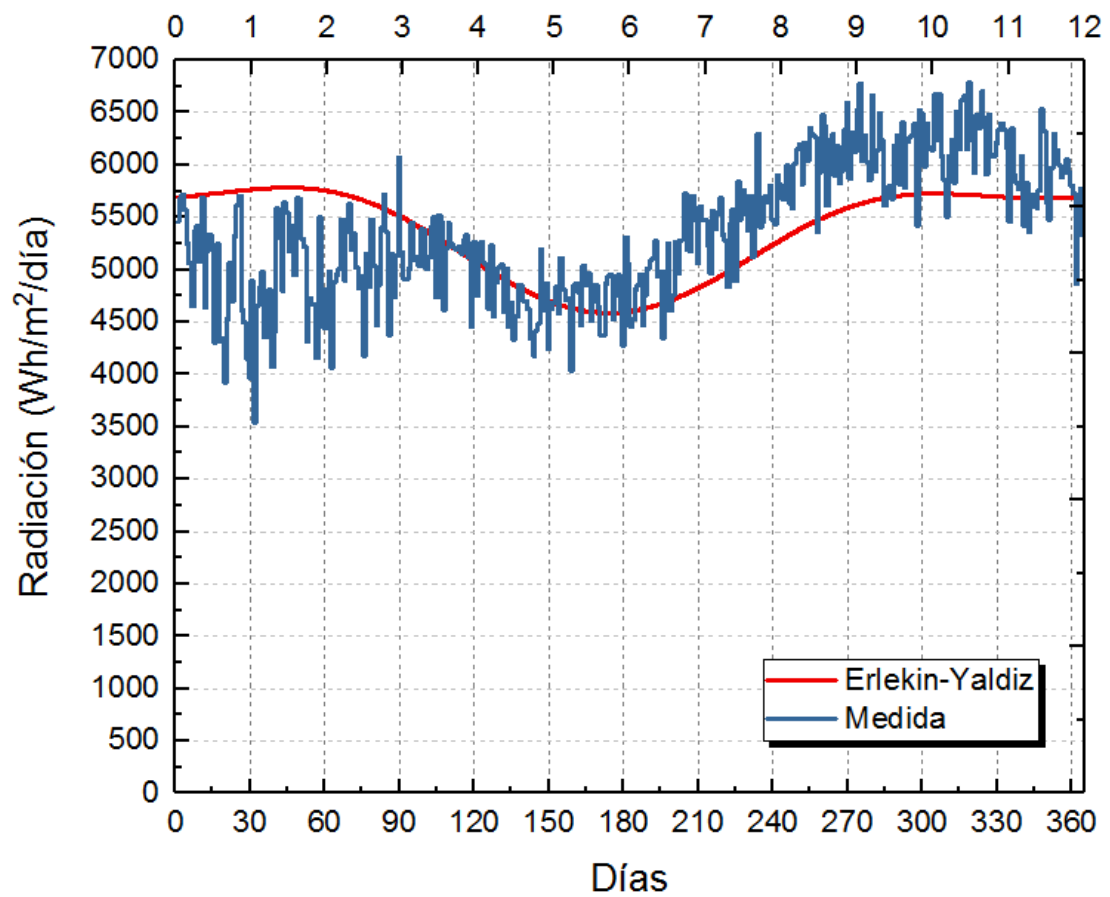


Figura 18: Análisis entre los datos estimados por el modelo de Erketin-Yaldiz y los datos obtenidos de NASA.

Fuente: Elaboración propia

5.7 MODELO DE IRRADIANCIA SOLAR CHEN

Se basa en el diferencial de temperaturas máximas y mínimas diarias y utiliza un coeficiente específico para estimar la irradiancia solar. Este modelo es relativamente simple de aplicar y ha demostrado buenos resultados en algunas regiones, pero puede no ser adecuado en todas las condiciones climáticas.

