

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física Aplicada

**APLICACIÓN DEL MODELO BRISTOW-CAMPBELL PARA
ESTIMAR LA IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN LA
ZONA ALTO ANDINA DE LA REGIÓN TACNA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Lilian Katerin Caceres Masco

Para optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

TACNA - PERÚ

2021

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°340

En la ciudad de Tacna, en el auditorium de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, siendo las 16:50 h del día 16 de diciembre de 2019, estando presente el jurado calificador nominado por resolución de Facultad N° 9617-2019-FACI/UNJBG, conformado por los siguientes docentes:

Dr. Roberto Encarnación Supo Hallasi	Presidente
Msc. Carlos Armando Polo Bravo	Secretario
Dr. Jesús Alfredo Chacaltana García	Miembro

Acto seguido se dió lectura a la resolución correspondiente, y del mismo modo se dió lectura al Artículo 22 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias.

A continuación, el presidente del jurado instó a la bachiller Lilian Katerin Caceres Masco, a exponer la tesis titulada “Aplicación del modelo Bristow-Campbell para estimar la irradiación solar global en la zona Alto Andina de la región Tacna”.

Siendo las 17:30 horas, la tesista concluye su exposición, luego se procedió a la formulación de las preguntas por parte de los miembros del jurador calificador, terminando este proceso se invitó a que los miembros del jurado emitan su calificación de acuerdo a reglamento. El promedio de la calificación dió el siguiente resultado: Aprobado por Unanimidad con el calificativo de sobresaliente (17) de acuerdo al Reglamento de grados y títulos de la facultad de ciencias.

Siendo las 17:55 horas, se dio por concluido el voto de la sustentación de la tesis, firmando los señores miembros del jurado calificador, en señal de conformidad.

Presidente



Dr. Roberto Supo Hallasi

Secretario



Msc. Carlos Polo Bravo

Miembro



Dr. Alfredo Chacaltana García

A Dios

En memoria a mi madre que cuyo anhelo era que sus hijos sean profesionales

A mi abuelita Nicolasa y mi tía María Luisa por estar siempre conmigo

A mis hermanos Miriam, Cristian ...bueno somos 6, gracias Papá

A mis sobrinos Samuel y Elí por su alegría compartida

De manera especial a Edgar por su constante apoyo, paciencia y amor

Y a mis amigas y colegas Coral, Yuvidza y Yesica.

AGRADECIMIENTO

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi-Tacna, Moquegua) por proporcionar registros meteorológicos, a mi asesor MSc. Hugo torres Muro y co-asesor MSc. Jhony Chávez Delgado por su compromiso y tiempo en el desarrollo de este proyecto y finalmente a mi familia por su confianza, apoyo y comprensión.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Formulación del problema	6
1.3. Justificación del estudio	6
1.4. Objetivos de la investigación	7
1.4.1 Objetivos generales	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5. Hipótesis.....	8
1.5.1 Hipótesis general.....	8
1.5.2 Hipótesis específicas	8
1.6. Operacionalización de las variables de estudio.....	8
1.6.1 Definición conceptual.	8
1.6.2 Definición operacional.	9
1.7. Limitaciones del estudio.....	10
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	11
2.1. Antecedentes del estudio.....	11
2.1.1 Antecedentes a nivel nacional.....	11

2.1.2	Antecedentes a nivel internacional.....	13
2.2.	Relaciones astronómicas Tierra-Sol.....	17
2.2.1	Distancia Tierra – Sol.....	18
2.2.2	La declinación solar	21
2.2.3	Coordenadas solares.....	25
2.2.4	Posición relativa del sol para superficies horizontales.....	27
2.3.	Aspectos básicos de la Radiación Solar	30
2.3.1	La energía del Sol.....	30
2.3.2	Radiación solar.....	31
2.3.3	La constante solar.....	35
2.3.4	Radiación solar extraterrestre.....	38
2.3.5	Efecto de la atmósfera.....	42
2.4.	Medición de la irradiación solar global.....	44
2.4.1	Medición directa.....	45
2.4.2	Modelos empíricos	50
2.5.	Descripción de la zona de estudio	58
2.5.1	Ubicación geográfica	58
2.5.2	Demografía y división política.....	59
2.5.3	Clasificación climática.....	61
2.5.4	Zona alto andina de Tacna	64
2.6.	Definición de términos	67

