



UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”
ESCUELA DE POSGRADO



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

**“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”**

TESIS

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

AUTOR:

MSc. Farfán Neyra, José Luis

ASESOR:

Dr. Campos Ugaz, Walter Antonio

LAMBAYEQUE - PERÚ

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"



MSc. José Luis Farfán Neyra

Autor




Dr. Walter Antonio Campos Ugaz


Asesor

Tesis presentada a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo para optar el Grado Académico de: DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA CON MENCIÓN EN ENERGÍA

Aprobado por:


Dr. Luis Jaime Collantes Santisteban
Presidente del Jurado
Dr. Oscar Saavedra Tafur
Secretario del Jurado
Dr. Arnulfo Cieza Ramos
Vocal del Jurado

Lambayeque, 2020

 UNPRG UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO	ESCUELA DE POSGRADO <i>M. Sc. Juanito Villena Rodríguez</i>	Versión:	01
		Fecha de Aprobación	29-8-2020
UNIDAD DE INVESTIGACION	FORMATO DE ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS	Pág. 1 de 3	

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS DE TESIS

Siendo las 12:00 m. del día lunes 14 de septiembre de 2020, se dio inicio a la Sustentación Virtual de Tesis soportado por el sistema Blackboard Ultra, preparado y controlado por la Unidad de Tele Educación de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, con la participación en la Video Conferencia de los miembros del Jurado, nombrados con Resolución N° 1172-2019-EPG, de fecha 10 de septiembre de 2019, conformado por:

Dr. LUIS JAIME COLLANTES SANTISTEBAN, Presidente.

Dr. OSCAR SAAVEDRA TAFUR, Secretario.

Dr. ARNULFO CIEZA RAMOS, Vocal.

Dr. WALTER ANTONIO CAMPOS UGAZ, Asesor.

Para evaluar el informe de tesis del M.Sc. JOSE LUIS FARFAN NEYRA, candidato a optar el grado de DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA CON MENCION EN ENERGIA con la tesis titulada "EVALUACION DEL MODELO EMPIRICO DE BRISTOW-CAMPBELL EN EL REGISTRO DE LA IRRADIANCIA SOLAR DIARIA EN LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS DEL SENAMHI DE LA PROVINCIA DE LAMBAYEQUE".

El Sr. Presidente, después de transmitir el saludo a todos los participantes en la Video Conferencia de la Sustentación Virtual ordenó la lectura de la Resolución N° 473- 2020-EPG de fecha 07 de septiembre de 2020 que autoriza la Sustentación Virtual del Informe de Tesis correspondiente, luego de lo cual autorizó al candidato a efectuar la Sustentación Virtual, otorgándole 45 minutos de tiempo y autorizando también compartir su pantalla.

Culminada la exposición del candidato, se procedió a la intervención de los miembros del jurado, exponiendo sus opiniones y observaciones correspondientes, posteriormente se realizaron las preguntas al candidato.

Formato: Físico/Digital	Ubicación: UI-EPG - UNPRG	Actualización:
-------------------------	---------------------------	----------------

	ESCUELA DE POSGRADO <i>M. Sc. Francisco Villano Rodríguez</i>	Versión:	01
		Fecha de Aprobación	20-8-2020
UNIDAD DE INVESTIGACION	<u>FORMATO DE ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL</u> <u>DE TESIS</u>	Pág. 1 de 3	

Culminadas las preguntas y respuestas, el Sr. Presidente, autorizó el pase de los miembros del Jurado a la sala de video conferencia reservada para el debate sobre la Sustentación Virtual del Informe de Tesis realizada por el candidato, evaluando en base a la rúbrica de sustentación y determinando el resultado total de la tesis con **19 puntos**, equivalente a **Muy Bueno**, quedando el candidato **Apto** para optar el Grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en Energía.

Se retornó a la Video Conferencia de Sustentación Virtual, se dio a conocer el resultado, dando lectura del acta y se culminó con los actos finales en la Video Conferencia de Sustentación Virtual.

Siendo las 14 horas se dio por concluido el acto de Sustentación Virtual.



PRESIDENTE



SECRETARIO



VOCAL



ASESOR

Formato: Físico/Digital	Ubicación: UI-EPG - UNPRG	Actualización:
-------------------------	---------------------------	----------------

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, MSc. José Luis Farfán Neyra investigador principal, y Dr. Walter Antonio Campos Ugaz, asesor del trabajo de investigación “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”, declaramos bajo juramento que este trabajo no ha sido plagiado, ni contiene datos falsos. En caso se demuestre lo contrario, asumo responsablemente la anulación de este informe y por ende el proceso administrativo a que hubiere lugar. Que puede conducir a la anulación del título o grado emitido como consecuencia de este informe.

Lambayeque, Agosto 2020

Nombre del investigador: José Luis Farfán Neyra

Nombre del asesor: Walter Antonio Campos Ugaz

DEDICATORIA

A mis padres, quienes desde el cielo iluminan mi camino

AGRADECIMIENTO

**Al Dr. Walter Antonio Campos Ugaz por su invaluable
orientación en el desarrollo del presente trabajo de investigación**

ÍNDICE GENERAL

Acta de sustentación (copia).....	iii
Declaración jurada de originalidad.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Índice General.....	vii
Índice de Tablas.....	viii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Anexos	xiv
Resumen	xv
Abstract.....	xvii
Introducción.....	24
Capítulo I. Diseño Teórico	27
1.1 Antecedentes de la Investigación	27
1.2 Base Teórica.....	29
Capítulo II. Métodos y Materiales	43
2.1 Tipo de Investigación	43
2.2 Método de Investigación	43
2.3 Población, Muestra y Muestreo.....	43
2.4 Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos	45
2.5 Procesamiento y Análisis de Datos	45
Capítulo III. Resultados.....	50
Capítulo IV. Discusión	55
Conclusiones.....	56
Recomendaciones	59
Referencias Bibliográficas.....	60
Anexos	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Días en que se presentan los solsticios y equinoccios en la tierra	40
Tabla 2 Estaciones meteorológicas convencionales y automáticas instaladas en la provincia de Lambayeque	44
Tabla 3 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque-año 2014.....	45
Tabla 4 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque-año 2015.....	46
Tabla 5 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque-año 2016.....	46
Tabla 6 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque-año 2017.....	47
Tabla 7 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque-año 2018.....	47
Tabla 8 Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque-año 2019.....	48
Tabla 9 Día calendario y su correspondiente día juliano	50
Tabla 10 Valores de la transmitancia “a” según tipo de día	51
Tabla 11 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de Lambayeque- 2014	74
Tabla 12 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de Lambayeque- 2015	74
Tabla 13 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de Lambayeque- 2016	74

Tabla 14 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de Lambayeque- 2017	75
Tabla 15 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de Lambayeque- 2018	75
Tabla 16 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de Lambayeque- 2019	75
Tabla 17 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Cerro de arena- 2014.....	76
Tabla 18 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Cerro de arena- 2015.....	76
Tabla 19 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Cerro de arena- 2016.....	76
Tabla 20 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Cerro de arena- 2017.....	77
Tabla 21 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Cerro de arena- 2018.....	77
Tabla 22 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Cerro de arena- 2019.....	77
Tabla 23 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Pasaje sur- 2014.....	78
Tabla 24 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Pasaje sur- 2015.....	78
Tabla 25 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Pasaje sur- 2016.....	78

Tabla 26 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Pasaje	
sur- 2017.....	79
Tabla 27 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Pasaje	
sur- 2018.....	79
Tabla 28 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación Pasaje	
sur- 2019.....	79
Tabla 29 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de	
Jayanca-2017.....	80
Tabla 30 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de	
Jayanca-2018.....	80
Tabla 31 Determinación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día) Estación de	
Jayanca-2019.....	80
Tabla 32 Valores de b,c,H (irradiancia solar promedio mensual anual en	
kW-h/m ² -día) en las estaciones meteorológicas de la provincia de	
Lambayeque – periodo 2014-2019.	81
Tabla 33 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Lambayeque -2014.....	83
Tabla 34 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Lambayeque -2015.....	83
Tabla 35 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Lambayeque -2016.....	84
Tabla 36 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Lambayeque -2017.....	84
Tabla 37 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Lambayeque -2018.....	85

Tabla 38 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Lambayeque -2019.....	85
Tabla 39 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Cerro de arena -2014.....	86
Tabla 40 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Cerro de arena -2015.....	86
Tabla 41 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Cerro de arena -2016.....	87
Tabla 42 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Cerro de arena -2017.....	87
Tabla 43 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Cerro de arena -2018.....	88
Tabla 44 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Cerro de arena -2019.....	88
Tabla 45 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Pasaje sur -2014.....	89
Tabla 46 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Pasaje sur -2015.....	89
Tabla 47 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Pasaje sur -2016.....	90
Tabla 48 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Pasaje sur -2017.....	90
Tabla 49 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Pasaje sur -2018.....	91

Tabla 50 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Pasaje sur -2019.....	91
Tabla 51 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Jayanca -2017.....	92
Tabla 52 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Jayanca -2018.....	92
Tabla 53 Error en la estimación de la irradiancia solar (kW-h/m ² -día)	
Estación Jayanca -2019.....	93
Tabla 54 Valores promedio de “b”, “c”, “H”, “ΔH” y porcentaje de error por estación meteorológica y general, periodo 2014-2019.	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reacciones termonucleares en el interior del sol.....	30
Figura 2. Espectro de radiación electromagnética	31
Figura 3. Porcentajes de radiación solar térmica a nivel del mar	31
Figura 4. Rango de longitudes de onda de la radiación térmica emitida por el sol ..	32
Figura 5. Curva característica de radiación de un cuerpo negro con una temperatura absoluta T en su superficie	33
Figura 6. Estratos de la atmósfera terrestre.....	35
Figura 7. Radiación y balance térmico promedio anual de la atmósfera terrestre para 100 unidades de radiación solar recibida.....	37
Figura 8. Planos ecuatorial y eclíptico, eje de la tierra, solsticios y equinoccios....	39
Figura 9. Representación gráfica del ángulo horario " ω ".....	41

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Modelos de radiación solar utilizando variables múltiples en Turquía....	63
Anexo2: Resultados obtenidos de irradiancia solar en las estaciones meteorológicas de Lambayeque, cerro de arena, pasaje sur y jayanca	73
Anexo 3: Resultados de errores promedios mensual, anual y por estación meteorológica de irradiancia solar, periodo 2014-2019	82

RESUMEN

El objetivo del presente proyecto de tesis radica en estimar el valor de la energía solar o irradiancia solar en la Provincia de Lambayeque empleando el modelo empírico de Bristow-Campbell, teniendo como datos los valores registrados de temperaturas máximas y mínimas diarias proporcionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI)-Dirección Zonal 2, Lambayeque, periodo 2014-2019.

La energía solar disponible en un lugar de interés es una cantidad física fundamental para el diseño de sistemas fotovoltaicos y colectores solares que permiten generar electricidad y calor respectivamente. Sin embargo, la medición de esta cantidad física es escasa o inexistente, recurriendo entonces a métodos empíricos para obtener valores estimados de la irradiancia solar, considerando como datos de entrada las variables meteorológicas medidas en la zona de interés como son entre otras las horas de sol, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, precipitaciones, velocidad y dirección del viento, etc.

Para la elaboración del Atlas Solar del Perú se emplearon los modelos empíricos de Angstrom-Prescott y Bristow-Campbell, tomando como datos de entrada las horas de sol y gradientes de temperaturas ($T_{\text{máx}}-T_{\text{mín}}$) respectivamente, para estimar valores de energía solar o irradiancia solar a nivel nacional. Trabajos similares se han realizado en Junín, Puno y Bolivia, obteniéndose buenos resultados al comparar valores de energía solar estimadas con respecto a las registradas.

El escenario que se presenta en la Provincia de Lambayeque es que, de las siete estaciones meteorológicas instaladas por el SENAMHI, ninguna de ellas registra valores de irradiancia solar; a pesar de esto, en los Distritos de Olmos y Morrope se han instalado sistemas fotovoltaicos tomando como datos de irradiancia solar el valor promedio obtenido del Atlas Solar del Perú.

La estimación de la irradiancia solar en Lambayeque aplicando el modelo empírico de Bristow-Campbell va a permitir diseñar sistemas solares hechos a la medida del requerimiento eléctrico o calórico de manera confiable, segura y económica.

Palabras clave: irradiancia solar, temperatura, modelo empírico de Bristow-Campbell, SENAMHI, Atlas Solar del Perú.

ABSTRACT

The objective of the present project of thesis lies in estimate the value of solar energy or solar irradiance in the Province of Lambayeque using the Bristow-Campbell empirical model, having as database the registered values of daily maximal and minimal temperatures granted by the National Service of Meteorology and Hydrology (SENAMHI), period 2014-2019.

The available solar energy in a place of interest is a fundamental physical quantity for the design of photovoltaic systems and solar collectors that let generate electricity and heat respectively. However the measurement of this physical quantity is scarce or inexistent, resorting then to empirical methods in order to obtain estimated values of the solar irradiance, considering as input data the meteorological variables measured in the zone of interest such as among others the solar hours, maximal and minimal temperatures, relative humidity, precipitations, speed and direction of the wind, etc.

For the elaboration of the Peruvian Solar Atlas the empirical models of Angstrom- Prescott and Bristow-Campbell were used, taking as input data the solar hours and the gradients of temperatures ($T_{\max} - T_{\min}$) respectively in order to estimate values of energy or solar irradiance at national level. Similar researches have been realized in Junin, Puno, Bolivia, obtaining good results when compared the values of solar energy estimated with respect to registered.

The actual situation in the Province of Lambayeque is that, of the seven meteorological stations installed by SENAMHI, none of them register values of solar irradiance, despite this in the districts of Olmos and Morrope haven been installed photovoltaic systems taking as date the average value of the solar irradiance obtained from the Peruvian Solar Atlas.

The estimation of the solar irradiance in Lambayeque applying the empirical model of Bristow-Campbell will allow design solar systems according with the electric or heat requirement in a trustworthy, safe and economical way.

Keywords: solar irradiance, temperature, Bristow-Campbell empirical model, SENAMHI, Peruvian Solar Atlas.

RESUMO

O objetivo deste projeto de tese é estimar o valor da energia solar ou irradiância solar na província de Lambayeque usando o modelo empírico Bristow-Campbell, tendo como dados os valores registrados das temperaturas diárias máximas e mínimas fornecido pelo Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia (SENAMHI) - Direção Zonal 2, Lambayeque, período 2014-2019.

A energia solar disponível em um local de interesse é uma quantidade física fundamental para o design de sistemas fotovoltaicos e coletores solares que permitem gerar eletricidade e calor, respectivamente. Porém, a medição dessa quantidade física é escassa ou inexistente, usando métodos empíricos para obter valores estimados da irradiância solar, considerando como dados de entrada as variáveis meteorológicas medidas na área de interesse, como horas de sol, temperaturas máxima e mínima, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento, etc.

Para a elaboração do Atlas Solar do Peru, foram utilizados os modelos empíricos de Angstrom-Prescott e Bristow-Campbell, tomando como dados de entrada as horas de sol e gradientes de temperatura ($T_{max}-T_{min}$), respectivamente, para estimar os valores de energia solar ou irradiância solar em todo o país. Trabalhos semelhantes foram realizados em Junín, Puno e Bolívia, obtendo bons resultados ao comparar os valores estimados de energia solar com os registrados.

O cenário apresentado na província de Lambayeque é o, das sete estações meteorológicas instaladas pelo SENAMHI, nenhuma delas registra valores de irradiância solar; Apesar disso, nos distritos de Olmos e Morrope foram instalados sistemas

fotovoltaicos tendo como dados da irradiância solar o valor médio obtido do Atlas Solar do Peru.

A estimativa da irradiância solar em Lambayeque aplicando o modelo empírico Bristow-Campbell, permitirá o design do sistemas solares adaptados aos requisitos elétricos ou calóricos de maneira confiável, segura e econômica.

Palabras chave: irradiância solar, temperatura, modelo empírico de Bristow-Campbell, SENAMHI, Atlas Solar do Peru.

SOMMARIO

L'obiettivo di questo progetto di tesi è stimare il valore dell'energia solare o irradianza solare nella Provincia di Lambayeque usando il modello empirico di Bristow-Campbell, avendo come dati i valori registrati delle temperature giornaliere massime e minime fornito dal Servizio Nazionale di Meteorologia e Idrologia (SENAMHI) -Zonale Direzione 2, Lambayeque, periodo 2014-2019.

L'energia solare disponibile in un luogo di interesse è una quantità fisica fondamentale per la progettazione di sistemi fotovoltaici e collettori solari che consentire generare elettricità ed calore rispettivamente. Tuttavia, la misurazione di questa quantità fisica è scarsa o inesistente, quindi ricorrere a metodi empirici per ottenere valori stimati di irradianza solare, considerando come dati di input le variabili meteorologiche misurate nell'area di interesse come ore di sole, temperature massime e minime, umidità relativa, precipitazioni, velocità e direzione del vento, etc.

I modelli empirici di Angstrom-Prescott e Bristow-Campbell furono usati per elaborare l'Atlante solare del Perù, prendendo come dati di input le ore di luce solare e gradienti di temperatura ($T_{max}-T_{min}$) rispettivamente per stimare i valori di energia solare o radiazione solare a livello nazionale. Lavori simili sono stati effettuati a Junín, Puno e in Bolivia, ottenendo buoni risultati confrontando i valori di energia solare stimati rispetto a quelli registrati. Lavori simili sono stati eseguiti a Junín, Puno e in Bolivia, ottenere buoni risultati confrontando i valori stimati di energia solare rispetto a quelli registrati.

Lo scenario presentato nella Provincia di Lambayeque è quello, delle sette stazioni meteorologiche installate da SENAMHI, nessuna delle quali registra valori di irraggiamento solare; Lo scenario presentato nella provincia di Lambayeque è quello delle sette stazioni meteorologiche installate da SENAMHI, nessuna di loro registra valori di irradianza solare; Nonostante ciò, nei distretti di Olmos e Morrope sono stati installati sistemi fotovoltaici prendendo come dati di irradianza solare il valore medio ottenuto dall'Atlante solare del Perù.

La stima dell'irradianza solare in Lambayeque applicando il modello empirico di Bristow-Campbell consentirà progettare sistemi solari su misura per i requisiti elettrici o calorici in modo affidabile, sicuro ed economico.

Parole chiave: irradianza solare, temperatura, modello empírico di Bristow-Campbell, SENAMHI, Atlante Solare del Perú.

INTRODUCCIÓN

En el Perú, a través del Ministerio de Energía y Minas se cuenta con una política de gobierno que permite el uso de las energías renovables (solar y eólica) con la finalidad de generar energía eléctrica; siendo éstas inagotables, ecológicas y de disponibilidad inmediata.

En este escenario y en lo que respecta al uso de la energía solar existen en nuestro país centrales solares en Tacna y Moquegua que están generando 20 MW y 144 MW respectivamente, las mismas que están conectadas a las redes de las empresas concesionarias de electricidad en dichas regiones.