Este método no requiere de calcular coeficientes, debido a que todos ya están determinados en la fórmula. Solo basta conocer la radiación extraterrestre y las temperaturas máximas y mínimas de la región a estudiar. (Chen, Ersi, Yang, Lu, & Zhao, 2004)

$$H = \{0,28 * \ln(T_{max} - T_{min}) - 0,15\} * H_o$$

Al desarrollar el modelo, obtenemos las estimaciones que se muestran en la Figura 19. Los valores estadísticos se muestran en la Tabla 14.

$$H = H_o * 0,28 \ln(T_{max} - T_{min}) - H_o * 0,15$$

$$H = -H_o * 0,15 + H_o * 0,28 * \ln(T_{max} - T_{min})$$

$$y = a - b * \ln(x - c)$$

Dado que la variable independiente es la diferencia de temperatura, se tendrá los valores de a, b y c como:

$$a = -H_o * 0,15$$

$$b = H_o * 0,28$$

$$c = 0$$

Coeficiente de calibración 1,252.

$$H = 1,252 * [Ho * 0,28 \ln(T_{max} - T_{min}) - Ho * 0,15]$$

Esto resulta en la ecuación de Chen calibrada en Lambayeque:

$$H = 0,350 * Ho * \ln(T_{max} - T_{min}) - 0,188 * Ho$$

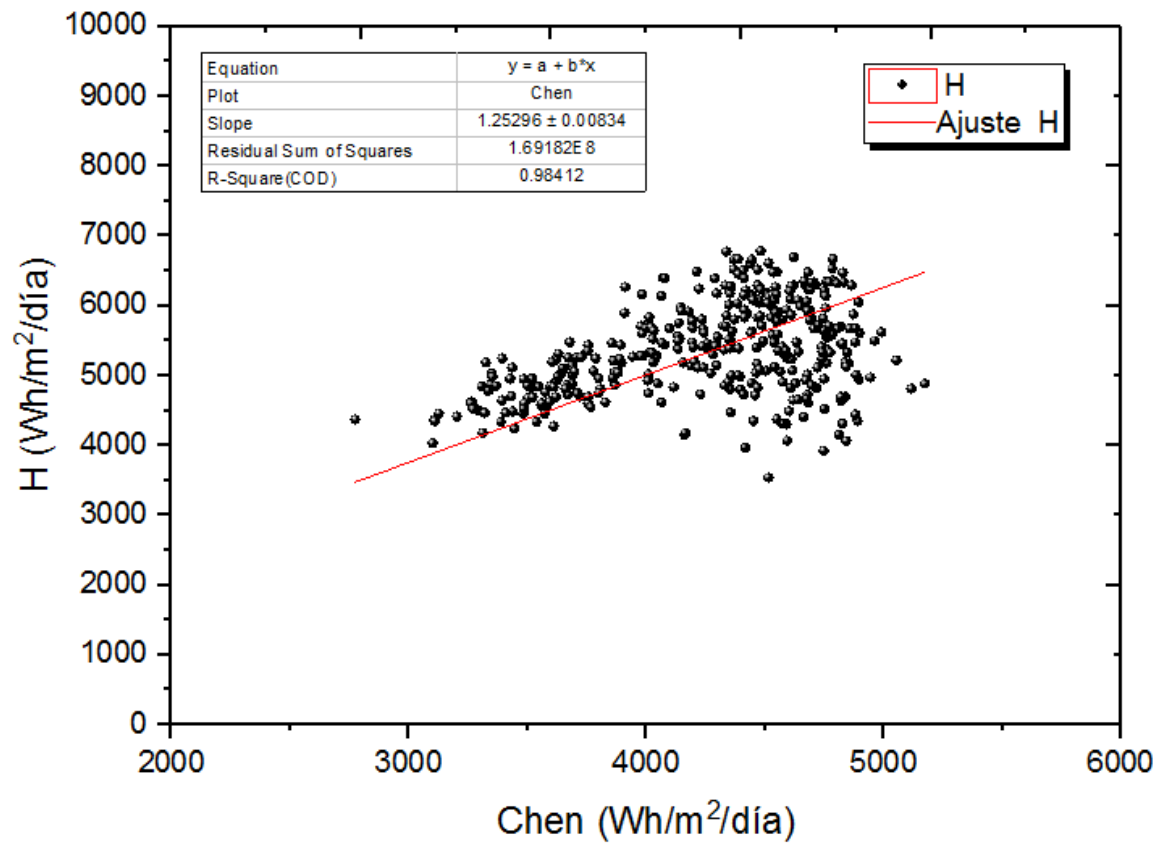


Figura 19: Adaptación del modelo de Chen.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Indicadores estadísticos para el modelo de Chen.