CAPÍTULO III METODOLOGÍA 72

3.1.	Tipo de investigación	72
3.2.	Descripción del ámbito de la investigación.....	72
3.3.	Población y muestra de estudio	72
3.3.1	Descripción de la población	72
3.3.2	Descripción de la muestra	73
3.4.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos.....	74
3.4.1	Técnicas de recolección de datos	74
3.4.2	Instrumentos para la recolección de datos	75
3.5.	Procesamiento y análisis de datos	75
3.5.1	Procesamiento de datos	75
3.5.2	Análisis de datos	78

CAPÍTULO IV RESULTADOS 79

4.1.	Resultado de la base de datos	79
4.1.1	Registro de las estaciones meteorológicas	79
4.1.2	Registros procesados de temperatura máxima y mínima.....	81
4.2.	Desarrollo del modelo de Bristow-Campbell.....	82
4.3.	Datos estimados de irradiación solar global.....	84
4.3.1	Comportamiento diario de la irradiación solar global.....	84
4.3.2	Comportamiento mensual de la irradiación solar global.....	85
4.3.3	Comportamiento anual de la irradiación solar global	87

4.4.	Irradiancia solar global y amplitud térmica.....	90
4.5.	Comparación entre datos estimados y medidos de la irradiación solar global.....	94
CAPÍTULO V DISCUSIÓN		96
CONCLUSIONES.....		100
RECOMENDACIONES.....		102
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		103
ANEXO		109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol.....	19
Figura 2. Movimiento aparentemente del Sol alrededor de la Tierra, siguiendo la trayectoria Eclíptica.	22
Figura 3. Variación de la declinación solar en los Equinoccios y Solsticios.	23
Figura 4. Esfera celeste y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la Tierra en el punto O.....	27
Figura 5. Definición del ángulo cenital del sol, altura solar y el azimut.....	29
Figura 6. Distribución espectral de la radiación solar.....	34
Figura 7. Radiación solar directa y difusa.....	35
Figura 8. Variación mensual de la Constante Solar fuera de la atmósfera.	38
Figura 9. Relación entre la irradiancia normal directa y la horizontal.....	40
Figura 10. Piranómetro blanco y negro Eppley.	47
Figura 11. Piranómetro de precisión espectral Eppley.....	48
Figura 12. Respuesta espectral de la célula de silicio frente a la irradiancia espectral.....	49
Figura 13. Piranómetro de células de silicio.	50
Figura 14. Mapa de ubicación, división provincial y distrital de la región Tacna.	59
Figura 15. Mapa climático de la región de Tacna.....	63
Figura 16. Mapa de las ecorregiones del departamento de Tacna.	66

Figura 17. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en la zona alto andina e inter andina de la región tacna	80
Figura 18. Irradiación solar global diaria de la estación Paucarani del periodo 2014 al 2017.....	84
Figura 19. Irradiación solar global promedio mensual durante el año 2017 para cada estación meteorológica.	85
Figura 20. Promedios mensuales estimados de la irradiación solar global para un plano horizontal, para el periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en zona alto andina e inter andina de la región Tacna.	87
Figura 21. Mapa de irradiación solar global de la zona alto andina e inter andina de la región Tacna	89
Figura 22. Relación entre la irradiación solar global y la amplitud térmica, para tres estaciones en distintas zonas (zona altoandina, inter andina y costa). (a)Estación Paucarani, (b) Estación Aricota, (c)Estación CERT.	91
Figura 23. Relación entre la irradiación solar global y la amplitud térmica diaria durante el periodo 2014 al 2017 perteneciente a la estación (a) Paucarani (b) Aricota.(b).....	92
Figura 24. Gráfica de las ecuaciones de las constantes empíricas (bB) y (cB).....	94
Figura 25. Irradiación solar global diaria estimada y medida en la ciudad de Tacna, correspondiente al año 2011.....	95