El Ministerio de Energía y Minas del Perú viene impulsando el uso de la energía solar para la generación de electricidad para viviendas a nivel nacional. Para el diseño de los sistemas fotovoltaicos emplean los valores de irradiancia solar indicadas en el Atlas Solar del Perú según la región de interés.

El objetivo del presente trabajo de investigación consiste en estimar el valor de la irradiancia solar promedio diaria mensual en la provincia de Lambayeque aplicando el modelo empírico de Bristow-Campbell, teniendo como datos de entrada las temperaturas máximas y mínimas registradas en cuatro de las cinco estaciones meteorológicas convencionales instaladas por el SENAEMI; esto permitirá diseñar sistemas fotovoltaicos hechos a la medida, sin sobredimensionamiento, económicos y que satisfagan la necesidad energética de los usuarios. Se precisa que existen adicionalmente dos estaciones meteorológicas automáticas instaladas, una en olmos y la otra en motupe, pero éstas registran temperaturas diarias y no temperaturas máximas y mínimas; las mismas que son excluidas en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

La atmósfera terrestre es el medio a través del cual se propaga la radiación solar, el mismo que por naturaleza es un medio gaseoso, estratificado, heterogéneo y en permanente estado dinámico, esto trae como consecuencia que parte de la energía solar proveniente del sol se pierda en este medio complejo llegando solo una cierta cantidad a la superficie de la tierra, la misma que es aprovechada para diversos fines. La transmisividad o irradiación relativa (H/H_o) es el parámetro climático que relaciona el ratio entre la energía solar disponible a nivel de la superficie terrestre (H) y la energía solar extraterrestre (H_o), la misma que corresponde a la constante solar cuyo valor promedio es de $1\,380\text{ W/m}^2$.

Un análisis de la atmósfera terrestre desde el punto de vista termodinámico considera entre otros los siguientes aspectos: la variación de la temperatura en sus diferentes estratos atmosféricos, presión, presencia de material particulado en suspensión, humedad, nubes, vientos, ozono estratosférico, gases ionizantes, gases troposféricos producto de la actividad antropogénica. Cuando la radiación solar se desplaza hacia la superficie terrestre, ésta experimenta una serie de fenómenos físicos tales como la absorción, dispersión, reflexión y refracción, trayendo como consecuencia la llegada de una energía solar disminuida; permitiendo en este análisis establecer una relación funcional entre la transmisividad y el gradiente de temperatura ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) diario mediante el modelo empírico de Bristow-Campbell.

Los movimientos de la tierra, fundamentalmente los de traslación y rotación hacen que la irradiancia solar sobre su superficie varíe día a día, por lo que se hace necesario considerar parámetros de la geometría solar tales como la latitud, corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, declinación solar, ángulo horario de salida del sol, día de referencia del año (día juliano). Parámetros que previamente deben ser calculados para luego estimar el valor de la irradiancia solar en la zona de interés y en particular en la Provincia de Lambayeque.

Los valores de dos de los tres parámetros que considera el modelo empírico de Bristow-Campbell son obtenidos considerando la latitud y las temperaturas máximas y mínimas. Con todo esto, el camino está expedito para estimar el valor de la irradiancia solar en la zona de interés.

Este procedimiento puede ser utilizado para determinar valores de irradiancia solar en aquellos lugares en donde las estaciones meteorológicas instaladas por el SENAEMI no registran valores de esta cantidad física, la misma que es fundamental para el diseño de sistemas fotovoltaicos.

Considero que el SENAMHI, órgano rector responsable del manejo de las variables hidrológicas y meteorológicas en nuestro país debe implementar estaciones que permitan medir valores de la energía solar o irradiancia solar de manera localizada.

CAPÍTULO I. DISEÑO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la Investigación

1.1.1 A nivel internacional

Ebrendilek, F y Ertekin, C [5] consideraron 78 modelos empíricos para evaluar la irradiancia solar en Turquía, tomando como datos las variables registradas en sus 159 estaciones climáticas dispersas en este país; de manera que, seleccionaron la ecuación empírica en cada zona de acuerdo a las variables observadas y registradas. En el Anexo 1 se presentan los 78 modelos empíricos.

Fabio, J.[8] realizó estudios para la evaluación de modelos de estimación de la radiación solar tomando como base la temperatura diaria del aire en nueve ciudades ubicadas al norte de Minas Gerais-Brasil. Los modelos empíricos utilizados fueron: Annadale et.al, Chen et.al, Bristow-Campbell, Donatelli-Campbell, Hargreaves y Hunt et.al. Los modelos que arrojaron mejores resultados fueron los de Bristow-campbell y Donatelli-Campbell con márgenes de error de 2,96 kW-h/m².día y de 3,04 kW-h/m².día respectivamente.

Raichijk, C. y Lanson, A [6] evaluaron 11 modelos empíricos para estimar la radiación solar global media mensual basados en datos de temperatura ambiente obtenidos de las estaciones de San Miguel y Paraná, pertenecientes a la localidad de Luján-Argentina, los valores obtenidos fueron validados para el periodo 2002-2010. Los modelos utilizados fueron: García, Richardson, Hargreaves-Samani, Hargreaves et.al, Chen et. al, Thornton-Running, Bristow-campbell, Goodin et.al, Weiss et.al, Mahmood-Hubbar y el modelo lineal. La mayoría de estos modelos obtuvieron los mismos valores cuadráticos medios relativos del orden del 5%.

1.1.2 A nivel nacional

El Atlas solar del Perú [1] indica que son dos los modelos empíricos utilizados para la obtención de la irradiancia solar en el Perú, a saber:

1.- El modelo empírico de Angström-Prescott dado por la siguiente expresión

$$H / H_o = a + bn / N$$

Donde:

H/H_o : Es la transmisividad atmosférica o coeficiente de transmisión de la atmósfera y es la medida de la tasa de la transferencia de la energía solar que no es absorbida después que el haz solar atraviesa el medio atmosférico.

n : Son las horas de sol efectivas o heliofanía

N : Es la duración astronómica del día para una fecha del año y latitud específicos.

2.- El modelo empírico de Bristow-Campbell dado por la siguiente expresión

$$H / H_o = a[1 - \exp(-b\Delta T^c)]$$

Donde:

H_o : es la irradiancia solar extraterrestre diaria media mensual sobre una superficie horizontal.

a : es el parámetro que indica el máximo valor de la transmitancia atmosférica o transmisividad y es característico de cada zona de estudio, depende de la contaminación atmosférica, topografía y altitud.

b, c : son parámetros interrelacionados que son determinados teniendo en cuenta el efecto del incremento del gradiente de temperatura sobre la máxima transmitancia de la atmósfera.

Estos parámetros tienen las siguientes expresiones:

ΔT : es el gradiente de temperatura entre la temperatura máxima y mínima ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) y φ es la latitud en la zona de estudio.

Quispe, L. y otros [4] emplearon el modelo empírico de Bristow-Campbell para evaluar la irradiancia solar en Puno, tomando como datos los valores de temperaturas máximas y mínimas de la estación climatológica de Puno, periodo comprendido entre setiembre de 2015 a agosto 2016; obteniendo un valor promedio de 5,8988 kW-h/m².día, con una correlación de 0,99 entre los valores medidos y estimados.

Bequer, C. y otros [2] validaron la aplicación del modelo empírico de Bristow-CampBell para obtener valores de irradiancia solar en la Región de Junín. Se tomaron datos de temperaturas máximas y mínimas de 19 estaciones climatológicas existentes en dicha región. La prueba de t-Student arrojó resultados cuya significación estadística implicaba de que no existen diferencias entre los valores registrados y calculados para la irradiancia solar diaria promedio mensual.

1.2 Base Teórica

Previo a la estimación de la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque, es necesario tener conocimiento de: la conducta térmica de la fuente solar, considerándola como un cuerpo negro; de la atmósfera como el medio por donde se trasmite la radiación solar, la misma que es analizada desde el punto de vista de la termodinámica y, de la tierra como cuerpo receptor de la radiación solar, asociando los conceptos de la geometría solar a su complejo movimiento.

1.2.1 Energía solar

La energía solar se produce por las reacciones nucleares de fusión que tienen lugar en el interior del sol a gran profundidad. Los átomos de hidrógeno se combinan entre sí para formar átomos de helio liberando de esta manera energía. Esta energía va desde el interior

hacia la superficie solar o fotosfera y desde allí se irradia en todas las direcciones del universo (Figura 1)

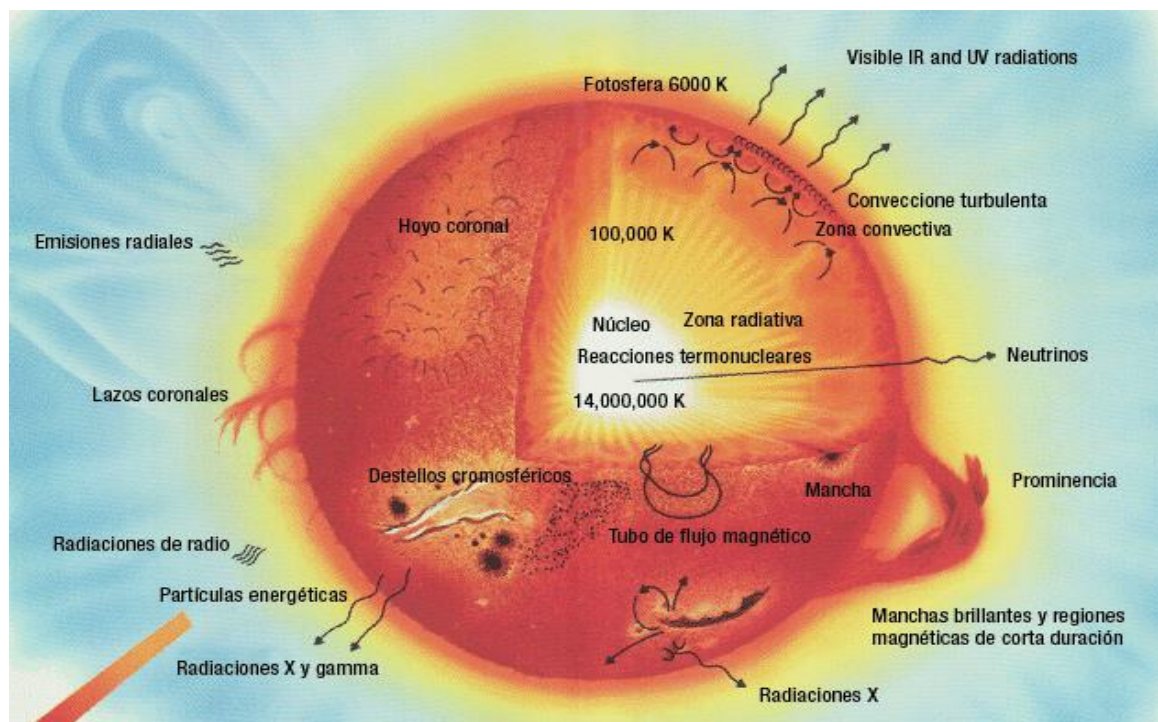


Figura 1. Reacciones termonucleares en el interior del sol

El sol tiene energía para unos 4 500 millones de años, en cada segundo 564 millones de toneladas de hidrógeno se transforman en 560 millones de toneladas de helio, liberándose 4 millones de toneladas de energía solar, llegando el 41% de luz visible a la superficie terrestre.

La fotosfera es una capa delgada de unos 300 Km y tiene una temperatura de 5780 K en su superficie, es la parte del sol que observamos y desde aquí se irradia luz y calor al espacio.

El sol emite radiación en toda la gama de su espectro electromagnético (desde la radiación gamma hasta las de comunicaciones). La tierra recibe energía solar (radiación térmica) que es una mezcla de radiación ultravioleta, visible e infrarroja y la devuelve por reflexión como infrarroja y algo visible. La Figura 2 muestra el espectro de radiación

electromagnética emitida por el sol y la Figura 3 indica los porcentajes estimados de los tres tipos de radiación solar presentes a nivel del mar.



Figura 2. Espectro de radiación electromagnética

Fuente: Ciencias Físicas Primero



Figura 3. Porcentajes de radiación solar térmica a nivel del mar

Fuente: Gonzales Guillermina 2008, pág 7

Estas tres componentes de la radiación solar constituyen la radiación solar global y que llega a la tierra de manera directa y difusa; la misma que es medida por estaciones meteorológicas a través de los piranómetros, actinómetros, heliógrafos o equipos digitales.

La Figura 4 muestra el rango de longitudes de onda de la radiación térmica que emite el sol.

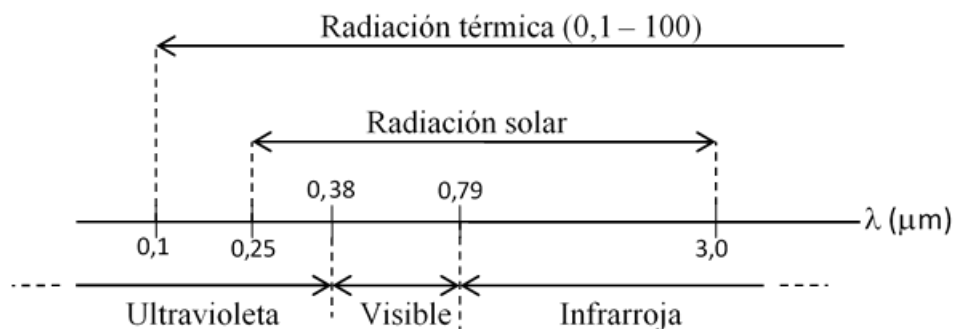


Figura 4. Rango de longitudes de onda de la radiación térmica emitida por el sol

El sol se comporta como un cuerpo negro y la energía H que emite por unidad de tiempo y unidad de área depende de la temperatura absoluta ($T = 5\,780\text{ K}$) a nivel de su superficie y de la gama de longitudes de onda λ de su espectro electromagnético, i.e $H = H(T, \lambda)$.

La Figura 5 muestra la curva característica de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro.

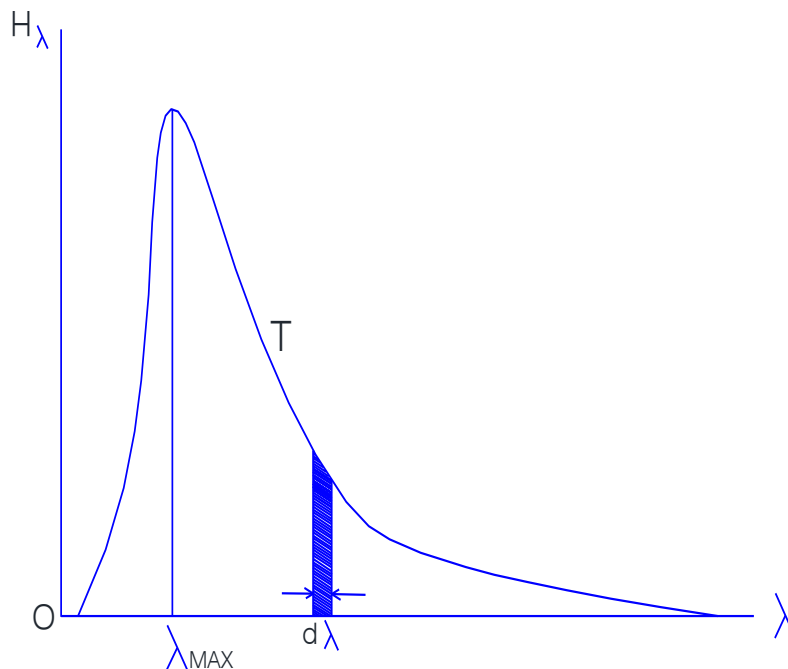


Figura 5. Curva característica de radiación de un cuerpo negro con una temperatura absoluta T en su superficie.

Ludwig Boltzmann demostró que la variación de H_λ en función de λ tiene la siguiente expresión matemática

$$H_\lambda = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \dots (1)$$

Donde:

H_λ = emitancia monocromática del cuerpo negro a la temperatura T en W/m^2 .

$C_1 = 2\pi h c^2 = 3,74 \times 10^{-16} \text{ W.m}^2$ = primera constante de la radiación.

$C_2 = hc/k = 0,0143 \text{ m.K}$ = segunda constante de la radiación.

$h = 6,62620 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ = constante de Planck

$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ = velocidad de la luz en el vacío.

$k = 1,38062 \times 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$ = constante de Boltzmann.

Luego:

$$H = \int_0^\infty H_\lambda d\lambda = \sigma T^4 \dots (2)$$

Donde H es la energía total irradiada por un cuerpo negro por unidad de área y por unidad de tiempo, con una temperatura absoluta T en su superficie.

σ tiene el valor de $5,6696 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$, conocida como la constante de Stefan-Boltzmann, debido a que Jozef Stefan obtuvo los mismos resultados de manera experimental.

Teniendo en cuenta la ecuación 2 se puede obtener la constante solar Hcs, es decir el valor de la radiación solar en la zona extra terrestre de la atmósfera, mediante la siguiente expresión:

$$H_{cs} = \sigma T^4 (R / r)^2 \dots (3)$$

Donde:

$R = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$ = radio del sol

$r = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$ = distancia sol – tierra

$T = 5\,780 \text{ K}$ = temperatura de la superficie solar

Obteniéndose el valor de $H_{cs} = 1\,380 \text{ W/m}^2$, el mismo que tiene el valor equivalente de $4,968 \text{ MJ/m}^2 \text{ h}$.

Este valor es considerado en el modelo empírico de Bristow-Campbell para la estimación de la irradiancia solar local.

1.2.2 Termodinámica de la atmósfera

La atmósfera terrestre es el medio de transmisión de la radiación solar, medio muy complejo, en continuo movimiento, de masa heterogénea, de volumen específico, presión y temperatura variables, lo que hace de manera general que no toda la radiación emitida por el sol llegue a la superficie terrestre. Los diferentes compuestos atmosféricos absorben o reflejan energías de diferentes maneras y en cantidades variadas.

Una característica importante que tiene la atmósfera terrestre es que es diatérmica, i.e: no se calienta cuando por ella se transmite la radiación solar. Por otro lado, la irradiancia solar sobre la curvatura de la superficie terrestre es variable, siendo máxima en la zona ecuatorial y mínima en los polos, generándose un gradiente de temperatura la cual da origen a la formación de vientos; es por eso que se considera a la atmósfera terrestre como un océano de aire en permanente estado de convección natural.

La estratificación de la atmósfera terrestre permite tener un mejor entendimiento de ella, considerándose los siguientes estratos: tropósfera, estratósfera, mesósfera y la termósfera o ionósfera; cada una de ellas con sus propias características. La Figura 6 muestra un esquema de los estratos referidos.