Parámetro	Valor
Módulo	Chen
Factor de Calibración	1,2521
Número de Valores Utilizados	365
Factor de Determinación R²	0,98411
RMSE	681,7521
RMSE %	12,7111%
MBE	-37,3881
MBE %	-0,6971%

Fuente: Elaboración propia

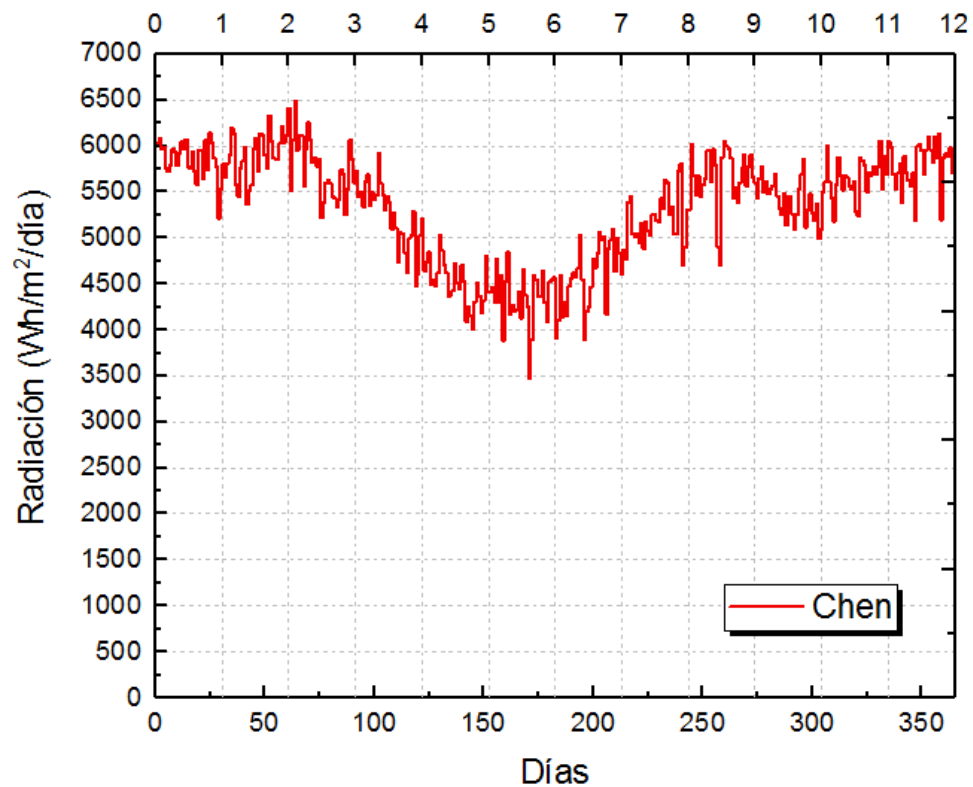


Figura 20 Datos estimados según el modelo de Chen.