Figura 26. Mapa de la irradiación solar global promedios anuales, con registro de 1975-1990 y publicado por Senamhi (2003).....	110
Figura 27. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Pampa Umalso.	111
Figura 28. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Chuapalca.	111
Figura 29. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Vilacota.	112
Figura 30. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Tarata.....	112
Figura 31. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Cairani.	113
Figura 32. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Aricota.....	113
Figura 33. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de estudio en el mapa climático.	114
Figura 34. Mapa de la irradiación solar global del Perú	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factor de corrección de excentricidad E_0 para cada día del año	21
Tabla 2. Declinación solar para cada día del año	24
Tabla 3. Valores de los coeficientes del modelo Ångström-Prescott por estación, número de datos utilizado y error promedio	52
Tabla 4. Valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación, número de datos y error promedio	56
Tabla 5. Demografía y división política de la región de Tacna	60
Tabla 6. Cantidad de datos de temperaturas máxima y mínima, por estación meteorológica durante el periodo 2014 al 2017.....	74
Tabla 7. Estaciones meteorológicas de Senamhi Tacna para la medición de las temperaturas máxima y mínima.....	79
Tabla 8. Promedios mensuales de temperatura máxima del periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna.....	81
Tabla 9. Promedios mensuales de temperatura mínima del periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna.....	81
Tabla 10. Desarrollo del modelo Bristow-Campbell en el software Microsoft Excel.....	83

Tabla 11. Promedios mensuales de la irradiación solar global para un plano horizontal del periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en zona alto andina e inter andina de la región Tacna	86
Tabla 12. Promedio anual del 2014 al 2017 de la irradiación solar global para una superficie horizontal en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna.....	87
Tabla 13. Promedio anual total de la irradiación solar global para cada estación meteorológica.....	88
Tabla 14. Limitación en el cálculo por el crecimiento de la amplitud térmica.	93
Tabla 15. Operacionalización de las variables	116

NOMENCLATURA

α	Ángulo de altitud solar
ψ	Ángulo acimutal solar
δ	declinación solar
ω_s	Ángulo horario de salida del sol para una superficie horizontal
Γ	Día angular
ϕ	Latitud geográfica del lugar
θ_z	Ángulo cenital o distancia cenital
E_0	Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre.
d_n	Número del día del año comúnmente llamado día juliano
H_o	Irradiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal
I_{sc}	Constante solar
H	Irradiación solar global sobre un plano horizontal
$T_{m\acute{a}x}$	Temperatura máxima
$T_{m\acute{i}n}$	Temperatura mínima
a_B, b_B, c_B	Constantes empíricas
I	Irradiancia solar
I_o	Irradiancia solar extraterrestre sobre una superficie horizontal
I_{on}	Irradiancia solar extraterrestre en una superficie normal a los rayos del sol

H_b	Irradiación solar directa
H_d	Irradiación solar difusa
H_r	Irradiación solar reflejada
n	Número de horas de sol
N	Duración astronómica
τ	Transmisividad atmosférica o coeficiente de claridad
ΔT	Amplitud térmica

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo, explicar el proceso de determinación de la irradiación solar global para una superficie horizontal en la zona alto andina de la región Tacna a través del modelo Bristow - Campbell. El modelo estima la irradiación solar global diaria a partir de datos experimentales de temperaturas máximas y mínimas. Para contar con los datos necesarios para la aplicación del modelo, se recurrió al convenio con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), quienes proporcionaron datos diarios de temperatura máxima y mínima ambiental, correspondientes a siete estaciones meteorológicas convencionales ubicadas en la zona alto e inter andina de la región Tacna para el periodo 2014 al 2017. En el software Microsoft Excel se desarrolló las expresiones matemáticas necesarias para la aplicación del modelo, además de los datos de entrada. La zona alto andina e inter andina presenta valores anuales de irradiación solar global superiores a los $5,5 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$, siendo el distrito de Susapaya, provincia de Tarata el que presenta el mayor índice de energía solar promedio anual de $6,23 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y el mínimo en el distrito de Aricota, provincia de Candarave de $5,61 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$, por lo tanto, es viable y rentable las aplicaciones solares en estas zonas, con tecnologías adecuadas para regiones frías.

Palabras clave: Amplitud térmica, Modelo Bristow-Campbell, Irradiación, Radiación, Temperatura máxima y Temperatura mínima.