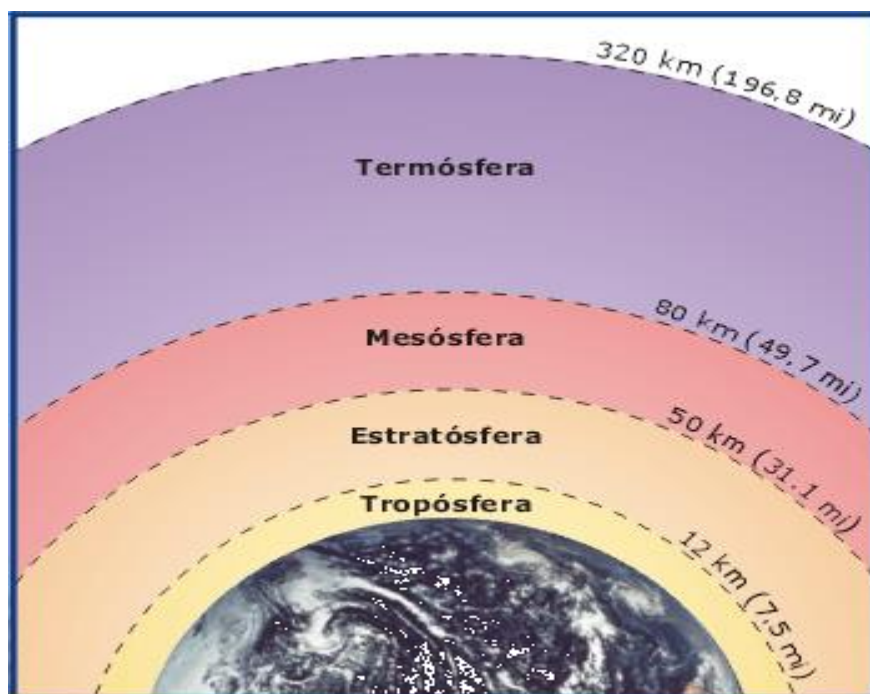


Figura 6. Estratos de la atmósfera terrestre

Fuente: Moran y Morgan, 1994

El estrato troposférico que por efecto de la gravedad terrestre contiene aproximadamente el 75% de la masa atmosférica, conteniendo material particulado en suspensión, vapor de agua, nubes, precipitaciones; es la capa más agitada y la que determina el clima de la tierra. Su comportamiento térmico es tal que experimenta un gradiente de

temperatura con respecto a su altura de $\partial T/\partial h = -6,5 \text{ K/km}$, llegando a la parte superior tener una temperatura de $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Es preciso indicar que el vapor de agua absorbe seis veces más radiación que cualquier otro componente atmosférico, por lo que constituye un elemento muy importante en la atmósfera. Debido a la presencia de nubes, vapor de agua y CO_2 en este estrato, es en donde mayoritariamente se produce la absorción solar.

El estrato estratosférico contiene oxígeno molecular y que al interactuar con la radiación solar se produce el ozono (O_3), generándose una reacción exotérmica y consecuentemente liberando calor, incrementando su temperatura de $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte inferior a $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte superior y en contacto con la mesósfera. Es en esta zona donde el O_3 absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta proveniente del sol. El O_3 constituye también un elemento en la absorción de la radiación solar.

El estrato mesosférico es una zona de escasa absorción solar y de emisión del CO_2 al exterior. Aquí se producen los primeros iones por descomposición solar de los NO_x . Térmicamente su gradiente de temperatura aumenta de los 0°C en su parte inferior a los -90°C en su parte superior y en contacto con la termósfera o ionósfera.

El estrato termosférico está compuesto principalmente de nitrógeno atómico, oxígeno atómico, helio y sodio, absorbiendo una gran parte de la radiación ultravioleta, rayos gamma y rayos X, produciéndose constantemente la formación de iones y el correspondiente incremento de su temperatura, pudiendo llegar hasta los $1\,500^{\circ}\text{C}$.

Las interacciones entre la radiación solar y los componentes de la atmósfera terrestre generan procesos de absorción (vapor de agua, nubes, O_3 , CO_2), dispersión o scattering (material particulado en suspensión cuando su diámetro es menor que la longitud de onda de la radiación incidente), reflexión (nubes, superficie terrestre, océanos), ionización en el estrato termosférico. En estos procesos interactivos, los mismos que son continuos y permanentes se generan cambios energéticos y en consecuencia los correspondientes

cambios de longitud de onda; i.e: recibiendo radiación de longitud de onda corta y emitiendo longitudes de onda larga.

Las fracciones absorbidas y emitidas son difíciles de medir y se calculan por balance térmico, la National Academic of Science ha realizado un balance térmico promedio anual de la atmósfera para 100 unidades de radiación solar recibida, la misma que se indica en la Figura 7, en donde se puede observar que la tierra absorbe y emite radiación al mismo tiempo y que la atmósfera absorbe mucho más radiación terrestre que solar.

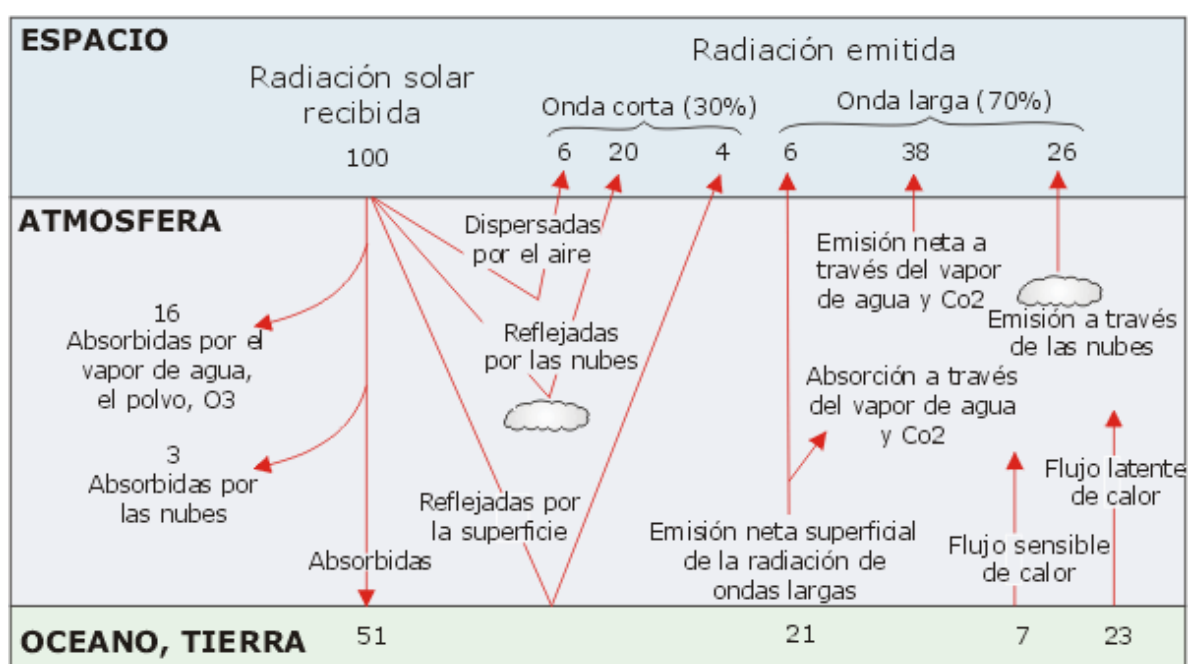


Figura 7. Radiación y balance térmico promedio anual de la atmósfera terrestre para 100 unidades de radiación solar recibida.

Fuente: National Academic of Science , 1975, pag.18

1.2.3.- Geometría del movimiento solar

Previo a la estimación de la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque, es necesario tener conocimiento del comportamiento dinámico del sistema tierra-sol, entender su posición y el movimiento aparente del sol con respecto a la tierra.

La posición de la tierra con respecto al sol es variable, esto es debido a la trayectoria elíptica que describe alrededor del sol bajo la acción permanente de una fuerza central que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. El plano que

contiene al sistema tierra-sol se le conoce como el plano de la eclíptica. Por otro lado, la tierra realiza un movimiento de rotación alrededor de un eje, cuyo plano perpendicular a éste eje se denomina plano ecuatorial. Estos dos planos están desfasados $23,45^\circ$ o equivalentemente es el ángulo que hace el eje de rotación de la tierra con respecto a un eje que es perpendicular al plano de la eclíptica. Adicionalmente la tierra describe también los movimientos importantes de precesión y nutación.

Todos estos movimientos son los responsables que los días sean más cortos o más largos, más calurosos o fríos y que determinan las estaciones del año y de algunos fenómenos como son los solsticios (máxima diferencia de duración entre el día y la noche) y equinoccios (duración del día igual al de la noche en toda la tierra).

La Figura 8 muestra los planos ecuatorial y eclíptico, así como el eje de la tierra. También se muestran los solsticios y equinoccios correspondientes al hemisferio sur.

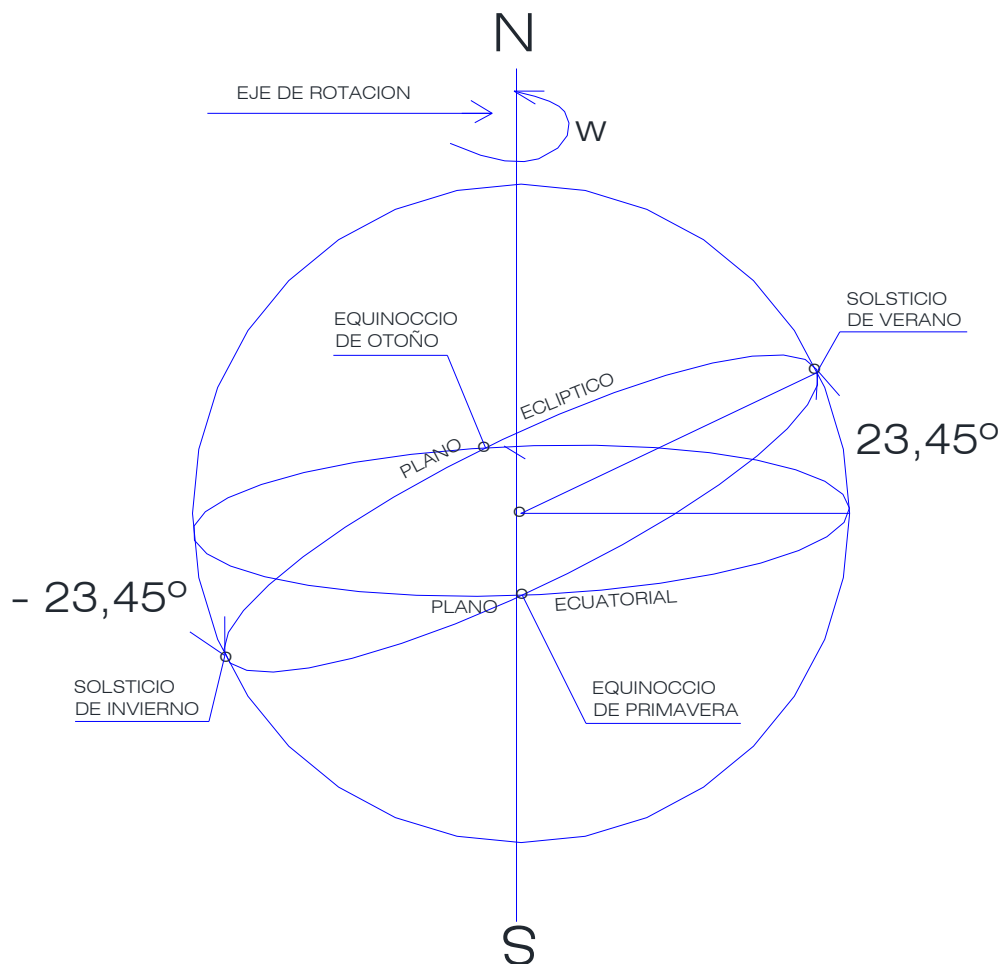


Figura 8. Planos ecuatorial y eclíptico, eje de la tierra, solsticios y equinoccios.

La dirección de los rayos solares que inciden sobre la superficie de la tierra no es constante, sino que varía diariamente de manera armónica continua, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\delta = 23,45^\circ \text{ sen } [360(284 + J) / 365] \dots (4)$$

Donde:

δ : Es la declinación solar, i.e el ángulo que forma la dirección de los rayos solares con el plano ecuatorial.

J: Es el día del año (Juliano).

Analizando la ecuación 4, se tiene que δ oscila entre $\pm 23,45^\circ$. Para $\delta = 0$ corresponde los equinoccios de otoño y primavera, para $\delta = + 23,45^\circ$ le corresponde el solsticio de invierno y para $\delta = - 23,45^\circ$ el solsticio de verano. La Tabla 1 muestra los días en que se presentan los solsticios y equinoccios correspondientes al hemisferio sur.

Tabla 1

Días en que presentan los solsticios y equinoccios en la tierra

Δ	$360(284+J)/365$	J	Día/Mes	Estación
$+23,45^\circ$	+90	-193	21/Junio	Solsticio invierno
$- 23,45^\circ$	-90	-375	21/Diciembre	Solsticio verano
0°	0	-284	22/Marzo	Equinoccio otoño
0°	180	-102	20/Setiembre	Equinoccio Primavera

Fuente: Elaboración propia

De esto se desprende que la variación armónica de la declinación solar hace que la irradiancia solar varíe cotidianamente, siendo además esta cantidad física influenciada por la latitud (φ) debido a la curvatura de la tierra.

La variación continua de la distancia tierra-sol en el movimiento de traslación de la tierra afecta a la incidencia de la irradiancia solar sobre el globo terráqueo. La excentricidad de la órbita terrestre ($e \approx 0,0167$) hace que la radiación solar recibida en el perihelio sea diferente que la recibida en el afelio, influyendo de manera notable sobre el clima del planeta; en este sentido se hace necesario aplicar un factor de corrección E_o a la incidencia de la irradiancia solar terrestre debido a esta excentricidad, la misma que está dado por la expresión:

$$E_o = 1 + 0,034 \cos [360 J / 365] \dots\dots(5)$$

Observándose que E_o tiene una variación armónica y dependiente del día juliano.

Otro parámetro importante de la geometría solar que debe tenerse en cuenta para la cuantificación de la irradiancia solar en la superficie terrestre es el ángulo horario “ ω ”, el mismo que representa el desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra. Este ángulo queda determinado si se conoce la latitud ϕ del lugar y la correspondiente declinación solar δ , cuya expresión se indica a continuación:

$$\omega = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \dots (6)$$

La figura 9 muestra el ángulo horario “ ω ”.

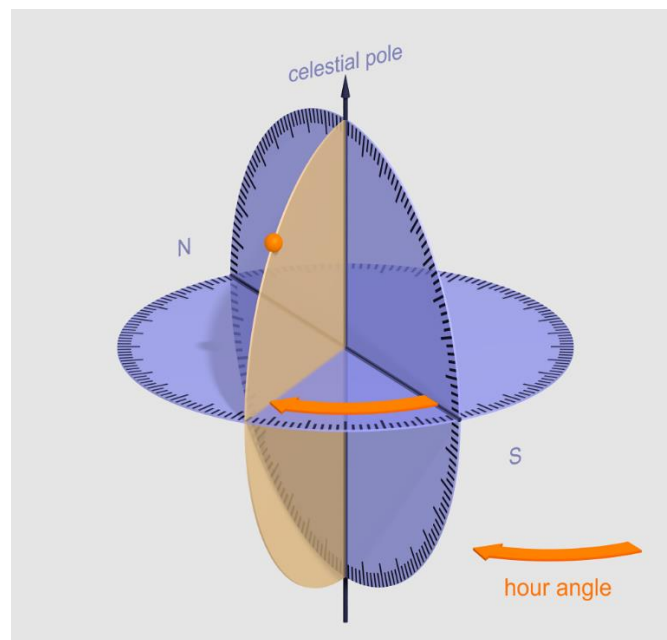


Figura 9. Representación gráfica del ángulo horario “ ω ”

La constante solar H_{cs} y los parámetros de la geometría solar indicados: declinación solar δ , el factor de corrección por excentricidad E_o y el ángulo horario “ ω ” son importantes para determinar la irradiancia solar H_o extraterrestre, el mismo que es un componente de la ecuación empírica de Bristow-Campbell.

1.2.4 Modelo Empírico de Bristow-Campbell

El modelo empírico de Bristow-Campbell dado por la siguiente expresión

$$H / H_o = a[1 - \exp(-b\Delta T^c)] \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

H_o : es la irradiancia solar extraterrestre diaria media mensual sobre una superficie horizontal dada por la siguiente expresión

$$H_o = (24/\pi) H_{cs} E_o [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega + (\pi/180) \omega \sin \varphi \sin \delta] \dots (9)$$

Donde H_{cs} tiene el valor de 1380 W/m^2 ($4,968 \text{ MJ/m}^2.\text{h}$), δ , E_o y ω corresponden a las ecuaciones 4, 5 y 6 respectivamente establecidas en el capítulo I, φ es la latitud de la zona de estudio.

a : es el parámetro que indica el máximo valor de la transmitancia atmosférica o transmisividad y es característico de cada zona de estudio, depende de la contaminación atmosférica, topografía y altitud.

b, c : son parámetros interrelacionados que son determinados teniendo en cuenta el efecto del incremento del gradiente de temperatura sobre la máxima transmitancia de la atmósfera. Estos parámetros tienen las siguientes expresiones:

$$b = 0,107 c^{-2,6485} \dots \dots \dots (10)$$

$$c = 2,116 - 0,072 \Delta T + 57,574 \exp(\varphi) \dots \dots \dots (11)$$

ΔT : es el gradiente de temperatura entre la temperatura máxima y mínima ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) y φ es la latitud de la zona de estudio.

De lo que se puede inferir que el modelo de Bristow-Campbell se utiliza cuando se tiene disponible datos registrados de temperaturas máximas y mínimas diarias en la zona de estudio. Este modelo es el que mejor se adecúa a las condiciones climáticas del Perú según se indica en el contexto del Atlas Solar del Perú. Para la zona norte del Perú se dispone de valores de irradiancia solar comprendidos entre 5,5 a $6,0 \text{ kW-h/m}^2$. día (ítem 7.1, pág.20).

CAPÍTULO II. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación es del tipo descriptivo – explicativo. Se describe al sol como fuente generadora de energía desde el punto de vista de la física atómica, a la atmósfera desde el punto de vista termodinámico como medio de transmisión de la radiación solar y a la tierra como objeto receptor, utilizando los conceptos de la geometría solar. Se explica el procedimiento a seguir utilizando la ecuación empírica de Bristow-Campbell para obtener valores de irradiancia solar a partir de temperaturas máximas y mínimas proporcionadas por el SENAMHI en la provincia de Lambayeque.

2.2 Método de Investigación

El método de investigación utilizado es el inductivo – deductivo. Se parte de valores de temperaturas máximas y mínimas diarias para luego obtener valores de irradiancia solar en las diferentes estaciones meteorológicas. Con estos resultados se puede establecer el valor de la irradiancia solar promedio para la zona de interés.

2.3 Población y Muestra

La población considerada en el presente trabajo de investigación consiste en el total de las temperaturas registradas en las diferentes estaciones meteorológicas existentes y funcionando en la provincia de Lambayeque. De acuerdo a la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Dirección Zonal 2 Lambayeque existen siete estaciones meteorológicas instaladas, de las cuales cinco son convencionales y dos automáticas, registrando las convencionales temperaturas máximas y mínimas, así como el registro de la humedad relativa y las automáticas registrando sólo temperaturas promedio diarias, humedad relativa, dirección y velocidad del viento. Ninguna de las siete estaciones instaladas en la zona de estudio registran valores de irradiancia solar.