Fuente: Elaboración propia

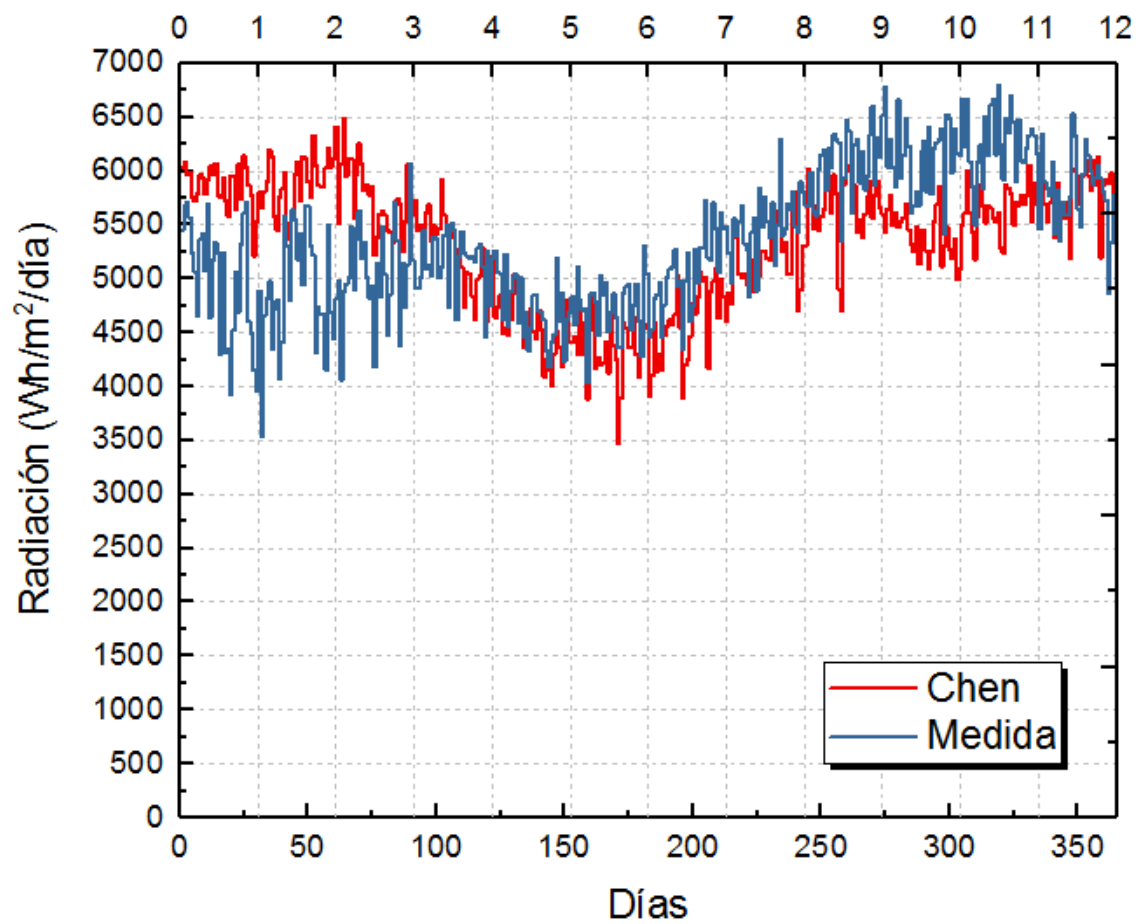


Figura 21. Análisis entre valores estimados por Chen y los datos obtenidos de NASA.

Fuente: Elaboración propia

5.8 DATOS DE IRRADIANCIA SOLAR EN BASE A TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MÍNIMAS DE SENAMHI

De (Farfán Neyra, 2020) se obtuvieron los siguientes datos de Irradiancia solar anual en base a las temperaturas máximas y mínimas SENAMHI para Lambayeque. Los datos que nos importan son los resaltados en negrita, H (irradiación solar promedio mensual anual en kWh/m²-día

Tabla 15: *Valores de b,c y H (irradiación solar promedio mensual anual en kWh/m²-día en las estaciones meteorológicas de la provincia de Lambayeque-periodo 2014-2019.*

Año	Valores de b, c y H (irradiación solar promedio mensual anual en kWh/m ² -día)											
	Lambayeque			Cerro de arena			Pasaje sur			Jayanca		
	b	c	H	b	c	H	b	c	H	b	c	H
2014	0,0283	1,6560	4,020									
2015	0,0259	1,7149	3,551	0,0423	1,4238	5,690	0,1707		0,8478	6,615		
2016	0,0284	1,6524	4,029	0,0501	1,3422	5,873	0,2188		0,7716	6,792		
2017	0,0270	1,6850	3,801	0,0438	1,4160	5,686	0,1825	0,8317	6,701	0,0528	1,3300	5,700
2018	0,0268	1,6916	3,817	0,0472	1,3854	5,867	0,2389	0,7512	6,788	0,0623	1,2364	5,940
2019	0,0276	1,6711	4,021	0,0516	1,3307	5,829	0,4040	0,6092	6,956	0,0608	1,2440	5,830
Promedio	0,0273	1,6785	3,873	0,0470	1,3796	5,789	0,2430	0,7623	6,770	0,0586	1,2701	5,823

Fuente: (Farfán Neyra, 2020)

Los datos mostrados en la Tabla anterior son datos reales tomados de la estación de medición de SENAEMI instalada en Lambayeque.