ABSTRACT

The objective of this work is to explain the process of determining the global solar irradiation for a horizontal surface in the high Andean area of the Tacna region through the Bristow - Campbell model. The model estimates the daily global solar irradiation from experimental data of maximum and minimum environmental temperatures. In order to have the necessary data for the application of the model, the agreement was used with the National Meteorology and Hydrology Service of Peru (Senamhi), who provided daily data of maximum and minimum temperature, corresponding to seven conventional meteorological stations located in the area. high and inter Andean region of the Tacna region for the period 2014 to 2017. In the Microsoft Excel software, the mathematical expressions necessary for the application of the model were developed, in addition to the input data. The high Andean and inter-Andean zone presents annual values of global solar irradiation higher than 5.5 kWh m⁻²d⁻¹, being the district of Susapaya, province of Tarata the one that presents the highest annual average solar energy index of 6, 23 kWh m⁻²d⁻¹ and the minimum in the district of Aricota, Candarave province of 5.61 kWh m⁻²d⁻¹, therefore, solar applications in these areas are viable and profitable, with appropriate technologies for regions cold.

Keywords: Thermal amplitude, Bristow-Campbell Model, Irradiation, Radiation, Maximum temperature and Minimum temperature..

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es considerada una de las variables de mayor importancia para los estudios y aplicaciones agroclimáticas debido a que constituye la entrada más significativa de energía en los sistemas físicos y biológicos. Como tal, condiciona una buena parte de los factores climáticos ejerciendo una fuerte influencia en la dinámica de los ecosistemas naturales. Además, hoy en día, la utilización de la radiación solar como energía alternativa se perfila como una solución al problema de la disponibilidad energética que la mayoría de las naciones han debido enfrentar de manera permanente, situación que últimamente ha ido acentuándose debido a la creciente demanda de energía. (Aburto, 2007)

Para el correcto aprovechamiento del recurso solar es fundamental conocer de la forma más precisa posible, la cantidad y la distribución de la radiación solar que incide en un determinado lugar, así como su variación a escala diaria, mensual y anual, para ello se hace uso de los principales instrumentos de medición de la energía solar, sin embargo los lugares en Perú donde se realizan mediciones de esta variable son escasos, debido al costo que representan los equipos y al cuidado que estos necesitan.

Una solución para remediar esta ausencia de información es recurrir a relaciones empíricas, que ponen de manifiesto la relación entre la radiación solar global y los factores astronómicos, trigonométricos, topográficos y atmosféricos característicos

de la zona de estudio, los cuales limitan en distintos grados de magnitud la disponibilidad de energía procedente del Sol sobre la superficie terrestre, con esta relación entre variables se puede generar datos de radiación solar en zonas que no disponen de los instrumentos de medición requeridos, en función de ciertos parámetros o variables conocidos o de fácil medición. (Aburto, 2007)

Uno de estos modelos fue propuesto por Bristow-Campbell (1984) y fue validado por Baigorria et al. (2003). que, entre los modelos probados y utilizados para estimar la radiación solar en función de la temperatura, el modelo Bristow-Campbell se recomendó como el más aplicable a Perú.

La zona de estudio para aplicar este modelo es la zona alto andina e inter andina de la región Tacna donde no hay instrumentos de medición de energía solar y determinar el recurso solar es de suma importancia, ya que brindan confianza para la aplicación de tecnologías solares a nivel productivo y doméstico. El desarrollo de este estudio está comprendido por cinco capítulos.

En el capítulo I abarca el problema de investigación, describiendo la necesidad de contar con un modelo de estimación de la irradiación solar global, como una alternativa a la ausencia de instrumentos de medición, asimismo la importancia de contar con una base de datos de energía solar y las limitaciones que se presentaron en el desarrollo del estudio.

El capítulo II comprende el marco teórico, abarca toda la información teórica necesaria para el desarrollo del estudio, desde geometría solar hasta medición de la irradiación solar global.

En el capítulo III se describe la metodología que se utilizó para el estudio, describiendo a las estaciones meteorológicas utilizadas, la cantidad de datos y el procesamiento para la obtención de resultados.

En el capítulo IV abarca los resultados obtenidos del comportamiento espacio temporal diario, mensual y anual de la irradiación solar global; aplicando el modelo, estos se describen en tablas y gráficas.