En la Tabla 2 se muestran las referidas estaciones, indicando entre otros su ubicación política y geográfica.

Tabla 2

Estaciones meteorológicas convencionales y automáticas instaladas en la provincia de Lambayeque

RED REGIONAL DE LAMBAYEQUE										
ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS/CLIMATOLÓGICAS/SINOPTICAS(CONVENCIONAL)										
N°	CODIGO	ESTACIONES	CAT	SISTEMA		UBICACION POLITICA			UBICACION GEOGRAFICA	
				HIDRO- GRAFICO	CUENCA	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD	LONGITUD ALTITUD
1	106108	LAMBAYEQUE	CP	Pacífico	Chancay-Lamb	Lambayeque	Lambayeque	Lambayeque	06°43'53,5"	79°54'35,4" 18
2	105076	PASABAR	CP	Pacífico	Cascajal	Lambayeque	Lambayeque	Olmos	05°50'13,7"	79°49'8,7" 124
3	105122	CERRO DE ARENA	CO	Pacífico	Cascajal	Lambayeque	Lambayeque	Olmos	05°55'28,6"	80°12'16,7" 59
4	106047	JAYANCA	CO	Pacífico	Motupe	Lambayeque	Lambayeque	Jayanca	06°19'53,7"	79°46'7,3" 78
5	105121	PASAJE SUR	CO	Pacífico	Cascajal	Lambayeque	Lambayeque	Olmos	05°55'2,8"	79°58'18,2" 85
RED REGIONAL DE LAMBAYEQUE										
ESTACIONES AUTOMATICAS "SUTRON"										
N°	CODIGO	ESTACIONES	CAT	SISTEMA		UBICACION POLITICA			UBICACION GEOGRAFICA	
				HIDRO- GRAFICO	CUENCA	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	LATITUD	LONGITUD ALTITUD
1	47201542	MOTUPE	EMA	Pacífico	Motupe	Lambayeque	Lambayeque	Motupe	06°41"	79°40'55,3" 191
2	4726F67E	OLMOS	EMA	Pacífico	Cascajal	Lambayeque	Lambayeque	Olmos	05°50'13,7"	79°49'8,8" 120

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Esta Entidad proporciona vía su página web www.senamhi.gob.pe valores de temperaturas máximas y mínimas diarias de las cinco estaciones meteorológicas convencionales instaladas e indicadas en la Tabla 2, las mismas que datan desde el 2014.

Con la información obtenida, se selecciona como muestra a las temperaturas máximas y mínimas diarias de las estaciones meteorológicas de Lambayeque, Cerro de Arena, Jayanca y Pasaje Sur, periodo 2014 – 2019; excluyendo a la estación meteorológica de Pasabar por no contar con valores suficientes en el periodo de estudio considerado. Estos valores de temperaturas han sido procesados por el autor del presente trabajo de investigación para obtener las temperaturas máximas y mínimas promedio mensual; las cuales se muestran en las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

2.4 Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos

En el proceso de recolección de datos, se ha utilizado como técnica el análisis documental y de contenido, cuyo instrumento ha sido la recolección de datos medidos por el SENAMHI-Zonal 2-Lambayeque en las estaciones meteorológicas instaladas en la Provincia de Lambayeque, los mismos que son confiables y validados por tratarse del órgano rector en los aspectos climatológicos y meteorológicos en nuestro país.

2.5 Procesamiento y Análisis de Datos

Teniendo en cuenta el espacio muestral consistente en el conjunto de datos de temperaturas máximas y mínimas promedio diarias registradas por el SENAMHI-Zonal 2-Lambayeque, periodo 2014 – 2019 en las estaciones meteorológicas de Lambayeque, Pasabar, Cerro de Arena, Jayanca y Pasaje Sur, el autor del presente trabajo de investigación procedió a determinar las temperaturas máximas y mínimas promedio mensual medidas en las referidas estaciones y en el periodo de registro considerado; las mismas que se muestran en las tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 que se presentan a continuación:

Tabla 3

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque 2014

Año 2014 Mes	Estaciones meteorológicas									
	Lambayeque Tmáx	Lambayeque Tmín	Pasabar Tmáx	Pasabar Tmín	Cerro de arena Tmáx	Cerro de arena Tmín	Jayanca Tmáx	Jayanca Tmín	Pasaje sur Tmáx	Pasaje sur Tmín
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							32,9	12,3
Octubre	23,4	17,0			29,3	16,5			32,9	12,9
Noviembre	23,4	17,2			29,7	17,3			34,5	13,3
Diciembre	26,4	18,0			31,3	18,6			35,1	14,4
Promedio	26,0	18,7			30,1	17,5			33,9	13,2

Fuente : SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Tabla 4

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque 2015

Año 2015	Estaciones meteorológicas									
	Lambayeque		Pasabar		Cerro de arena		Jayanca		Pasaje sur	
Mes	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín
Enero	26,3	20,4			32,9	20,5			34,7	15,6
Febrero	28,9	21,3			34,0	22,1			36,4	16,4
Marzo	29,6	22,3			34,7	22,4			36,6	16,8
Abril	28,8	21,3			33,7	20,5			36,7	16,2
Mayo	27,5	21,5			31,6	21,2			36,2	14,8
Junio	24,6	20,5			29,6	19,7			34,2	13,6
Julio	24,9	19,6			29,3	17,3			30,7	12,6
Agosto	23,6	18,7			28,5	16,7			31,5	13,0
Setiembre	24,3	18,3			30,1	18,1			32,3	13,3
Octubre	24,3	18,1			30,9	18,9			33,9	13,5
Noviembre	24,6	20,1			30,7	18,9			32,9	13,5
Diciembre	26,5	20,9			32,0	20,5			34,1	13,7
Promedio	26,3	20,3			31,5	19,7			34,2	14,4

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Tabla 5

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque 2016

Año 2016	Estaciones meteorológicas									
	Lambayeque		Pasabar		Cerro de arena		Jayanca		Pasaje sur	
Mes	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín
Enero	27,9	22,4			33,1	22,1			35,1	13,9
Febrero	30,0	23,1			34,6	23,3			35,3	14,4
Marzo	30,5	22,5			35,5	23,1			35,5	14,5
Abril	28,2	20,5			33,7	21,3			36,4	14,9
Mayo	26,2	18,2			29,8	18,8			36,7	14,7
Junio	25,2	17,4			30,3	16,9			35,3	12,9
Julio	24,2	16,6			29,3	15,9			32,4	12,1
Agosto	23,8	16,6			29,1	15,2			31,8	11,6
Setiembre	23,7	17,0			29,9	15,9			32,1	12,0
Octubre	24,0	16,9			30,1	16,6			33,1	13,2
Noviembre	24,8	16,5			30,5	15,6			32,9	13,1
Diciembre	26,4	18,5			32,2	18,6			34,0	13,4
Promedio	26,2	18,9			31,5	18,6			34,2	13,4

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Tabla 6

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque 2017

Año 2017	Estaciones meteorológicas									
	Lambayeque		Pasabar		Cerro de arena		Jayanca		Pasaje sur	
Mes	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín
Enero	30,5	21,0			34,4	21,7	34,3	20,7	34,4	13,5
Febrero	31,7	22,3			35,0	23,5	33,6	22,4	35,0	13,8
Marzo	31,6	23,5			33,0	23,2	32,1	22,3	35,4	14,8
Abril	28,4	20,6			32,6	21,0	31,4	20,0	35,2	13,6
Mayo	27,0	18,8			30,3	19,5	29,5	18,8		
Junio	25,3	18,0			27,3	17,1	27,3	17,3	31,4	12,5
Julio	22,4	16,3			25,4	15,3	25,6	15,0	31,3	12,2
Agosto	22,9	16,0			26,4	14,2	26,7	14,1	30,8	12,1
Setiembre	23,1	15,7			27,6	15,0	28,5	14,0	30,6	12,7
Octubre	23,1	15,5			27,7	15,0	29,0	14,4	31,7	12,7
Noviembre	23,6	14,9			28,1	14,6	29,2	14,8	33,3	12,6
Diciembre	26,5	16,5			30,8	16,0	31,9	17,2	33,9	13,2
Promedio	26,3	18,3			29,9	18,0	29,9	17,6	33,0	13,1

Fuente: SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Tabla 7

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque 2018

Año 2018	Estaciones meteorológicas									
	Lambayeque		Pasabar		Cerro de arena		Jayanca		Pasaje sur	
Mes	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín
Enero	27,8	18,7			32,9	18,7	33,4	18,5	34,6	13,1
Febrero	28,5	20,2	34,0	20,7	33,8	20,9	34,0	20,5	35,7	14,2
Marzo	27,1	19,2	34,7	19,9	34,0	20,1	34,0	19,1	35,7	14,4
Abril	27,1	18,8	34,5	19,3	33,3	19,7	33,2	18,4	35,7	15,0
Mayo	24,4	17,4	31,8	17,5	30,2	18,1	30,1	16,4	35,1	13,4
Junio	22,4	16,7	29,2	15,7	26,3	16,7	26,2	15,1	31,9	13,0
Julio	22,7	16,3	28,9	14,8	26,4	16,2	26,5	14,8	31,8	12,7
Agosto	22,6	16,0	30,6	14,9	27,8	16,1	28,0	14,6	34,3	13,5
Setiembre	22,9	15,9	32,0	14,8	28,4	16,1	29,1	14,7	34,7	13,3
Octubre	24,2	16,5	31,5	15,7	29,2	16,8	29,8	15,3	34,9	13,4
Noviembre	25,6	18,3	31,9	17,2	29,6	18,1	30,2	17,2	35,3	13,0
Diciembre	27,6	19,7	33,1	18,2	32,2	19,0	32,0	18,2	36,2	13,6
Promedio	25,2	17,8	32,0	17,2	30,3	18,0	30,5	16,9	34,7	13,6

Fuente : SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Tabla 8

Temperaturas máximas y mínimas promedio mensual en estaciones meteorológicas convencionales-provincia de Lambayeque 2019

Año 2018 Mes	Estaciones meteorológicas									
	Lambayeque		Pasabar		Cerro de arena		Jayanca		Pasaje sur	
	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín	Tmáx	Tmín
Enero	29,9	21,8	34,1	21,0	34,2	21,7	33,6	20,9	36,5	13,7
Febrero	30,3	23,6	32,4	22,6	34,3	23,2	33,3	21,9	37,1	14,4
Marzo	29,0	21,2	32,5	21,1	34,9	21,8	33,9	20,5	37,7	13,7
Abril	27,2	19,8	32,9	19,3	34,0	20,0	32,8	19,4	36,2	13,1
Mayo	26,9	19,1	31,9	17,8	31,8	18,6	31,3	17,5	36,6	13,6
Junio	24,5	17,1	31,3	15,2	29,2	16,4	28,9	15,0	36,1	12,8
Julio	22,3	15,9	30,4	13,8	27,8	15,4	27,1	14,0	36,1	13,1
Agosto	21,5	15,2	30,8	12,4	27,4	15,0	26,9	13,2	36,4	12,8
Setiembre	22,4	15,6	32,0	14,4	28,5	15,7	28,5	14,1	35,5	12,3
Octubre	23,2	16,0	32,7	15,8			30,4	15,2		
Noviembre	24,5	17,7	32,7	17,5			30,6	16,9		
Diciembre	26,9	19,7	33,8	19,0			32,0	17,5		
Promedio	25,7	18,6	32,3	17,5	31,3	18,6	30,8	17,2	36,5	13,3

Fuente : SENAMHI Zonal 2-Lambayeque.

Del análisis de los datos de temperaturas mostrados se permite hacer los siguientes comentarios y toma de decisiones:

- La estación meteorológica de Lambayeque tiene datos de temperaturas máximas y mínimas registrados desde el 2014 al 2019.
- La estación meteorológica de Pasabar tiene datos de temperaturas máximas y mínimas registrados sólo los años 2018 y 2019.
- La estación meteorológica de Cerro de arena tiene datos de temperaturas máximas y mínimas registrados desde octubre de 2014 al 2019.
- La estación meteorológica de Jayanca tiene datos de temperaturas máximas y mínimas registrados desde el 2017 al 2019.
- La estación meteorológica de Pasaje Sur tiene datos de temperaturas máximas y mínimas registrados desde setiembre de 2014 al 2019.

- Para la determinación de la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque se toma la decisión de considerar los datos de temperaturas de todas las estaciones meteorológicas con excepción de la estación meteorológica de Pasabar. Es importante precisar que, geográficamente la estación de Lambayeque, la de Jayanca y las de Cerro de Arena y Pasaje Sur están ubicadas en la parte sur, centro y norte de la provincia de Lambayeque respectivamente; esto nos permite tener un valor de la irradiancia solar promedio cuyo valor puede ser utilizado en todo el ámbito de la provincia.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Con los datos de temperaturas extremas (máximas y mínimas) promedio mensual indicadas en las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de las cuatro estaciones meteorológicas convencionales seleccionadas (Lambayeque, Jayanca, Cerro de Arena y Pasaje Sur) para el periodo 2014-2019 se procede a la estimación de la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque, ésta estimación es por mes y por año para cada una de las estaciones meteorológicas consideradas en el estudio; siguiendo el procedimiento que a continuación se detalla:

1.- Se determinan las temperaturas máximas y mínimas promedio mensual para cada año a partir de las temperaturas máximas y mínimas diarias registradas por SENAMHI. Se ha elaborado las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

2.- Se determina el día juliano J, considerando que el primero de enero le corresponde a J=1. Para efecto del cálculo de la irradiancia solar se toma como referencia el día 15 de cada mes; en base a esto se elabora la Tabla 9 en donde se indica el día calendario y su correspondiente día juliano.

Tabla 9
Día calendario y su correspondiente día juliano

Día/mes	J	Día/mes	J
15/enero	15	15/julio	196
15/febrero	46	15/agosto	227
15/marzo	74	15/setiembre	258
15/abril	105	15/octubre	288
15/mayo	135	15/noviembre	319
15/junio	166	15/diciembre	349

Fuente: Elaboración propia

3.- Se considera la latitud ϕ de cada estación meteorológica, expresada en grados, la misma que tiene signo negativo porque su ubicación está en el hemisferio sur.

4.- Definido el día juliano J, se calcula la declinación solar δ y el factor de corrección E_o de la excentricidad de la tierra aplicando las ecuaciones armónicas 4 y 5 respectivamente.

5.- Considerando la latitud ϕ y calculada la declinación solar δ , se calcula el ángulo horario ω aplicando la ecuación 6.

6.- Se calcula H_o , es decir la irradiancia solar extraterrestre diaria media mensual sobre una superficie horizontal, aplicando la ecuación 9 en donde H_{cs} toma el valor constante indicado en la ecuación 3.

7.- Se establece el valor de la constante “a” indicada en la ecuación 8 (modelo empírico de Bristow-Campbell) teniendo en consideración las condiciones climáticas de la zona de estudio. En nuestro caso, la provincia de Lambayeque tiene un clima sub tropical, seco, con escasez de lluvia y terreno prácticamente llano. Según Yousif, et al, 2013 [11] consideran una escala para la transmitancia atmosférica (grado de claridad del cielo) teniendo en cuenta si el cielo está nublado o soleado, el mismo que se indica en la Tabla 10 que a continuación se presenta.

Tabla 10

Valores de la transmitancia “a” según tipo de día

Tipo de día	Transmitancia atmosférica
Nublado	$0 < a < 0,2$
Parcialmente nublado	$0,2 < a < 0,6$
Soleado	$0,6 < a < 0,75$
Muy soleado	$0,75 < a < 1,0$

Fuente: Yousif, et al., 2013

Teniendo en cuenta el clima en la Provincia de Lambayeque, se considera un valor de “a” igual a 0,75.

8.- Se calculan los parámetros “b” y “c” del modelo empírico de Bristow-Campbell aplicando las ecuaciones 10 y 11, teniendo en cuenta el gradiente de temperatura y la latitud de la estación meteorológica en consideración.

9.- Finalmente se aplica la ecuación 8 para obtener H, i.e: el valor estimado de la irradiancia solar disponible en la zona de estudio.

En el Anexo 2 (Tablas del 11 al 31) se muestran los resultados obtenidos de la irradiancia solar (H) disponible en la zona de interés, así como la determinación de los parámetros “b” y “c” después de haber realizado los pasos indicados líneas arriba para las estaciones meteorológicas de Lambayeque, Cerro de Arena, Pasaje Sur y Jayanca para el periodo de 2014-2019.

La Tabla 32 muestra el resumen de los valores “b”, “c” y H promedios anuales para las estaciones meteorológicas consideradas en la provincia de Lambayeque.

Tabla 32

Valores de b,c y H (irradiancia solar promedio mensual anual en Kw-h/m²-día en las estaciones meteorológicas de la provincia de Lambayeque-periodo 2014-2019.

Año	Valores de b, c y H (irradiancia solar promedio mensual anual en Kw-h/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: elaboración propia

De los resultados obtenidos se puede observar que existe poca variabilidad de H por cada estación meteorológica en el periodo de estudio y que el valor promedio global para la provincia de Lambayeque es de 5,564 kW-h/m²-día, y que el menor valor corresponde al de la estación meteorológica de Lambayeque (3,873 kW-h/m²-día).

La temperatura diaria en cada estación meteorológica está sujeta a errores en la toma de lectura, por lo que trae consigo una propagación del error en la determinación de los valores de “b”, “c” y “H”; debido a que estos parámetros dependen del gradiente de temperatura ΔT ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$), según se indican en las ecuaciones 8, 10 y 11.

Para determinar el error ΔH de la irradiancia solar se aplica la ecuación de teoría de errores de Gauss, la misma que para nuestro caso toma la siguiente forma:

$$\Delta H = |\partial H / \partial \Delta T| \Delta(\Delta T) + |\partial H / \partial b| (\Delta b) + |\partial H / \partial c| (\Delta c) \quad \text{.....(12)}$$

Donde:

$$\Delta c = |\partial c / \partial \Delta T| \Delta(\Delta T) \quad \text{.....} \quad (13)$$

$$\Delta b = |\partial b / \partial c| \Delta c + |\partial b / \partial \Delta T| \Delta(\Delta T) \quad \text{.....} \quad (14)$$

Obteniéndose las siguientes expresiones:

$$\Delta c = 0.072 \Delta(\Delta T) \quad \text{.....} \quad (15)$$

$$\Delta b = [0.072 b \ln(\Delta T) + bc / \Delta T] \Delta(\Delta T) \quad \text{.....} \quad (16)$$

$$\partial H / \partial \Delta T = abc H_o (\Delta T)^{c-1} \exp(-b \Delta T^c) \quad \text{.....} \quad (17)$$

$$\partial H / \partial b = a H_o (\Delta T)^c \exp(-b \Delta T^c) \quad \text{.....} \quad (18)$$

$$\partial H / \partial c = ab H_o (\Delta T)^c \exp(-b \Delta T^c) \ln(\Delta T) \quad \text{.....} \quad (19)$$

La ecuación final para determinar el error ΔH de la irradiancia solar es:

$$\Delta H = ab H_o (\Delta T)^c \exp(-b \Delta T^c) \Delta(\Delta T) [2c / \Delta T + 0.144 \ln(\Delta T)] \quad \text{.....(20)}$$

En el Anexo 3 (tablas del 33 al 53) se muestran los resultados de ΔH promedios por mes, por año y por estación dentro del periodo de 2014 – 2019, en donde se ha considerado un valor de $a = 0,75$ (día soleado para la provincia de Lambayeque) y un error en la medición de la temperatura de $\Delta(\Delta T) = \pm 0.1$ °C.