Para concluir, debemos comparar los valores estimados por los modelos con el valor diario promedio anual de SENAEMI.

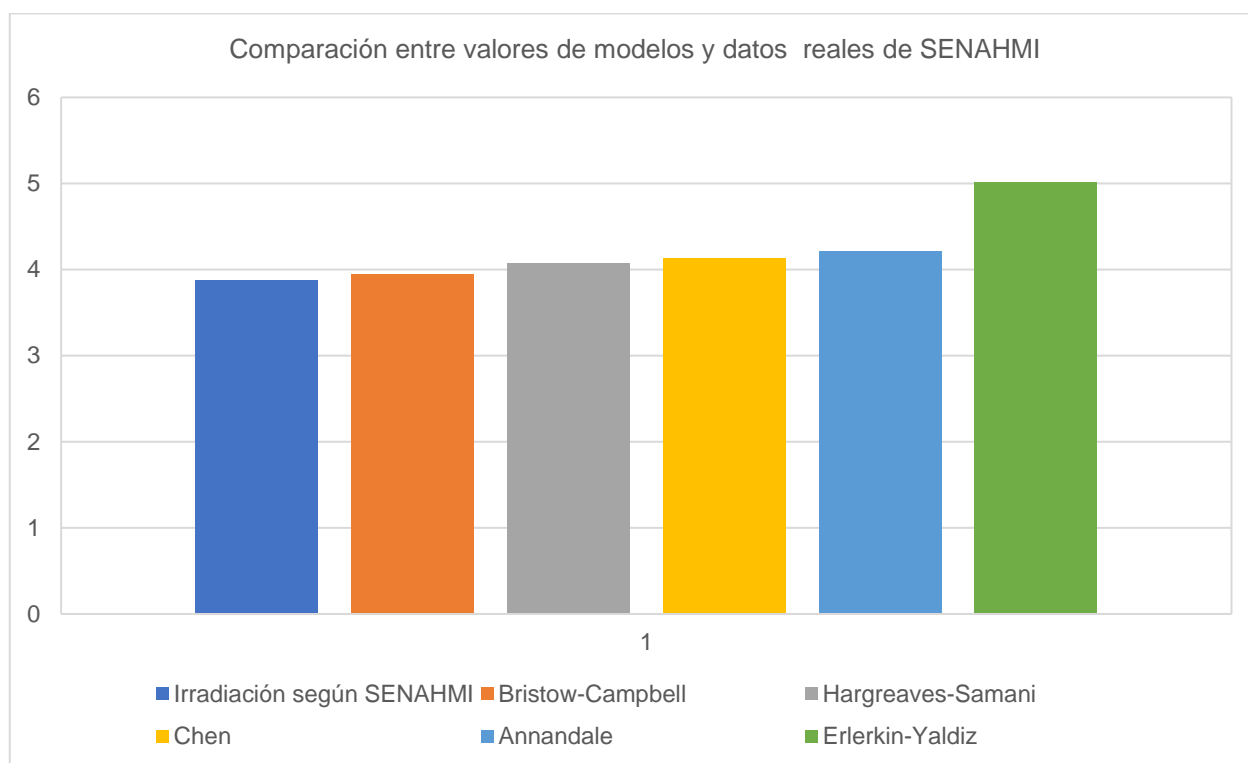


Figura 22. Comparación entre valores de modelos y datos de SENAHMI:

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Análisis entre valores estimados y irradiancia solar en base a las temperaturas máximas y mínimas de Senamhi

	Irradiación diaria promedio según modelo (Wh/m2/día)	Irradiación diaria promedio según modelo (kWh/m2/día)	Irradiancia solar en base a las temperaturas máximas y mínimas SENAMHI
Bristow-Campbell	3950	3,95	3,873
Hargreaves-Samani	4070	4,07	3,873
Chen	4130	4,13	3,873
Annandale	4210	4,21	3,873
Erlerkin-Yaldiz	5010	5,01	3,873

Fuente: Elaboración propia.

Los siguientes cálculos se utilizan para validar y comparar diferentes modelos

Datos estadísticos:

- Factor de determinación [R^2], una medida de qué tan cerca se aproxima la línea de regresión a los puntos en la dispersión, cuando R^2 está cerca de 1, el modelo es más eficiente.
- Porcentaje de error medio raíz [RMSE%], que representa el rendimiento del modelo,
- Evaluando la desviación entre la estimación actual y el valor observado, donde un RMSE más bajo representa un mejor rendimiento del modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}}$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} * 100$$

- Error medio porcentual de sesgo [MBE%] Al igual que RMSE, esto indica el rendimiento del modelo y si el modelo tiende a sobreestimar o subestimar.

$$MBE = \sum \frac{y_i - \bar{y}_i}{n}$$

$$\%MBE = \frac{MBE}{\bar{y}} * 100$$

Donde:

y_i : Valor estimado, \bar{y}_i : Valor medido, n : Número de Valores.

En la Tabla 17 se comparan los valores estimados por los modelos con el valor diario promedio anual de Irradiancia solar en base a las temperaturas máximas y mínimas SENAMHI con los estimadores estadísticos RMSE y MBE, y así se verifica cual es modelo que mejor estima la irradiancia solar global diaria en la región Lambayeque.

Tabla 17: Validación entre valores estimados e irradiancia con los estimadores estadísticos.

Fuente: Elaboración propia

	Irradiancia diaria promedio según modelo (Wh/m ² /día)	Irradiancia diaria promedio según modelo (kWh/m ² /día)	Irradiancia solar en base a las temperaturas máximas y mínimas SENAMHI	RMSE	RMSE %	MBE	MBE %
Bristow- Campbell	3950	3,95	3,873	0,077	2%	0,08	2%
Hargreaves -Samani	4070	4,07	3,873	0,197	5%	0,2	5%
Chen	4130	4,13	3,873	0,257	7%	0,26	7%
Annandale	4210	4,21	3,873	0,337	9%	0,34	9%
Erlarkin- Yaldiz	5010	5,01	3,873	1,137	29%	1,14	29%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que la irradiancia solar diaria promedio anual es de 3,873 kWh/m²/día de acuerdo a lo indicado por el SENAHMI. El modelo de Briwtow-Campbell es el que mejor estima la irradiancia solar en Lambayeque con un valor de 3,95kWh/m²/día. El modelo con menos fiabilidad de estimación es del modelo de Erlarkin-Yaldiz con un valor de 5,01kWh/m²/día, lo que indica una diferencia de 0,294 kWh/m²/día, equivalente al un 30% de sobreestimación.

□ Se estudiaron los siguientes modelos matemáticos empíricos para estimar la irradiancia solar en Lambayeque: 1) Bristow-Campbell, 2) Hargreaves-Samani, 3) Annandale 4) Ertekin-Yaldiz, y 5) Chen

□ Se adecuó los 5 modelos matemáticos empíricos para estimar la irradiancia solar en Lambayeque: los resultados son: : 1)En el modelo de Bristow-Campbell se encontró un RMSE porcentual de 2% y un MBE% de 2%, 2) En el modelo de Hargreaves- un RMSE porcentual de 5% y un MBE% de 5%. 3)En el modelo de Chen se encontró RMSE porcentual de 7% y un MBE% de 7%. 4) En el modelo de Annandale se encontró un RMSE porcentual de 9% y un MBE% de 9%. 5) EN el modelo de Ertekin-Yaldiz se encontró un RMSE porcentual de 29% y un MBE% de 29%.