La Tabla 54 muestra los resultados finales de los valores promedios de “b”, “c”, “H”, “ ΔH ” y el correspondiente porcentaje de error por cada estación meteorológica, así como el promedio general en la provincia de Lambayeque.

Tabla 54

Valores promedios de “b”, “c”, “H”, “ΔH” y porcentaje de error por estación meteorológica y general, periodo 2014-2019.

Estación	a		<c>	<H>	<ΔH(±)>	<(ΔH/H)x100>
Lambayeque	0,75	0,0273	1,6711	3,873	0,197	5,086
Cerro de arena	0,75	0,0470	1,3796	5,789	0,150	2,591
Pasaje sur	0,75	0,2430	0,7623	6,770	0,090	1,330
Jayanca	0,75	0,0586	1,2700	5,823	0,146	2,507
Prom.general		0,0940	1,2708	5,564	0,146	2,624

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN

Con los resultados obtenidos se puede diseñar sistemas que permitan aprovechar la energía solar disponible en la zona ya sea para colectores solares (calentamiento de un fluido) o sistemas fotovoltaicos para la generación de electricidad; sugiriendo utilizar el valor de 4.0 Kw-h/m²-día, garantizando de esta manera la funcionabilidad del sistema solar diseñado.

La investigación aporta como una propuesta concreta a incentivar el uso de la energía solar como una alternativa a la construcción de sistemas energéticos amigables con el medio ambiente.

CONCLUSIONES

En la Provincia de Lambayeque se cuenta con siete estaciones meteorológicas instaladas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), de las cuales cinco son convencionales y dos son automáticas. De todas ellas sólo cuatro de las cinco estaciones convencionales en el periodo 2014-2019 cuentan con datos de registros diarios de temperaturas máximas y mínimas, a saber: las estaciones de Lambayeque, Cerro de Arena, Pasaje Sur y Jayanca; datos que son indispensables para estimar la irradiancia solar H (kW-h/m^2 día) disponible en la provincia de Lambayeque mediante la aplicación del modelo empírico de Bristow-Campell.

Como aspectos preliminares a la estimación de la irradiancia solar disponible en la provincia de Lambayeque, se ha considerado lo siguiente:

- a) la conducta térmica de la fuente solar desde el punto de vista de la física atómica como un cuerpo negro y que con la aplicación de la ecuación de Ludwig Boltzmann se obtiene la constante solar H_{cs} cuyo valor es de $1\,380\text{ W/m}^2$ o su equivalente a $4,968\text{ MJ/m}^2\cdot\text{h}$.
- b) la termodinámica de la atmósfera como medio de transmisión de la radiación solar, el cual es muy complejo, en continuo movimiento, de masa heterogénea, de volumen específico, de presión y temperatura variables, lo que hace de manera general que no toda la radiación emitida por el sol llegue a la superficie terrestre.
- c) la geometría del movimiento solar, i.e, tener conocimiento del comportamiento dinámico del sistema tierra-sol, entender su posición y el movimiento aparente del sol con respecto a la tierra, determinándose de manera cuantitativa parámetros como el día juliano (J), la declinación solar (δ), el factor de corrección debido a la excentricidad de la tierra (E_o) y el ángulo horario (ω); los mismos que son necesarios para estimar la irradiancia solar H en la zona de estudio al aplicar el modelo empírico de Bristow-Campell.

Teniendo como datos de registro las temperaturas máximas y mínimas diarias de las cuatro estaciones meteorológicas convencionales instaladas e indicadas en la Tabla 2, proporcionadas por el SENAMHI en su página web www.senamhi.gob.pe, se procesaron para obtener las temperaturas máximas y mínimas promedio mensual, las mismas que se indican en las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Los datos de temperatura considerados corresponden al periodo de 2014 al 2019.

Luego se procedió a la estimación de la irradiancia solar H disponible en la provincia de Lambayeque considerando un parámetro $a = 0,75$, habida cuenta que su topografía es prácticamente plana, con un clima sub tropical, seco y con escasez de lluvia. Los resultados se indican en la Tabla 11, obteniéndose valores promedios globales de $3,873 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ para la estación Lambayeque, de $5,789 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ para la estación Cerro de Arena, de $6,770 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ para la estación Pasaje Sur y de $5,823 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ para la estación de Jayanca.

A partir de la ecuación empírica de Bristow-Campbell y teniendo en cuenta la ecuación de teoría de errores de Gauss se dedujo la ecuación (20), que permite estimar el error ΔH debido al error que se comete en la toma de lectura de las temperaturas. Se consideró un error de temperatura de $\Delta(\Delta T) = \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. La Tabla 12 muestra los resultados finales de los valores promedios de “b”, “c”, “H”, “ ΔH ” y el correspondiente porcentaje de error por cada estación meteorológica, así como el promedio general en la Provincia de Lambayeque, cuyo valor es de $5,564 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$, con un error de $\pm 0,146 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$ y un error porcentual de $\pm 2.624\%$. Este valor promedio general estimado está comprendido dentro del rango de valores estimados e indicados en el Atlas Solar del Perú (ítem 7.1, pág 20).

Con respecto a la medición de la irradiancia solar, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) a través de sus programas World Climate Research Program

(WCRP) y Baseline Surface Radiation Network (BSRN) obtienen valores estimados con una incertidumbre de $\pm 6\%$ y $\pm 2\%$ respectivamente. Por otro lado, el Atlas Solar del Perú del Ministerio de Energía y Minas indica que los valores de la irradiancia solar comprendido entre las latitudes de 6 a 8° oscilan entre 5 y 6,5 kW-h/m² día. La aplicación del modelo de Bristow-Campbell para estimar la irradiancia solar en la provincia de Lambayeque arroja resultados en valor y porcentaje de error aproximados a los indicados líneas arriba, por lo que resulta ser un modelo eficaz para la estimación de tan importante parámetro físico.

RECOMENDACIONES

Con los resultados obtenidos se puede diseñar sistemas que permitan aprovechar la energía solar disponible en la zona ya sea para colectores solares (calentamiento de un fluido) o sistemas fotovoltaicos para la generación de electricidad; recomendando utilizar el valor de $4,0 \text{ kW-h/m}^2\text{-día}$, garantizando de esta manera la funcionabilidad del sistema solar diseñado.

Recomendar a las autoridades competentes: Ministerio de Energía y Minas, Gobierno Regional y Gobiernos Locales a la realización de charlas respecto a las ventajas y bondades que ofrece el aprovechamiento de la energía solar para la generación de calor y electricidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ministerio de Energía y Minas. *Atlas Solar del Perú*. Lima-Perú.1990
2. Bequer, C. y otros. *Validación y Aplicación del Modelo Bristow-Campbell para la Estimación de la Radiación Solar Global de la Región Junín*. XX Simposio Peruano de Energía Solar. Tacna-Perú.2013
3. Torres, R. y otros. *Modelos de Estimación de la Radiación Solar Para el Altiplano Solar de Bolivia*. Universidad Mayor de San Andrés-Bolivia. 2012
4. Quispe, L. y otros. *Determinación y Análisis Espacio Temporal de la Radiación Solar Global en el Altiplano Puno*. Universidad Nacional del Altiplano. Puno-Perú. 2018
5. Ebrendileck, F y Ertekin, C. *Assesing solar radiation models using multiple variables over Turkey*. <https://www.researchgate.net/publication/257411552>. 2007
6. Raichijk, C. y Lanson, A. *Evaluación de distintos modelos de estimación de la radiación solar global basados en datos de temperatura*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 15, 2011. Argentina. ISSN 0329-5184. 2011
7. Donatelli, M. y Bellocchi, M. *RADEST 3.00: Software per la stima della radiazione solare globale*. Istituto Sperimentale per le Colture Industriali-Italia.2000
8. Fabio, J. y otros. *avaliação de modelos de estimativa da radiação solar com base na temperatura do ar o norte de minas gerais*. XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011. Guarapari-Brasil. 2011
9. Gastelo, J. y otros. *Estimación de la radiación solar diaria y ángulos de inclinación óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani*. Lambayeque-Peru. 2017
10. Stackhouse,Paul W.Jr y otros. *Surface meteorology and solar energy (SSE) Release 6.0 Methodology Version 3.2.0*. United State of America.2016

11. Yousif, C y otros. *Comparison of solar radiation in Marsaxlokk*. Renewable Energy, 49(june), 203-206. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.031>. 2013
12. Farfán, L. *Energía solar fotovoltaica para la explotación de agua subterránea, cuenca motupe-olmos-la leche*. Editorial Académica Española. ISBN 978-620-0-03337-6. 2018

ANEXOS

ANEXO 01: Modelos de radiación solar utilizando variables en Turquía

Table 1 Equation and variable types of 78 empirical models, and their parameter values suggested by their authors and derived from the parameterization dataset in this study for the estimation of monthly average daily solar radiation in Turkey