□ Se comparó los datos obtenidos de irradiación solar real según SENAMHI que es de 3,873kWh/m²/día, con los datos obtenidos de los modelos, obteniendo los consecuentes resultados: 1) En el modelo de Bristow-Campbell 3,95kWh/m²/día, 2) Para el modelo de Hargreaves 4,07kWh/m²/día 3)En el modelo de Chen 4,13 kWh/m²/día 4) En el modelo de Annandale 4,21kWh/m²/día 5) En el modelo de Ertekin-Yaldiz 5,013.95kWh/m²/día,

□ Se concluye que el modelo más adecuado para estimar la irradiancia solar en la provincia Lambayeque es el modelo de Briwtow-Campbell, con un valor de 3,95kWh/m²/día, Este modelo posee el menor RMSE y MBE porcentual.

- [1] P. Sánchez Molina, «Argentina, Chile, México y Perú, entre los países con mejor potencial de la fotovoltaica del mundo», *PV Magazine Latin America*, ago. 07, 2020. <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/08/07/argentina-chile-mexico-y-peru-entre-los-paises-con-mejor-potencial-de-la-fotovoltaica-del-mundo/> (accedido jun. 24, 2021).
- [2] Farfán Neyra (2020) Evaluación del modelo empírico de Bristow-Campbell en el registro de la irradiancia solar diaria en las estaciones meteorológicas del Senamhi de la Provincia de Lambayeque. Lambayeque, Repositorio-Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo <https://www.repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8701> (accedido jun. 24, 2021).
- [4] J. Gastelo-Roque y A. Morales-Acevedo, «Estimación de la radiación solar diaria utilizando el modelo de Hargreaves-Samani.», oct. 2017, vol. 41, pp. 499-505. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/322093755_Estimacion_de_la_radiacion_solar_diaria_utilizando_el_modelo_de_Hargreaves-Samani
- [5] M. E. Watkins, y G. A. Salazar, «Estimación de la Irradiación Solar Media Mensual, para la Ciudad de Catamarca, usando el Modelo Híbrido de Yang. - PDF Descargar libre». <https://docplayer.es/9841557-Estimacion-de-la-irradiacion-solar-media-mensual-para-la-ciudad-de-catamarca-usando-el-modelo-hibrido-de-yang.html> (accedido mar. 12, 2021).
- [6] J. Álvarez, H. Mitsova, y H. L. Allen, «Estimating Monthly Solar Radiation in South-Central Chile», *Chil. J. Agric. Res.*, vol. 71, n.º 4, pp. 601-609, dic. 2011, doi: 10.4067/S0718-58392011000400016.

- [7] M. Díaz Delgado y J. E. Toro Tello, «Diseño de un dispositivo para estimar y predecir la radiación solar en Lambayeque utilizando modelos empíricos y redes neuronales», *Univ. Nac. Pedro Ruiz Gallo*, abr. 2019, Accedido: mar. 12, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/4071>
- [8] L. Quiñones, M. B. Gurbillon, W. G. Angeles, R. S. López, y M. Milla, «Estimación de la radiación solar diaria para la ciudad de Bagua, región Amazonas, Perú», *Sel. Matemáticas*, vol. 6, n.º 2, pp. 320-328, 2019.
- [9] B. Frauberth Camayo-Lapa, J. R. Massipe-Hernández, J. E. Pomachagua-Paucar, A. Torres-Ten, y M. O. Quispe-Flores, «Desarrollo del modelo bristow campbell para estimar la radiación solar global de la región de junin, Perú», *Tecnol. Quím.*, vol. 35, n.º 2, pp. 220-234, ago. 2015.
- [10] R. Caminada, «Energías renovables: el desarrollo de la energía eólica en el Perú», *Repos. ACADÉMICO USMP*, 2016, Accedido: mar. 15, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/2391>
- [12] C. Orbegozo y R. Arivilca, «Energía solar fotovoltaica (manual técnico para instalaciones domiciliarias)», *Issuu*. https://issuu.com/sinapsisarcar/docs/energ__a_solar_fotovoltaica__manual (accedido mar. 15, 2021).
- [13] «Energía Solar Fotovoltaica ahora disponible en Perú», *ALQUIMODUL SAC – Construcción modular, módulos prefabricados y contenedores*, ene. 21, 2020. <https://www.alquimodul-peru.com/noticias/energia-solar-fotovoltaica-ahora-disponible-en-peru/> (accedido jun. 23, 2021).
- [14] J. A. Alonso Lorenzo, «Radiación Solar | Tipos, conceptos y aplicaciones», *SUN FIELDS*. <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/radiacion-solar/> (accedido mar. 15, 2021).

- [15] B. Carrascosa y M. Inmaculada, «Cálculo de la radiación solar extraterrestre en función de la latitud y la declinación solar», jul. 2016, Accedido: jun. 23, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/68296>
- [16] M. Omari, «ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL A PARTIR DE LAS BANDAS HELIOGRÁFICAS», *E-REDING*. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4779> (accedido mar. 15, 2021).
- [17] H. Tabari, P. Hosseinzadehtalaei, P. Willems, y C. Martinez, «Validation and calibration of solar radiation equations for estimating daily reference evapotranspiration at cool semi-arid and arid locations», *Hydrol. Sci. JournalJournal Sci. Hydrol.*, vol. 61, sep. 2014, doi: 10.1080/02626667.2014.947293.
- [18] A. de la Casa, G. Ovando, y A. Rodríguez, «Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa», *RIA Rev. Investig. Agropecu.*, vol. 32, ene. 2003.
- [19] M. Denegri, C. Raichijk, y H. Grossi Gallegos, «Evaluación de diferentes modelos utilizados para la estimación de la radiación fotosintéticamente activa en planos inclinados», *Av. En Energ. Renov. Medio Ambiente*, vol. 16, p. 11.09-11.15, ene. 2012.
- [20] Z. Samani, «Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data», *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 126, n.º 4, pp. 265-267, jul. 2000, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265).
- [21] K. L. Bristow, G. S. Campbell, y K. E. Saxton, «An equation for separating daily solar irradiation into direct and diffuse components», *Agric. For. Meteorol.*, vol. 35, n.º 1, pp. 123-131, oct. 1985, doi: 10.1016/0168-1923(85)90079-6.
- [22] R. Chen, K. Ersi, J. Yang, S. Lu, y W. Zhao, «Validation of five global radiation models with measured daily data in China», *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, n.º 11, pp. 1759-1769, jul. 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.019.

Anexo

1. Coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación, (Baigorria et.al, 2003)

<i>Estación Meteorológica</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>Numero de datos</i>	<i>Error (%)</i>
<i>costa</i>					
<i>Miraflores</i>	<i>0,75</i>	<i>0,05</i>	<i>1,50</i>	<i>3597</i>	<i>3,8</i>
<i>Von Humboldt</i>	<i>0,68</i>	<i>0,06</i>	<i>1.42</i>	<i>13792</i>	<i>14,1</i>
<i>San camilo</i>	<i>0,79</i>	<i>0,09</i>	<i>1,05</i>	<i>2244</i>	<i>3,9</i>

Fuente: Atlas Solar del Perú

En la siguiente explicación, Bristow-Campbell (1984, citado por Atlas Energía Solar del Perú, desarrollaron un modelo (ecuación 1) para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas. A partir de los modelos habidos, Baigorria et al. concluyeron que el modelo Bristow-Campbell era el que mejor se ajustaba a las regiones de Perú. Este modelo sugiere la estimación de la transmisividad o irradiación solar relativa (H/H_o) en función de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínimas:

$$\frac{H_g}{H_o} = a \cdot (1 - e^{-b(T_{max}-T_{min})^c}) \quad (1)$$

Luego de desarrollar el modelo Bristow-Campbell (BC) se obtienen los siguientes coeficientes:

$$a = 0,75$$

$$b=0,05$$

$$c=1,50$$

Los valores descritos para cada coeficiente son de 0,7 para el coeficiente "a", entre 0,004 y 0,010 para el coeficiente "b" y 2,4 para el coeficiente "c" (Meza y Varas).

En este caso, los valores empíricos (a, b y c) tienen también un significado físico; a representa el máximo valor característico de cada área de estudio y depende de la contaminación atmosférica y de la altitud; b ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) y c determinan el efecto del incremento del diferencial de temperaturas sobre la máxima "T" de la atmósfera (Mesa y Varas, por citado por Atlas Energía Solar del Perú)

La tabla de Coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación muestra los valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell encontrados para cada estación, así como su error promedio.