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Linear	1	2	$\frac{H}{H_c} = a + b \left(\frac{T_{\max}}{65} \right)$	$^a a = 0.390898; b = 0.284700; R_{\text{adj}}^2 = 89.63$	Mubiru et al. (2007)
Linear	2	2	$\frac{H}{H_c} = a + bRH$	$^a a = 0.766506; b = -0.004027; R_{\text{adj}}^2 = 91.8$	Mubiru et al. (2007)
Linear	3	2	$\frac{H}{H_c} = a \left(\frac{CLD}{8} \right) + b$	$^a a = -0.210872; b = 0.613172; R_{\text{adj}}^2 = 92.09$	Bashahu and Nkundabakura (1994)
Linear	4	3	$H = a + b \frac{\delta}{\delta_o} + cRH$	$^a a = 6.022603; b = 25.51734; c = -0.087263; R_{\text{adj}}^2 = 67.55$	Lewis (1983)
Linear	5	3	$H = a + b \frac{T_{\max}}{T_{\max}} + c\delta$	$^a a = 14.57274; b = -0.226471; c = 0.362681; R_{\text{adj}}^2 = 88.1$	Akpabio et al. (2004)
Linear	6	3	$H = a + bPPT + cET + dRH$	$^a a = 0.01; b = -0.065953; c = 0.100714; d = -0.000137; R_{\text{adj}}^2 = 71.26$	Akpabio et al. (2004)
Linear	7	4	$\frac{H}{H_c} = a + b \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right) + c \left(\frac{T_{\max}}{65} \right)$	$^a a = 0.337976; b = 0.474085; c = -0.257482; R_{\text{adj}}^2 = 93.61$	Mubiru et al. (2007)
Linear	8	4	$\frac{H}{H_c} = a + b \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right) + cRH$	$^a a = 0.472565; b = 0.239499; c = -0.001692; R_{\text{adj}}^2 = 93.41$	Mubiru et al. (2007)
Linear	9	4	$\frac{H}{H_c} = a + b \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right) + c \left(\frac{CLD}{8} \right)$	$^a a = 0.246267; b = 0.396390; c = 0.054627; R_{\text{adj}}^2 = 93.03$	Mubiru et al. (2007)
Linear	10	4	$\frac{H}{H_c} = a + b \left(\frac{dT}{\delta_o} \right)$	$^a a = 0.574249; b = -0.028613; R_{\text{adj}}^2 = 87.63$	Garcia (1994)
Linear	11	4	$H = a + b \frac{T_{\max}}{T_{\max}} + cRH + d\delta$	$^a a = 23.66163; b = -0.524037; c = -0.141161; d = 0.319297; R_{\text{adj}}^2 = 91.87$	Akpabio et al. (2004)
Linear	12	4	$H = a + b \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right) + c \sin \delta + dT$	$^a a = -0.68934; b = 22.30365; c = -1.90972; d = 0.226143; R_{\text{adj}}^2 = 71.34$	Togrul and Onat (1999)
Linear	13	4	$H = a + bH_o + c \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right) + dST$	$^a a = -6.25169; b = 0.518827; c = 13.95782; d = -0.113712; R_{\text{adj}}^2 = 93.38$	Togrul and Onat (1999)
Linear	14	4	$H = a + b \left(\frac{\delta}{\delta_o} \right) + c \sin \delta + dT_{\max}$	$^a a = -3.56271; b = 20.85381; c = -1.89423; d = 0.258863; R_{\text{adj}}^2 = 72.22$	Chen et al. (2006)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Linear	15	4	$H = H_o + (a + bRH) + cT + dPPT + e$	$a = -2.62798; b = -0.072791;$ $c = -0.353994; d = 10.75997;$ $e = -2.62798;$ $R_{adj}^2 = 70.39$	Chen et al. (2006)
Linear	16	4	$H = H_o + (a + bRH) + c \exp(dT) + ePPT + f$	$a = 1537.181; b = -0.072627;$ $c = -3079.63; d = 0.000115;$ $e = 10.74291; f = 1537.181;$ $R_{adj}^2 = 70.39$	Chen et al. (2006)
Linear	17	4	$H = aH_o + bT_{max} + cT_{min} + dCLD + e$	$a = 0.554497; b = -0.034582;$ $c = -0.096484; d = -1.16424;$ $e = 4.641982;$ $R_{adj}^2 = 93.22$	El-Metwally (2004)
Linear	18	4	$H = aH_o + bT_{max} + cT_{min} + dCLD$	$a = 0.555565; b = 0.097356;$ $c = -0.164688; d = -0.855572;$ $R_{adj}^2 = 92.76$	El-Metwally (2004)
Linear	19	5	$H = a + b \sin \delta + c \left(\frac{\delta}{\pi} \right) + dRH + eT$	$a = 7.634502; b = -1.88407;$ $c = 17.76839; d = -0.091261;$ $e = 0.234311;$ $R_{adj}^2 = 72.32$	Togrul and Onat (1999)
Linear	20	5	$H = a + bH_o + c \left(\frac{\delta}{\pi} \right) + dRH + eST$	$a = -0.723091; b = 0.511647;$ $c = 10.95655; d = -0.059228;$ $e = -0.102089;$ $R_{adj}^2 = 93.79$	Togrul and Onat (1999)
Linear	21	5	$H = a + b \frac{\delta}{\pi} + c \delta + dST + eH_o$	$a = 2.137826; b = 15.11701;$ $c = 0.18369; d = -0.132107;$ $e = 0.212853;$ $R_{adj}^2 = 93.49$	Akpabio et al. (2004)
Linear	22.1	5	$\frac{H}{H_o} = a + b \left(\frac{\delta}{\pi} \right)$	$a = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 PPT;$ $b = \beta_3 + \beta_4 T + \beta_5 PPT; \beta_0 = 0.3791;$ $\beta_1 = -0.0041; \beta_2 = -0.0176; \beta_3 = 0.481;$ $\beta_4 = 0.0043; \beta_5 = 0.0097;$ $R_{adj}^2 = 96.49$	Garipey (1980)
Linear	22.2	5		$\beta_0 = 0.321762; \beta_1 = -0.002638;$ $\beta_2 = -0.735821; \beta_3 = 0.452305;$ $\beta_4 = -0.00243; \beta_5 = 0.697446;$ $R_{adj}^2 = 93.84$	Garipey (1980)
Linear	23	5	$\frac{H}{H_o} = a + b \left(\frac{\delta}{\pi} \right) + cT_{max} + dRH + eT_{max} \left(\frac{\delta}{\pi} \right)$	$a = 0.411941; b = 0.571962;$ $c = -0.000841; d = -0.001809;$ $e = -0.006007;$ $R_{adj}^2 = 94.09$	Ododo et al. (1995)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Linear	24	5	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + cT + dRH$	$a = 0.415644; b = 0.402723;$ $c = -0.003717; d = -0.001422;$ $R^2_{adj} = 93.97$	Abdalla (1994)
Linear	25	6	$H = a + bH_0 + c\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + d\sin\delta + eRH + fT_{max}$	$a = 1.549262; b = 0.518433;$ $c = 11.01598; d = 0.085296;$ $e = -0.06626; f = -0.142291;$ $R^2_{adj} = 94.13$	Chen et al. (2006)
Linear	26	6	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + cT + dRH + e\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$a = 1 - \left(\frac{Z}{1000}\right); a = 0.385502; b = 0.375217;$ $c = -0.002492; d = -0.000909;$ $e = -0.015723;$ $R^2_{adj} = 94.07$	Abdalla (1994)
Linear	27	6	$H = a + bRH + c\frac{\delta}{\delta_0} + d\delta + eST + fET$	$a = 0.010007; b = -0.00837;$ $c = 2.882148; d = 0.06777;$ $e = -0.033046; f = 0.73563;$ $R^2_{adj} = 94.07$	Akpabio et al. (2004)
Linear	28	6	$H = a + bH_0 + c\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + d\sin\delta + eRH + fT$	$a = -0.56776; b = 0.507726;$ $c = 11.03729; d = 0.064318;$ $e = -0.059982; f = -0.125643;$ $R^2_{adj} = 93.99$	Togrul and Onat (1999)
Linear	29	6	$H = a + bH_0 + c\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + dRH + eST + fT$	$a = 0.612004; b = 0.479157;$ $c = 9.676819; d = -0.064334;$ $e = 0.212128; f = -0.327513;$ $R^2_{adj} = 94.13$	Togrul and Onat (1999)
Linear	30	6	$H = a + bH_0 + c\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + dRH + eST + fT_{max}$	$a = 2.505765; b = 0.510051;$ $c = 10.48351; d = -0.069328;$ $e = 0.046813; f = -0.179312;$ $R^2_{adj} = 94.15$	Chen et al. (2006)
Linear	31	7	$H = a + bH_0 + c\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + d\sin\delta + eRH + fST + gT_{max}$	$a = 2.479407; b = 0.511848;$ $c = 10.48468; d = 0.041869;$ $e = -0.069236; f = 0.044234;$ $g = -0.179043; R^2_{adj} = 94.15$	Chen et al. (2006)
Linear	32	7	$H = a + bH_0 + c\left(\frac{\delta}{\delta_0}\right) + d\sin\delta + eRH + fST + gT$	$a = 0.669946; b = 0.475698;$ $c = 9.653752; d = -0.067465;$ $e = -0.064547; f = 0.221404;$ $g = -0.333227;$ $R^2_{adj} = 94.13$	Alnaser (1993)
Linear	33	7	$H = a + b\frac{T_{min}}{T_{max}} + cRH + d\frac{\delta}{\delta_0} + e\delta + fST$	$a = 12.84263; b = -0.608551;$ $c = -0.058846; d = 12.05236;$ $e = 0.299944; f = -0.079603;$ $R^2_{adj} = 94.03$	Akpabio et al. (2004)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Linear	34	7	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{\delta}{S_0}\right) + c\left(\frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}\right) + d\left(\frac{RH}{RH_{\text{max}}}\right)$	$a = 0.429633; b = 0.326675;$ $c = -0.039831; d = -0.170545;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.03$	Ojoso and Komolafe (1987)
Linear	35	8	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{\delta}{S_0}\right)$	$a = \beta_0 + \beta_1\phi + \beta_2\lambda + \beta_3Z + \beta_4T$ $+ \beta_5\text{PPT}; b = 0.302952; \beta_0 \beta_1 = 0.000962;$ $\beta_2 = -0.007691; \beta_3 = 0.000019;$ $\beta_4 = -0.001658; \beta_5 = -0.39435;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.3$	Chen et al. (2006)
Linear	36	8	$\frac{H}{H_0} = a + b\text{PPT} + cT + d\left(\frac{\delta}{S_0}\right)$	$a = \beta_0 + \beta_1\lambda + \beta_2\phi + \beta_3Z;$ $b = \beta_4 + \beta_5\lambda + \beta_6\phi + \beta_7Z;$ $c = -0.001553; d = 0.292007;$ $\beta_0 = 0.602883; \beta_1 = -0.006156;$ $\beta_2 = 0.000016; \beta_3 = 0.000024;$ $\beta_4 = 0.383541; \beta_5 = -0.039188;$ $\beta_6 = 0.022732; \beta_7 = -0.000119;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.33$	Chen et al. (2006)
Linear	37	8	$H = a + bH_0 + cT + d\frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} + eRH + f\frac{\delta}{S_0} + g\delta$	$a = 4.72871; b = 0.303438;$ $c = -0.079114; d = -0.529171;$ $e = -0.060285; f = 10.84764;$ $g = 0.117452;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.18$	Akpabio et al. (2004)
Linear	38	8	$H = a + bH_0 + cT + d\frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} + eRH + f\frac{\delta}{S_0} + g\text{ST}$	$a = 0.091895; b = 0.485527;$ $c = -0.210993; d = -0.404883;$ $e = -0.063202; f = 9.541656;$ $g = 0.133362;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.17$	Akpabio et al. (2004)
Linear	39	9	$H = a + bH_0 + cT + d\frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} + eRH + f\frac{\delta}{S_0} + g\delta + h\text{PPT}$	$a = 0.000987; b = 0.07578;$ $c = -0.015434; d = -0.10495;$ $e = -0.01267; f = 2.156056; g = 0.017681;$ $h = -0.754329;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.18$	Akpabio et al. (2004)
Linear	40	10	$H = a + bH_0 + cT + d\frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} + eRH + f\frac{\delta}{S_0} + g\delta + h\text{ST} + i\text{ET}$	$a = 0.001002; b = 0.0734;$ $c = -0.029705; d = -0.079716;$ $e = -0.009213; f = 2.310708;$ $g = 0.020513; h = 0.006301; i = 0.699726;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.38$	Akpabio et al. (2004)
Linear	41	10	$H = a + bH_0 + c\delta + dRH + e\left(\frac{\delta}{S_0}\right) + fT + g\text{ST} + h\text{CLD} + i\text{PPT} + j\text{ET}$	$a = 0.001006; b = 0.087618;$ $c = 0.011258; d = -0.008688;$ $e = 2.152398; f = -0.043334;$ $g = 0.012473; h = -0.005645;$ $i = -0.877842; j = 0.964059;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.34$	Ertekin and Yaldiz (1999)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Quadratic	42	2	$\frac{H}{H_0} = a + b\text{CLD} + c\text{CLD}^2$	$a = 0.574122; b = 0.002713;$ $c = -0.004135;$ $R_{\text{adj}}^2 = 92.4$	Badesu (1999)
Quadratic	43	3	$\frac{H}{H_0} = a + b\text{CLD} + c\text{CLD}^2$	$a = \beta_0 + \beta_1 Z + \beta_2 Z^2;$ $b = \beta_3 + \beta_4 Z + \beta_5 Z^2;$ $c = \beta_6 + \beta_7 Z + \beta_8 Z^2; \beta_0 = 0.540648;$ $\beta_1 = 0.000133; \beta_2 = 0.0; \beta_3 = 0.009732;$ $\beta_4 = -0.000056; \beta_5 = 0.0; \beta_6 = -0.005428;$ $\beta_7 = 0.000007; \beta_8 = 0.0;$ $R_{\text{adj}}^2 = 93.64$	Scheifinger and Kromp-Kolb (2000)
Quadratic	44	3	$\frac{H}{H_0} = a + bT_{\text{max}} + c\text{RH} + d\text{RH} \cdot T_{\text{max}} + eT_{\text{max}}^2 + f\text{RH}^2$	$a = 2.125214; b = -0.051724;$ $c = -0.024182; d = 0.000474;$ $e = 0.000415; f = 0.000047;$ $R_{\text{adj}}^2 = 92.87$	Kara et al. (2001)
Quadratic	45	4	$H = a + b\text{PPT} + cT_{\text{max}} + dT_{\text{min}} + e n + f\text{PPT}^2 + gT_{\text{max}}^2 + hT_{\text{min}}^2 + i n^2 + j\text{PPT} \cdot T_{\text{min}} + kT_{\text{max}} \cdot T_{\text{min}} + l\text{PPT} \cdot T_{\text{max}} + mT_{\text{max}} \cdot n$	$a = 2.489594; b = 19.873;$ $c = 0.011016; d = -0.373619;$ $e = 0.214045; f = 149.5864; g = 0.003755;$ $h = -0.008874; i = -0.000569;$ $j = 1.824124; k = 0.014506; l = -2.78559;$ $m = -0.000707;$ $R_{\text{adj}}^2 = 89.62$	Ball et al. (2004)
Quadratic	46	5	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$	$a = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 \text{PPT} + \beta_3 \text{PPT}^2;$ $b = \beta_4 + \beta_5 T + \beta_6 \text{PPT} + \beta_7 \text{PPT}^2;$ $\beta_0 = 0.353089; \beta_1 = -0.002529;$ $\beta_2 = -1.42960; \beta_3 = 2.578818;$ $\beta_4 = 0.415862; \beta_5 = -0.002588;$ $\beta_6 = 1.341224; \beta_7 = -0.9791;$ $R_{\text{adj}}^2 = 93.86$	Chen et al. (2006)
Quadratic	47	5	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$	$a = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 \text{PPT} + \beta_4 \text{PPT}^2;$ $b = \beta_5 + \beta_6 T + \beta_7 T^2 + \beta_8 \text{PPT} + \beta_9 \text{PPT}^2;$ $\beta_0 = 0.177265; \beta_1 = -0.004525;$ $\beta_2 = 0.000527; \beta_3 = 0.329926;$ $\beta_4 = -2.90437; \beta_5 = 0.826597;$ $\beta_6 = -0.017198; \beta_7 = -0.000273;$ $\beta_8 = -1.4097; \beta_9 = 7.020359;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.26$	Chen et al. (2006)
Quadratic	48	8	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$	$a = \beta_0 + \beta_1 \phi$ $+ \beta_2 Z + \beta_3 Z + \beta_4 T + \beta_5 \text{PPT} + \beta_6 \text{PPT}^2;$ $b = 0.311853; \beta_0 = 0.624024;$ $\beta_1 = 0.000967; \beta_2 = -0.007899;$ $\beta_3 = 0.000019; \beta_4 = -0.001628;$ $\beta_5 = -0.207763; \beta_6 = -1.12951;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.31$	Chen et al. (2006)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Cubic	49	2	$\frac{H}{H_0} = a + b\text{CLD} + c\text{CLD}^2 + d\text{CLD}^3$	$^a a = 0.575859; b = 0.000531;$ $c = -0.003432; d = -0.000065;$ $R_{\text{adj}}^2 = 92.4$	Badesu (1999)
Cubic	50	5	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right)$	$^a a = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \beta_3 T^3 + \beta_4 \text{PPT} + \beta_5 \text{PPT}^2; b = \beta_6 + \beta_7 T + \beta_8 T^2 + \beta_9 T^3 + \beta_{10} \text{PPT} + \beta_{11} \text{PPT}^2;$ $\beta_0 = 0.18024; \beta_1 = -0.005101;$ $\beta_2 = 0.000354; \beta_3 = 0.000009;$ $\beta_4 = 0.440324; \beta_5 = -3.46451;$ $\beta_6 = 0.818569; \beta_7 = -0.014053;$ $\beta_8 = -0.000237; \beta_9 = -0.000007;$ $\beta_{10} = -1.57291; \beta_{11} = 7.970613;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.27$	Chen et al. (2006)
Cubic	51	5	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right) + cW_{\text{atm}}$	$^a W_{\text{atm}} = \text{RH}(4.7923 + 0.36477T + 0.00557^2 + 0.00037^3); a = 0.326484; b = 0.397841;$ $c = -0.000065;$ $R_{\text{adj}}^2 = 93.71$	Garg and Garg (1982)
Cubic	52	8	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right)$	$^a a = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 \lambda + \beta_3 Z + \beta_4 T + \beta_5 T^2 + \beta_6 T^3 + \beta_7 \text{PPT};$ $b = 0.286902; \beta_0 = 0.675012;$ $\beta_1 = 0.000684; \beta_2 = -0.00856;$ $\beta_3 = 0.000021; \beta_4 = -0.005689;$ $\beta_5 = 0.000408; \beta_6 = -0.000009;$ $\beta_7 = -0.327249;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.41$	Chen et al. (2006)
Cubic	53	8	$\frac{H}{H_0} = a + b\left(\frac{S}{S_0}\right)$	$^a a = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 \lambda + \beta_3 Z + \beta_4 T + \beta_5 T^2 + \beta_6 T^3 + \beta_7 \text{PPT} + \beta_8 \text{PPT}^2;$ $b = 0.292991; \beta_0 = 0.667641;$ $\beta_1 = 0.000725; \beta_2 = -0.008634;$ $\beta_3 = 0.000021; \beta_4 = -0.005820;$ $\beta_5 = 0.00041; \beta_6 = -0.000009;$ $\beta_7 = -0.118966; \beta_8 = -1.35936;$ $R_{\text{adj}}^2 = 94.42$	Chen et al. (2006)
Power	54	3	$\frac{H}{H_0} = a(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^b$	$^a a = 0.374893; b = 0.102905;$ $R_{\text{adj}}^2 = 87.52$	Richardson (1985) (from Liu and Scott 2001)
Power	55	3	$\frac{H}{H_0} = a(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5}$	$^a a = 0.105162;$ $R_{\text{adj}}^2 = 85.31$	Allen (1997)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Power	56	3	$\frac{H}{H_0} = aH_0(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b$	$a = 0.000688; b = 0.403539;$ $R^2_{\text{adj}} = 89.12$	Hargreaves et al. (1985)
Power	57	3	$H = a\left(\frac{s}{s_0}\right)^b \text{RH}^c$	$a = 49.59608; b = 1.038762;$ $c = -0.14967;$ $R^2_{\text{adj}} = 66.77$	Lewis (1983)
Power	58	4	$\frac{H}{H_0} = a\left(\frac{p}{p_0}\right)^{0.5} (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$	$a \frac{p}{p_0} = \exp(-0.0001184Z); a = 0.109731;$ $R^2_{\text{adj}} = 84.33$	Allen (1997)
Power	59	5	$\frac{H}{H_0} = a\left(\frac{s}{s_0}\right)^b T_{\max}^c \text{RH}^d$	$a = 2.289715; b = 0.4672;$ $c = -0.196656; d = -0.146156;$ $R^2_{\text{adj}} = 94.24$	Ododo et al. (1995)
Exponential	60	4	$H = \exp(aH_0 + bT_{\max} + cT_{\min} + d\text{CLD} + e)$	$a = 0.03894; b = 0.001156;$ $c = -0.009088; d = -0.07018;$ $e = 1.764562;$ $R^2_{\text{adj}} = 91.39$	El-Metwally (2004)
Hybrid	61	3	$H = a + b\left(\frac{s}{s_0}\right) + c\left[\left(\frac{s}{s_0}\right) + d\right](n - e)^2$	$a = 8.214452; b = 19.62276;$ $c = -0.000741; d = 0.107776;$ $e = 168.2006;$ $R^2_{\text{adj}} = 91.49$	Klabzuba et al. (1999) (from Trnka et al. 2005)
Hybrid	62	3	$\frac{H}{H_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + b$	$a = 0.022321; b = 0.410305;$ $R^2_{\text{adj}} = 87.52$	Hargreaves et al. (1985)
Hybrid	63	3	$\frac{H}{H_0} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b$	$a = 0.000195; b = 0.001762;$ $R^2_{\text{adj}} = 89.36$	Chen et al. (2004)
Hybrid	64	3	$\frac{H}{H_0} = 1 - \exp(-a\Delta T^b)$	$a = 0.453347; b = 0.151572;$ $R^2_{\text{adj}} = 87.52$	Thornton and Running (1999)
Hybrid	65.1.1	3	$\frac{H}{H_0} = a[1 - \exp(-b\Delta T^c)]$	$a = 0.68; b = 0.03;$ $c = 2.02;$ $R^2_{\text{adj}} = 89.18$	Goodin et al. (1999)
Hybrid	65.1.2	3		$a = 0.551523; b = 0.503121;$ $c = 0.549225;$ $R^2_{\text{adj}} = 87.53$	Goodin et al. (1999)
Hybrid	65.2.1	3		$a = 0.7; b = i \exp(j \Delta T); i = 0.036;$ $j = -0.154;$ $c = 2.4;$ $R^2_{\text{adj}} = 84.64$	Bristow-Champbell (1984)
Hybrid	65.2.2	3		$a = 5.210258; i = 0.046497; j = -0.010031;$ $c = 0.33334;$ $R^2_{\text{adj}} = 87.53$	Bristow-Champbell (1984)
Hybrid	66.1	3	$\frac{H}{H_0} = a \left[1 - \exp\left(-b \frac{H^*}{H_0}\right) \right]$	$a = 0.75; b = 2.61;$ $c = 0.76;$ $R^2_{\text{adj}} = 75.55$	Goodin et al. (1999)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Hybrid	66.2	3		$a = 0.520247; b = 1.172185;$ $c = 2.854609;$ $R_{adj}^2 = 87.36$	Donatelli and Marletto (1994)
Hybrid	67	3	$\frac{H}{H_0} = 0.75 \left[1 - \exp \left(\frac{-i \Delta T^c}{H_0} \right) \right]$	$i = 0.226;$ $R_{adj}^2 = 87.32$	Weiss et al. (2001)
Hybrid	68	3	$\frac{H}{H_0} = 0.75 \{ 1 - \exp [-i \Delta T^2 f(T) f(T_{min})] \}$	$a f(T) = 0.017 \exp [-0.053 T];$ $f(T_{min}) = \exp \left(\frac{T_{min}}{f} \right); i = 0.059279; j = 18.65319;$ $R_{adj}^2 = 86.94$	Weiss et al. (2001)
Hybrid	69	3	$H = \frac{i \Delta T^2 (a x)^b - i}{m}$	$a \tau = 0.8 + 0.12 \left\{ \frac{[(192 - m)]^{1.5}}{183} \right\}; i = 0.811985; j = 0.124485; a = 1.240485; k = -5.27135; l = 0.459078; m = 0.033812;$ $R_{adj}^2 = 88.28$	Mahmood and Hubbard (2002) (from Grant et al. 2004)
Hybrid	70	4	$\frac{H}{H_0} = a + bS + cW_{am}$	$W_{am} = 0.0049RH$ $\left[\frac{\exp(26.23 - \frac{940}{T})}{T} \right]; a = 0.382974; b = 0.023632;$ $c = -0.02991;$ $R_{adj}^2 = 93.03$	Garg and Garg (1982)
Hybrid	71.1.1	4	$\frac{H}{H_0} = a[1 - \exp(-b \Delta T^c)]$	$a = \beta_0 + \beta_1 Z; b = \beta_2 + \beta_3 \exp(\beta_4 \Delta T);$ $c = 1.5; \beta_0 = 0.65; \beta_1 = 0.008; \beta_2 = 0.031;$ $\beta_3 = 0.201; \beta_4 = -0.185;$ $R_{adj}^2 = 22.74$	Coops et al. (2000)
Hybrid	71.1.2	4		$a \beta_0 = 725.0186; \beta_1 = 0.059129;$ $\beta_2 = 0.000748; \beta_3 = 0.206475;$ $\beta_4 = -0.905552;$ $c = -0.030952;$ $R_{adj}^2 = 88.49$	Coops et al. (2000)
Hybrid	71.2	4		$a a = a; b = \beta_0 + \beta_1 \Delta T + \beta_2 \exp(\lambda);$ $c = \beta_3 b^{\beta_4}; a = 0.520247;$ $\beta_0 = 0.003474; \beta_1 = 0.275192; \beta_2 = 0.629601; \beta_3 = 0.495467;$ $\beta_4 = -0.881028; R_{adj}^2 = 87.35$	Baigorría et al. (2004)
Hybrid	72	4	$\frac{H}{H_0} = a \Delta T^b (1 + cPPT + dPPT^2)$	$a a = 0.010387; b = 0.059405;$ $c = -3.241653; d = 11.363045;$ $R_{adj}^2 = 91.91$	De Jong and Stewart (1993) (from Liu and Scott 2001)

Table 1 continued

Equation type	Model no.	Number of variables	Equation	Parameter values	Reference
Hybrid	73	4	$H = aH_o(T_{\max} - T_{\min})^{0.5} + bT_{\max} + cPPT + dPPT^2 + e$	$a = 0.096753; b = 0.076019; c = -52.7005; d = 200.0933; e = 0.946828; R_{\text{adj}}^2 = 88.87$	Hunt et al. (1998) (from Liu and Scott 2001)
Hybrid	74	4	$H = H_o \left[\frac{a\sqrt{(T_{\max} - T_{\min})}}{b\sqrt{(1 - \frac{CLD}{8})}} \right] nbsp; + nbbsp; ; c$	$a = 0.054902; b = 0.338597; c = 0.042365; R_{\text{adj}}^2 = 92.49$	Supit and Kappel (1998)
Hybrid	75	5	$\frac{H}{H_o} = a \ln(T_{\max} - T_{\min}) + b \left(\frac{S_o}{S_o} \right) nbsp; + nbbsp; ; d$	$a = 0.001714; b = 0.038699; c = 0.194745; d = -0.023328; R_{\text{adj}}^2 = 93.26$	Chen et al. (2004)
Hybrid	76	5	$\frac{H}{H_o} = \left[\Delta T \sin \lambda \left(\frac{P}{P_o} \right) \right]^{0.5} 7.9 \lambda^{-1}$	$\frac{P}{P_o} = \exp(-0.0001184Z); R_{\text{adj}}^2 = 86.58$	Chandel et al. (2005)
Hybrid	77.1	5	$\frac{H}{H_o} = k_H(a + bZ)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$	k_H is equal to 0.16 for inland and 0.19 for coastal; $a = 1; b = 2.7 \times 10^{-5}; R_{\text{adj}}^2 = 81.65$	Annandale et al. (2002) (from Ball et al. 1996)
Hybrid	77.2	5		$a = 0.001673; b = 2.265 \times 10^{-7}; R_{\text{adj}}^2 = 84.14$	Annandale et al. (2002) (from Ball et al. 1996)
Hybrid	78	7	$\frac{H}{H_o} = a + b \cos \lambda + cZ + d \left(\frac{S_o}{S_o} \right) + eT + fRH$	$a = -0.071158; b = 0.558422; c = 0.000021; d = 0.331757; e = -0.001658; f = -0.000641; R_{\text{adj}}^2 = 94.18$	Gopinathan (1988)

^a The parameter values were estimated based on the parameterization dataset in this study
 CLD cloudiness (%), ET evapotranspiration (m), H monthly average daily solar radiation on a horizontal surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), H_o : extraterrestrial solar radiation outside the atmosphere ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), k_H adjustment coefficient for coastal and inland locations, PPT precipitation (m), RH mean relative humidity (%), RH_{\max} maximum relative humidity (%), S day length (h), S_o maximum possible sunshine duration (h), T mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$) ($\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$); T_{\max} : maximum air temperature ($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} minimum air temperature ($^{\circ}\text{C}$), ST soil temperature ($^{\circ}\text{C}$), Z altitude (m), P actual site atmospheric pressure (kPa), P_o standard sea level pressure (kPa), W_{atm} atmospheric precipitable water vapor per unit volume of air (cm), ΔT : $T_{\max} - T_{\min}$, λ latitude (decimal degrees), ϕ longitude (decimal degrees), δ solar declination (degrees), and τ transmissivity coefficient

ANEXO 02: Resultados obtenidos de irradiancia solar en las estaciones meteorológicas de Lambayeque, Cerro de Arena, Pasaje Sur y Jayanca.

Tabla 23

Determinación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Pasaje sur-año 2014

J	Tmax(°C)	Tmin(°C)	Latφ(°)	Eo= 1+0.034*cos(360°J/365)	δ= 23.45°sen(360°(284+J)/365)	ω= arccos(-tanφ*tanδ)	Ho=(24/π)*Hcs*Eo* [cosφ*cosδ*senω + (π/180)*ω*senφ*senδ]	a	b	c	H(Kw-h/m2-día)
15			-5.92	1.032872826	-21.27	92.31	10.741	0.75			
46			-5.92	1.023885934	-13.29	91.40	10.854	0.75			
74			-5.92	1.009948411	-2.82	90.29	10.662	0.75			
105			-5.92	0.992027293	9.41	89.02	9.987	0.75			
135			-5.92	0.976746740	18.79	87.98	9.165	0.75			
166			-5.92	0.967362289	23.31	87.44	8.671	0.75			
196			-5.92	0.966913977	21.52	87.66	8.834	0.75			
227			-5.92	0.975497322	13.78	88.54	9.541	0.75			
258	32.9	12.3	-5.92	0.990894314	2.22	89.77	10.317	0.75	0.2012	0.7878	6.865
288	32.9	12.9	-5.92	1.008256891	-9.60	91.00	10.713	0.75	0.1747	0.8310	7.057
319	34.5	13.3	-5.92	1.023885934	-19.15	92.06	10.722	0.75	0.2337	0.7446	7.211
349	35.1	14.4	-5.92	1.032718509	-23.34	92.56	10.651	0.75	0.2062	0.7876	7.140
Irradiancia total promedio anual											28.273
Irradiancia promedio mensual disponible											7.068

Fuente: Elaboración propia

Tabla 24

Determinación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Pasaje sur-año 2015

J	Tmax(°C)	Tmin(°C)	Latφ(°)	Eo= 1+0.034*cos(360°J/365)	δ= 23.45°sen(360°(284+J)/365)	ω= arccos(-tanφ*tanδ)	Ho=(24/π)*Hcs*Eo* [cosφ*cosδ*senω + (π/180)*ω*senφ*senδ]	a	b	c	H(Kw-h/m2-día)
15	34.7	15.6	-5.92	1.032872826	-21.27	92.31	10.741	0.75	0.1432	0.8958	6.978
46	36.4	16.4	-5.92	1.023885934	-13.29	91.40	10.854	0.75	0.1747	0.8310	7.150
74	36.6	16.8	-5.92	1.009948411	-2.82	90.29	10.662	0.75	0.1669	0.8454	7.000
105	36.7	16.2	-5.92	0.992027293	9.41	89.02	9.987	0.75	0.1965	0.7950	6.633
135	36.2	14.8	-5.92	0.976746740	18.79	87.98	9.165	0.75	0.2461	0.7302	6.187
166	34.2	13.6	-5.92	0.967362289	23.31	87.44	8.671	0.75	0.2012	0.7878	5.769
196	30.7	12.6	-5.92	0.966913977	21.52	87.66	8.834	0.75	0.1167	0.9678	5.658
227	31.5	13.0	-5.92	0.975497322	13.78	88.54	9.541	0.75	0.1264	0.9390	6.145
258	32.3	13.3	-5.92	0.990894314	2.22	89.77	10.317	0.75	0.1402	0.9030	6.693
288	33.9	13.5	-5.92	1.008256891	-9.60	91.00	10.713	0.75	0.1918	0.8022	7.104
319	32.9	13.5	-5.92	1.023885934	-19.15	92.06	10.722	0.75	0.1528	0.8742	6.997
349	34.1	13.7	-5.92	1.032718509	-23.34	92.56	10.651	0.75	0.1918	0.8022	7.063
Irradiancia total promedio anual											79.377
Irradiancia promedio mensual disponible											6.615

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Determinación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Pasaje sur-año 2016

J	Tmax(°C)	Tmin(°C)	Latφ(°)	Eo= 1+0.034*cos(360°J/365)	δ= 23.45°sen(360°(284+J)/365)	ω= arccos(-tanφ*tanδ)	Ho=(24/π)*Hcs*Eo* [cosφ*cosδ*senω + (π/180)*ω*senφ*senδ]	a	b	c	H(Kw-h/m2-día)
15	35.1	13.9	-5.92	1.032872826	-21.27	92.31	10.741	0.75	0.2337	0.7446	7.224
46	35.3	14.4	-5.92	1.023885934	-13.29	91.40	10.854	0.75	0.2166	0.7662	7.260
74	35.5	14.5	-5.92	1.009948411	-2.82	90.29	10.662	0.75	0.2221	0.7590	7.138
105	36.4	14.9	-5.92	0.992027293	9.41	89.02	9.987	0.75	0.2526	0.7230	6.755
135	36.7	14.7	-5.92	0.976746740	18.79	87.98	9.165	0.75	0.2892	0.6870	6.261
166	35.3	12.9	-5.92	0.967362289	23.31	87.44	8.671	0.75	0.3239	0.6582	5.973
196	32.4	12.1	-5.92	0.966913977	21.52	87.66	8.834	0.75	0.1873	0.8094	5.848
227	31.8	11.6	-5.92	0.975497322	13.78	88.54	9.541	0.75	0.1830	0.8166	6.305
258	32.1	12.0	-5.92	0.990894314	2.22	89.77	10.317	0.75	0.1788	0.8238	6.807
288	33.1	13.2	-5.92	1.008256891	-9.60	91.00	10.713	0.75	0.1708	0.8382	7.046
319	32.9	13.1	-5.92	1.023885934	-19.15	92.06	10.722	0.75	0.1669	0.8454	7.040
349	34.0	13.4	-5.92	1.032718509	-23.34	92.56	10.651	0.75	0.2012	0.7878	7.086
Irradiancia total promedio anual											80.743
Irradiancia promedio mensual disponible											6.729

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26

Determinación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Pasaje sur-año 2017

J	Tmax(°C)	Tmin(°C)	Lat(°)	$E_o = 1 + 0.034 \cdot \cos(360^\circ J / 365)$	$\delta = 23.45 \cdot \sin(360^\circ (284 + J) / 365)$	$\omega = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$	$H_o = (24/\pi) \cdot H_{cs} \cdot E_o \cdot [\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega + (\pi/180) \cdot \omega \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta]$	a	b	c	H(Kw-h/m2-día)
15	34.4	13.5	-5.92	1.032872826	-21.27	92.31	10.741	0.75	0.2166	0.7662	7.184
46	35	13.8	-5.92	1.023885934	-13.29	91.40	10.854	0.75	0.2337	0.7446	7.309
74	35.4	14.8	-5.92	1.009948411	-2.82	90.29	10.662	0.75	0.2012	0.7878	7.094
105	35.2	13.6	-5.92	0.992027293	9.41	89.02	9.987	0.75	0.2594	0.7158	6.769
135			-5.92	0.976746740	18.79	87.98	9.165	0.75			
166	31.4	12.5	-5.92	0.967362289	23.31	87.44	8.671	0.75	0.1373	0.9102	5.617
196	31.3	12.2	-5.92	0.966913977	21.52	87.66	8.834	0.75	0.1632	0.8526	5.791
227	30.8	12.1	-5.92	0.975497322	13.78	88.54	9.541	0.75	0.1317	0.9246	6.163
258	30.6	12.7	-5.92	0.990894314	2.22	89.77	10.317	0.75	0.1122	0.9822	6.590
288	31.7	12.7	-5.92	1.008256891	-9.60	91.00	10.713	0.75	0.1402	0.9030	6.950
319	33.3	12.6	-5.92	1.023885934	-19.15	92.06	10.722	0.75	0.2062	0.7806	7.146
349	33.9	13.2	-5.92	1.032718509	-23.34	92.56	10.651	0.75	0.2062	0.7806	7.099
							Irradiancia total promedio anual				73.712
							Irradiancia promedio mensual disponible				6.701

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27

Determinación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Pasaje sur-año 2018

J	Tmax(°C)	Tmin(°C)	Lat(°)	$E_o = 1 + 0.034 \cdot \cos(360^\circ J / 365)$	$\delta = 23.45 \cdot \sin(360^\circ (284 + J) / 365)$	$\omega = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$	$H_o = (24/\pi) \cdot H_{cs} \cdot E_o \cdot [\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega + (\pi/180) \cdot \omega \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta]$	a	b	c	H(Kw-h/m2-día)
15	34.6	13.1	-5.92	1.032872826	-21.27	92.31	10.741	0.75	0.2526	0.7230	7.265
46	35.7	14.2	-5.92	1.023885934	-13.29	91.40	10.854	0.75	0.2526	0.7230	7.341
74	35.7	14.4	-5.92	1.009948411	-2.82	90.29	10.662	0.75	0.2398	0.7374	7.185
105	35.7	15.0	-5.92	0.992027293	9.41	89.02	9.987	0.75	0.2062	0.7806	6.657
135	35.1	13.4	-5.92	0.976746740	18.79	87.98	9.165	0.75	0.2664	0.7086	6.224
166	31.9	13.0	-5.92	0.967362289	23.31	87.44	8.671	0.75	0.1373	0.9102	5.617
196	31.8	12.7	-5.92	0.966913977	21.52	87.66	8.834	0.75	0.1432	0.8958	5.739
227	34.3	13.5	-5.92	0.975497322	13.78	88.54	9.541	0.75	0.2113	0.7734	6.370
258	34.7	13.3	-5.92	0.990894314	2.22	89.77	10.317	0.75	0.2461	0.7302	6.966
288	34.9	13.4	-5.92	1.008256891	-9.60	91.00	10.713	0.75	0.2526	0.7230	7.246
319	35.3	13.0	-5.92	1.023885934	-19.15	92.06	10.722	0.75	0.3147	0.6654	7.371
349	36.2	13.6	-5.92	1.032718509	-23.34	92.56	10.651	0.75	0.3435	0.6438	7.470
							Irradiancia total promedio anual				81.451
							Irradiancia promedio mensual disponible				6.788

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

Determinación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Pasaje sur-año 2019

J	Tmax(°C)	Tmin(°C)	Lat(°)	$E_o = 1 + 0.034 \cdot \cos(360^\circ J / 365)$	$\delta = 23.45 \cdot \sin(360^\circ (284 + J) / 365)$	$\omega = \arccos(-\tan\phi \cdot \tan\delta)$	$H_o = (24/\pi) \cdot H_{cs} \cdot E_o \cdot [\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega + (\pi/180) \cdot \omega \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta]$	a	b	c	H(Kw-h/m2-día)
15	36.5	13.7	-5.92	1.032872826	-21.27	92.31	10.741	0.75	0.3647	0.6294	7.463
46	37.1	14.4	-5.92	1.023885934	-13.29	91.40	10.854	0.75	0.3539	0.6366	7.525
74	37.7	13.7	-5.92	1.009948411	-2.82	90.29	10.662	0.75	0.5392	0.543	7.609
105	36.2	13.1	-5.92	0.992027293	9.41	89.02	9.987	0.75	0.4000	0.6078	6.985
135	36.6	13.6	-5.92	0.976746740	18.79	87.98	9.165	0.75	0.3877	0.6150	6.396
166	36.1	12.8	-5.92	0.967362289	23.31	87.44	8.671	0.75	0.4263	0.5934	6.092
196	36.1	13.1	-5.92	0.966913977	21.52	87.66	8.834	0.75	0.3877	0.6150	6.165
227	36.4	12.8	-5.92	0.975497322	13.78	88.54	9.541	0.75	0.4702	0.5718	6.749
258	35.5	12.3	-5.92	0.990894314	2.22	89.77	10.317	0.75	0.4129	0.6006	7.232
288			-5.92	1.008256891	-9.60	91.00	10.713	0.75			
319	36.4	14.3	-5.92	1.023885934	-19.15	92.06	10.722	0.75	0.2974	0.6798	7.340
349			-5.92	1.032718509	-23.34	92.56	10.651	0.75			
							Irradiancia total promedio anual				69.556
							Irradiancia promedio mensual disponible				6.956

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32

Valores de b , c y H (Irradiancia solar promedio mensual anual en Kw-h/m²-día) en las estaciones meteorológicas de la Provincia de Lambayeque - Periodo 2014-2019.

Valores de b , c y H (Irradiancia solar promedio mensual anual en Kw-h/m2-día)												
AÑO	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: Elaboración propia

**Anexo 03: Resultados de errores promedios mensual, anual y por estación
meteorológica de irradiancia solar-Periodo 2014-2019**

Tabla 33

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación lambayeque-año2014

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	7.8	10.815	0.75	0.0297	1.6232	4.582	0.210	4.586
Febrero	7.6	10.893	0.75	0.0290	1.6376	4.508	0.212	4.713
Marzo	8.7	10.657	0.75	0.0330	1.5584	4.938	0.197	3.990
Abril	8.8	9.933	0.75	0.0335	1.5512	4.643	0.182	3.925
Mayo	6.4	9.078	0.75	0.0253	1.7240	3.148	0.183	5.813
Junio	6.4	9.097	0.75	0.0253	1.7240	3.155	0.183	5.800
Julio	6.8	8.739	0.75	0.0264	1.6952	3.239	0.175	5.400
Agosto	7.2	9.472	0.75	0.0277	1.6640	3.711	0.187	5.044
Setiembre	7.4	10.292	0.75	0.0283	1.6520	4.154	0.202	4.870
Octubre	6.4	10.736	0.75	0.0253	1.724	3.723	0.216	5.802
Noviembre	6.2	10.787	0.75	0.0247	1.7384	3.601	0.216	5.990
Diciembre	8.4	10.734	0.75	0.0319	1.5800	4.841	0.201	4.159

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación lambayeque-año2015

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	5.9	10.815	0.75	0.0239	1.7800	3.633	0.223	6.148
Febrero	7.6	10.893	0.75	0.0297	1.6232	4.619	0.211	4.565
Marzo	7.3	10.657	0.75	0.0280	1.6592	4.247	0.211	4.968
Abril	7.5	9.933	0.75	0.0286	1.6448	4.062	0.195	4.794
Mayo	6.0	9.078	0.75	0.0315	1.5872	4.055	0.169	4.180
Junio	4.1	9.097	0.75	0.0253	1.7240	3.156	0.154	4.888
Julio	5.3	8.739	0.75	0.0267	1.688	3.289	0.162	4.916
Agosto	4.9	9.472	0.75	0.0247	1.7384	3.166	0.176	5.570
Setiembre	6.0	10.292	0.75	0.0242	1.7528	3.307	0.192	5.794
Octubre	6.2	10.736	0.75	0.0247	1.7384	3.585	0.217	6.043
Noviembre	4.5	10.787	0.75	0.0207	1.8608	2.326	0.204	8.785
Diciembre	3.6	10.734	0.75	0.0232	1.7816	3.163	0.171	5.415

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación lambayeque-año2016

Mes	$\Delta T(^{\circ}C)$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	5.5	10.815	0.75	0.0229	1.7888	3.112	0.217	6.963
Febrero	6.9	10.893	0.75	0.0267	1.6880	4.100	0.218	5.316
Marzo	8.0	10.657	0.75	0.0304	1.6088	4.616	0.204	4.426
Abril	7.7	9.933	0.75	0.0293	1.6304	4.160	0.193	4.650
Mayo	8.0	9.078	0.75	0.0304	1.6088	3.932	0.174	4.419
Junio	7.8	9.097	0.75	0.0297	1.6232	3.885	0.177	4.544
Julio	7.6	8.739	0.75	0.0290	1.6376	3.619	0.170	4.708
Agosto	7.2	9.472	0.75	0.0277	1.6640	3.771	0.187	4.967
Setiembre	6.7	10.292	0.75	0.0261	1.7024	3.755	0.206	5.492
Octubre	7.1	10.736	0.75	0.0274	1.6736	4.161	0.214	5.135
Noviembre	8.3	10.787	0.75	0.0315	1.5872	4.820	0.204	4.222
Diciembre	7.9	10.734	0.75	0.0300	1.616	4.416	0.207	4.682

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación lambayeque-año2017

Mes	$\Delta T(^{\circ}C)$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	8.5	10.815	0.75	0.0322	1.5728	4.923	0.202	4.104
Febrero	7.2	10.893	0.75	0.0277	1.6640	4.271	0.213	4.993
Marzo	5.8	10.657	0.75	0.0237	1.7672	3.283	0.193	5.890
Abril	7.2	9.933	0.75	0.0277	1.6640	3.895	0.194	4.987
Mayo	7.1	9.078	0.75	0.0274	1.6736	3.522	0.182	5.168
Junio	6.8	9.097	0.75	0.0264	1.6952	3.368	0.182	5.400
Julio	6.4	8.739	0.75	0.0253	1.7240	3.031	0.176	5.812
Agosto	6.4	9.472	0.75	0.0253	1.7240	3.285	0.191	5.807
Setiembre	6.4	10.292	0.75	0.0253	1.7240	3.570	0.207	5.806
Octubre	6.2	10.736	0.75	0.0247	1.7384	3.585	0.217	6.043
Noviembre	7.2	10.787	0.75	0.0277	1.6640	4.230	0.211	4.986
Diciembre	8.0	10.734	0.75	0.0304	1.6088	4.652	0.206	4.428

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación lambayeque-año2018

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	8.8	10.815	0.75	0.0335	1.5512	5.055	0.198	3.927
Febrero	7.7	10.893	0.75	0.0293	1.6304	4.561	0.210	4.606
Marzo	7.4	10.657	0.75	0.0283	1.6520	4.299	0.209	4.872
Abril	6.6	9.933	0.75	0.0259	1.7096	3.569	0.200	5.603
Mayo	6.2	9.078	0.75	0.0247	1.7384	3.031	0.183	6.047
Junio	5.2	9.097	0.75	0.0222	1.8104	3.000	0.147	4.902
Julio	5.8	8.739	0.75	0.0237	1.7672	2.694	0.177	6.555
Agosto	6.4	9.472	0.75	0.0253	1.7240	3.285	0.191	5.811
Setiembre	6.8	10.292	0.75	0.0264	1.6952	3.815	0.206	5.394
Octubre	7.1	10.736	0.75	0.0274	1.6736	4.166	0.214	5.129
Noviembre	6.9	10.787	0.75	0.0267	1.6880	4.056	0.216	5.326
Diciembre	7.3	10.734	0.75	0.0280	1.6592	4.276	0.212	4.947

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación lambayeque-año2019

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	8.1	10.815	0.75	0.0309	1.5983	4.730	0.206	4.356
Febrero	6.7	10.893	0.75	0.0261	1.7024	3.974	0.218	5.493
Marzo	7.8	10.657	0.75	0.0297	1.6232	4.519	0.206	4.565
Abril	7.4	9.933	0.75	0.0283	1.6520	4.001	0.195	4.879
Mayo	7.8	9.078	0.75	0.0297	1.6520	3.849	0.179	4.647
Junio	7.4	9.097	0.75	0.0283	1.6520	3.664	0.179	4.874
Julio	6.4	8.739	0.75	0.0253	1.7240	4.069	0.176	4.331
Agosto	6.3	9.472	0.75	0.0250	1.7312	3.225	0.191	5.930
Setiembre	6.8	10.292	0.75	0.0264	1.6952	3.811	0.206	5.400
Octubre	7.2	10.736	0.75	0.0277	1.6640	4.209	0.212	5.042
Noviembre	6.8	10.787	0.75	0.0264	1.6952	3.994	0.216	5.408
Diciembre	7.2	10.734	0.75	0.0277	1.6640	4.208	0.212	5.037

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Cerro de arena-año2014

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero		10.741	0.75					
Febrero		10.854	0.75					
Marzo		10.662	0.75					
Abril		9.987	0.75					
Mayo		9.165	0.75					
Junio		8.671	0.75					
Julio		8.834	0.75					
Agosto		9.541	0.75					
Setiembre		10.317	0.75					
Octubre	12.8	10.713	0.75	0.0484	1.3494	6.259	0.155	2.476
Noviembre	12.4	10.722	0.75	0.0458	1.3782	6.196	0.158	2.550
Dicembre	12.7	10.651	0.75	0.0477	1.3566	6.204	0.155	2.498

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Cerro de arena-año2015

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	12.4	10.741	0.75	0.0458	1.3782	6.204	0.160	2.580
Febrero	11.9	10.854	0.75	0.0427	1.4142	6.170	0.166	2.690
Marzo	12.2	10.662	0.75	0.0451	1.3854	6.140	0.160	2.606
Abril	13.2	9.987	0.75	0.0512	1.3206	5.893	0.141	2.393
Mayo	10.4	9.165	0.75	0.0352	1.5220	4.891	0.155	3.179
Junio	9.9	8.671	0.75	0.0331	1.5582	4.498	0.150	3.335
Julio	12.0	8.834	0.75	0.0433	1.4070	5.038	0.134	2.669
Agosto	11.8	9.541	0.75	0.0422	1.4214	5.405	0.147	2.714
Setiembre	12.0	10.317	0.75	0.0433	1.4070	5.884	0.157	2.670
Octubre	12.0	10.713	0.75	0.0433	1.4070	6.110	0.163	2.668
Noviembre	11.8	10.722	0.75	0.0422	1.4214	6.074	0.165	2.720
Dicembre	11.5	10.651	0.75	0.0405	1.4430	5.967	0.156	2.623

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Cerro de arena-año2016

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	11.0	10.741	0.75	0.0380	1.4790	5.900	0.175	2.963
Febrero	11.3	10.854	0.75	0.0395	1.4574	6.034	0.174	2.876
Marzo	12.4	10.662	0.75	0.0458	1.3782	6.161	0.158	2.559
Abril	12.4	9.987	0.75	0.0458	1.3782	5.771	0.148	2.564
Mayo	11.0	9.165	0.75	0.0380	1.4790	5.034	0.149	2.966
Junio	13.4	8.671	0.75	0.0527	1.3062	5.143	0.120	2.332
Julio	13.4	8.834	0.75	0.0527	1.3062	5.240	0.122	2.333
Agosto	13.9	9.541	0.75	0.0568	1.2702	5.722	0.129	2.258
Setiembre	14.0	10.317	0.75	0.0577	1.2630	6.200	0.139	2.239
Octubre	13.5	10.713	0.75	0.0535	1.2990	6.368	0.148	2.331
Noviembre	14.9	10.722	0.75	0.0663	1.1982	6.553	0.138	2.106
Diciembre	13.6	10.651	0.75	0.0543	1.2918	6.346	0.147	2.320

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Cerro de arena-año2017

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	12.7	10.741	0.75	0.0477	1.3566	6.257	0.156	2.495
Febrero	11.5	10.854	0.75	0.0405	1.4430	6.081	0.178	2.928
Marzo	9.8	10.662	0.75	0.0327	1.5654	5.497	0.188	3.426
Abril	11.6	9.987	0.75	0.0411	1.4358	5.617	0.156	2.777
Mayo	10.8	9.165	0.75	0.0370	1.4934	4.986	0.151	3.025
Junio	10.2	8.671	0.75	0.0343	1.5366	4.576	0.149	3.253
Julio	10.1	8.834	0.75	0.0339	1.5438	4.637	0.153	3.298
Agosto	12.2	9.541	0.75	0.0445	1.3926	5.477	0.143	2.618
Setiembre	12.6	10.317	0.75	0.0470	1.3638	5.994	0.151	2.525
Octubre	12.7	10.713	0.75	0.0477	1.3566	6.241	0.156	2.493
Noviembre	13.5	10.722	0.75	0.0535	1.2990	6.373	0.168	2.635
Diciembre	14.8	10.651	0.75	0.0652	1.2054	6.499	0.138	2.126

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Cerro de arena-año2018

Mes	$\Delta T(^{\circ}C)$	Ho	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	14.2	10.741	0.75	0.0594	1.2486	6.481	0.144	2.217
Febrero	12.9	10.854	0.75	0.0491	1.3422	6.359	0.156	2.455
Marzo	13.9	10.662	0.75	0.0568	1.2702	6.394	0.144	2.260
Abril	13.6	9.987	0.75	0.0543	1.2918	5.950	0.138	2.321
Mayo	12.1	9.165	0.75	0.0439	1.3998	5.612	0.138	2.466
Junio	9.6	8.671	0.75	0.0439	1.5798	5.142	0.139	2.707
Julio	10.2	8.834	0.75	0.0343	1.5366	4.663	0.152	3.253
Agosto	11.7	9.541	0.75	0.0416	1.4286	5.385	0.148	2.743
Setiembre	12.3	10.317	0.75	0.0451	1.3854	5.940	0.154	2.587
Octubre	12.4	10.713	0.75	0.0458	1.3782	6.188	0.159	2.569
Noviembre	11.5	10.722	0.75	0.0405	1.443	6.008	0.168	2.804
Diciembre	13.2	10.651	0.75	0.0512	1.3206	6.287	0.150	2.392

Fuente: Elaboración propia

Tabla 44

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Cerro de arena-año2019

Mes	$\Delta T(^{\circ}C)$	Ho	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	12.5	10.741	0.75	0.0464	1.3710	6.222	0.159	2.549
Febrero	11.1	10.854	0.75	0.0384	1.4718	5.984	0.175	2.926
Marzo	13.1	10.662	0.75	0.0505	1.3278	6.278	0.151	2.412
Abril	14.0	9.987	0.75	0.0577	1.2630	6.004	0.122	2.030
Mayo	13.2	9.165	0.75	0.0512	1.3206	5.408	0.129	2.391
Junio	12.8	8.671	0.75	0.0484	1.3494	5.066	0.125	2.465
Julio	12.4	8.834	0.75	0.0458	1.3782	5.102	0.131	2.571
Agosto	12.4	9.541	0.75	0.0458	1.3782	5.510	0.141	2.568
Setiembre	12.8	10.317	0.75	0.0484	1.3494	6.028	0.149	2.475
Octubre	16.3	10.713	0.75	0.0834	1.0974	6.685	0.129	1.932
Noviembre		10.722	0.75					
Diciembre		10.651	0.75					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Pasaje sur-año2014

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero		10.741	0.75					
Febrero		10.854	0.75					
Marzo		10.662	0.75					
Abril		9.987	0.75					
Mayo		9.165	0.75					
Junio		8.671	0.75					
Julio		8.834	0.75					
Agosto		9.541	0.75					
Setiembre	20.6	10.317	0.75	0.2012	0.7878	6.865	0.098	1.423
Octubre	20.0	10.713	0.75	0.1747	0.8310	7.057	0.111	1.567
Noviembre	21.2	10.722	0.75	0.2337	0.7446	7.211	0.096	1.330
Diciembre	20.7	10.651	0.75	0.2062	0.7876	7.140	0.097	1.363

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Pasaje sur-año2015

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	19.1	10.741	0.75	0.1432	0.8958	6.978	0.112	1.612
Febrero	20.0	10.854	0.75	0.1747	0.8310	7.150	0.108	1.505
Marzo	19.8	10.662	0.75	0.1669	0.8454	7.000	0.107	1.533
Abril	20.5	9.987	0.75	0.1965	0.7950	6.633	0.095	1.430
Mayo	21.4	9.165	0.75	0.2461	0.7302	6.187	0.081	1.304
Junio	20.6	8.671	0.75	0.2012	0.7878	5.769	0.082	1.422
Julio	18.1	8.834	0.75	0.1167	0.9678	5.658	0.0975	1.724
Agosto	18.5	9.541	0.75	0.1264	0.9390	6.145	0.103	1.676
Setiembre	19.0	10.317	0.75	0.1402	0.9030	6.693	0.109	1.622
Octubre	20.4	10.713	0.75	0.1918	0.8022	7.104	0.103	1.450
Noviembre	19.4	10.722	0.75	0.1528	0.8742	6.997	0.110	1.578
Diciembre	20.4	10.651	0.75	0.1918	0.8022	7.063	0.102	1.450

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Pasaje sur-año2016

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	21.2	10.741	0.75	0.2337	0.7446	7.224	0.096	1.331
Febrero	20.9	10.854	0.75	0.2166	0.7662	7.260	0.100	1.377
Marzo	21.0	10.662	0.75	0.2221	0.7590	7.138	0.097	1.364
Abril	21.5	9.987	0.75	0.2526	0.7230	6.755	0.087	1.284
Mayo	22.0	9.165	0.75	0.2892	0.6870	6.261	0.075	1.199
Junio	22.4	8.671	0.75	0.3239	0.6582	5.973	0.068	1.133
Julio	20.3	8.834	0.75	0.1873	0.8094	5.848	0.085	1.456
Agosto	20.2	9.541	0.75	0.1830	0.8166	6.305	0.093	1.478
Setiembre	20.1	10.317	0.75	0.1788	0.8238	6.807	0.101	1.485
Octubre	19.9	10.713	0.75	0.1708	0.8382	7.046	0.107	1.513
Noviembre	19.8	10.722	0.75	0.1669	0.8454	7.040	0.108	1.533
Diciembre	20.6	10.651	0.75	0.2012	0.7878	7.086	0.101	1.423

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Pasaje sur-año2017

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	20.9	10.741	0.75	0.2166	0.7662	7.184	0.099	1.377
Febrero	21.2	10.854	0.75	0.2337	0.7446	7.309	0.096	1.317
Marzo	20.6	10.662	0.75	0.2012	0.7878	7.094	0.101	1.423
Abril	21.6	9.987	0.75	0.2594	0.7158	6.769	0.085	1.254
Mayo		9.165	0.75					
Junio	18.9	8.671	0.75	0.1373	0.9102	5.617	0.092	1.637
Julio	19.7	8.834	0.75	0.1632	0.8526	5.791	0.089	1.541
Agosto	18.7	9.541	0.75	0.1317	0.9246	6.163	0.083	1.342
Setiembre	17.9	10.317	0.75	0.1122	0.9822	6.590	0.115	1.741
Octubre	19.0	10.713	0.75	0.1402	0.9030	6.950	0.113	1.622
Noviembre	20.7	10.722	0.75	0.2062	0.7806	7.146	0.100	1.404
Diciembre	20.7	10.651	0.75	0.2062	0.7806	7.099	0.099	1.399

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Pasaje sur-año2018

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	21.5	10.741	0.75	0.2526	0.7230	7.265	0.094	1.294
Febrero	21.5	10.854	0.75	0.2526	0.7230	7.341	0.095	1.294
Marzo	21.3	10.662	0.75	0.2398	0.7374	7.185	0.094	1.310
Abril	20.7	9.987	0.75	0.2062	0.7806	6.657	0.093	1.394
Mayo	21.7	9.165	0.75	0.2664	0.7086	6.224	0.078	1.258
Junio	18.8	8.671	0.75	0.1373	0.9102	5.617	0.089	1.578
Julio	19.1	8.834	0.75	0.1432	0.8958	5.739	0.092	1.605
Agosto	20.8	9.541	0.75	0.2113	0.7734	6.370	0.087	1.363
Setiembre	21.4	10.317	0.75	0.2461	0.7302	6.966	0.091	1.306
Octubre	21.5	10.713	0.75	0.2526	0.7230	7.246	0.094	1.297
Noviembre	22.3	10.722	0.75	0.3147	0.6654	7.371	0.084	1.141
Diciembre	22.6	10.651	0.75	0.3435	0.6438	7.470	0.083	1.105

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Pasaje sur-año2019

Mes	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	22.8	10.741	0.75	0.3647	0.6294	7.463	0.079	1.053
Febrero	22.7	10.854	0.75	0.3539	0.6366	7.525	0.081	1.074
Marzo	24.0	10.662	0.75	0.5392	0.5430	7.609	0.059	0.775
Abril	23.1	9.987	0.75	0.4000	0.6078	6.985	0.068	0.978
Mayo	23.0	9.165	0.75	0.3877	0.6150	6.396	0.064	1.000
Junio	23.3	8.671	0.75	0.4263	0.5934	6.092	0.057	0.937
Julio	23.0	8.834	0.75	0.3877	0.6150	6.165	0.062	1.005
Agosto	23.6	9.541	0.75	0.4702	0.5718	6.749	0.062	0.918
Setiembre	23.2	10.317	0.75	0.4129	0.6006	7.232	0.070	0.974
Octubre		10.713	0.75					
Noviembre	22.1	10.722	0.75	0.2974	0.6798	7.340	0.087	1.180
Diciembre		10.651	0.75					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Jayanca-año2017

Mes	$\Delta T_{\max} (^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	13.6	10.778	0.75	0.061	1.2394	6.350	0.149	2.345
Febrero	11.2	10.874	0.75	0.043	1.4122	5.935	0.173	2.917
Marzo	9.8	10.660	0.75	0.036	1.5130	5.407	0.186	3.441
Abril	11.4	9.960	0.75	0.044	1.3978	5.482	0.157	2.859
Mayo	10.7	9.121	0.75	0.04	1.4482	4.864	0.150	3.087
Junio	10.0	8.620	0.75	0.037	1.4986	4.432	0.148	3.346
Julio	10.6	8.786	0.75	0.04	1.4554	4.663	0.146	3.121
Agosto	12.6	9.858	0.75	0.052	1.3114	5.655	0.144	2.548
Setiembre	14.5	10.305	0.75	0.07	1.1746	6.194	0.135	2.184
Octubre	14.6	10.725	0.75	0.0710	1.1674	6.458	0.140	2.175
Noviembre	14.4	10.755	0.75	0.069	1.1818	6.449	0.142	2.203
Diciembre	14.7	10.693	0.75	0.072	1.1602	6.452	0.139	2.156

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m2-día)-Estación Jayanca-año2018

Mes	$\Delta T_{\max} (^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	14.9	10.778	0.75	0.075	1.1458	6.528	0.139	2.133
Febrero	13.5	10.874	0.75	0.06	1.2466	6.392	0.151	2.361
Marzo	14.9	10.660	0.75	0.075	1.1458	6.457	0.137	2.129
Abril	14.8	9.960	0.75	0.073	1.1530	6.022	0.129	2.148
Mayo	13.7	9.121	0.75	0.062	1.2322	5.385	0.125	2.330
Junio	11.1	8.620	0.75	0.042	1.4194	4.683	0.138	2.957
Julio	11.7	8.786	0.75	0.046	1.3762	4.889	0.136	2.778
Agosto	13.4	9.858	0.75	0.059	1.2538	5.780	0.139	2.411
Setiembre	14.4	10.305	0.75	0.069	1.1818	6.179	0.136	2.204
Octubre	14.5	10.725	0.75	0.07	1.1746	6.445	0.141	2.185
Noviembre	13.0	10.755	0.75	0.055	1.2826	6.237	0.154	2.473
Diciembre	13.8	10.693	0.75	0.063	1.2250	6.329	0.146	2.307

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53

Error en la estimación de la irradiancia solar (Kw-h/m²-día)-Estación Jayanca-año2019

Mes	$\Delta T_{\max} (^{\circ}\text{C})$	H_o	a	b	c	H	$\Delta H(\pm)$	$(\Delta H/H) \times 100$
Enero	12.7	10.778	0.75	0.0530	1.3042	6.203	0.157	2.530
Febrero	11.4	10.874	0.75	0.044	1.3978	5.985	0.171	2.859
Marzo	13.4	10.660	0.75	0.059	1.2538	6.251	0.149	2.380
Abril	13.4	9.960	0.75	0.059	1.2538	5.841	0.139	2.383
Mayo	13.8	9.121	0.75	0.063	1.2250	5.399	0.212	3.923
Junio	13.9	8.620	0.75	0.064	1.2178	5.114	0.116	2.273
Julio	13.1	8.786	0.75	0.056	1.2754	5.112	0.125	2.439
Agosto	13.7	9.858	0.75	0.062	1.2322	5.820	0.136	2.332
Setiembre	13.7	10.305	0.75	0.062	1.2322	6.084	0.142	2.337
Octubre	15.2	10.725	0.75	0.079	1.1242	5.430	0.137	2.516
Noviembre	13.7	10.755	0.75	0.062	1.2322	6.350	0.148	2.331
Diciembre	14.5	10.693	0.75	0.07	1.1746	6.427	0.140	2.186

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54

Valores promedios de "b", "c", "H", " ΔH " y porcentaje de error por estación meteorológica y general, periodo 2014-2019

Estación	a		<c>	<H>	< $\Delta H(\pm)$ >	<($\Delta H/H$)x100>
Lambayeque	0.75	0.0273	1.6711	3.873	0.197	5.086
Cerro de arena	0.75	0.0470	1.3796	5.789	0.150	2.591
Pasaje sur	0.75	0.2430	0.7623	6.770	0.090	1.330
Jayanca	0.75	0.0586	1.2700	5.823	0.146	2.507
Promedio general		0.0940	1.2708	5.564	0.146	2.624

Fuente: Elaboración propia