En el capítulo V comprende la discusión de resultados, la relación entre las variables dependiente e independiente.

Llegando al final con las conclusiones y recomendaciones para futuras aplicaciones de este modelo en zonas altas.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La irradiación solar global que llega a la superficie de la Tierra es una variable de entrada indispensable para diversas aplicaciones, como: meteorología, hidrología, ecología, modelos de crecimiento de cultivos, uso de energía solar, agricultura, ganadería, diseño bioclimático de edificaciones u otros usos que empleen la irradiación solar como una de sus fuentes de energía.

La carencia de datos de irradiación suficientes en cantidad y calidad es bastante generalizada, a nivel mundial de cada 500 estaciones meteorológicas solo una cuenta con equipos de medición de irradiación solar, por esta razón, tanto en el campo del aprovechamiento energético como en el campo de la agro-meteorología se recurre con frecuencia a métodos alternativos de estimación, como son los modelos empíricos. (Raichijk, Grossi, y Righini, 2005)

La estadística antes mencionada no es ajeno a nuestro país, la carencia de estaciones meteorológicas a lo largo de nuestro territorio y asimismo la escasez de equipos de medición de irradiación solar global y el

mantenimiento que necesitan, valga decir el alto coste que representan hace necesario utilizar la aplicación de modelos empíricos de estimación de irradiación solar global, un ejemplo de esta aplicación fue en la realización del mapa solar del Perú elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi, 2003), sin embargo la información brindada es general a nivel de estaciones y departamentos y no en forma puntual y detallada. Esta ausencia ha motivado que se priorice la necesidad de cuantificar la disponibilidad de energía solar en la región Tacna y otras regiones del Perú.

Esta situación problemática exige analizar un modelo empírico para su aplicación, como el modelo Bristow-Campbell, que nos permite determinar la irradiación solar global a partir de datos experimentales de temperatura máxima y mínima ambiental, aprovechando que estas variables si son medidas en las estaciones meteorológicas en la zona alto andina en los cuales se hace una recolección de datos de parámetros como: precipitación, humedad, temperaturas máximas y mínimas ambiental, entre otras; datos que han sido recolectados por muchos años por el Senamhi.

En muchas regiones del Perú, ocurren fenómenos de heladas que afectan a las poblaciones más vulnerables, entre las que se encuentran niños y ancianos, de igual manera afectan al ganado vacuno y camélidos

sudamericanos entre otras especies, sin que hasta el momento se encuentren soluciones viables y sustentables para superar este problema. Los altos potenciales solares de la región andina del Perú, pueden ser un factor para solucionar esta problemática y por ello es necesario realizar estudios para cuantificar la incidencia solar de cada región del Perú y en particular de la región Tacna.

1.2. Formulación del problema

Con la problemática planteada sobre este tema en particular podemos formular la pregunta de investigación de la siguiente manera:

¿Cómo se puede estimar la irradiación solar global en la zona alto andina de la región Tacna a partir de datos de temperatura ambiental máxima y mínima?

1.3. Justificación del estudio

La importancia de este trabajo de investigación reside en que los resultados obtenidos aplicando el modelo Bristow-Campbell, para la zona alto andina de la región Tacna, serán de utilidad como referencia para próximos estudios con las mismas características geográficas, es importante resaltar que la región Tacna no cuenta con instrumentación para la medición de la radiación solar.

Al finalizar la investigación se contará con una base de datos de la irradiación solar global en diferentes puntos de la zona alto andina donde

existen registros de datos de temperaturas máximas y mínimas ambiental, que servirá para elaborar un mapa de irradiación solar global para una superficie horizontal de la zona alto andina de la región Tacna en función a las estaciones meteorológicas consideradas en el proyecto.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivos generales

Aplicar el modelo Bristow-Campbell para estimar la irradiación solar global en la zona alto andina de la región Tacna, a partir de las temperaturas ambientales máximas y mínimas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Obtener una base de datos de la irradiación solar global estimada para la zona alto andina de la región Tacna.
- Comprobar el comportamiento del Modelo de Bristow-Campbell, comparándolo con los registros de irradiación solar global obtenidos del centro de energías renovables de Tacna (CERT), para un año cualquiera.
- Elaborar un mapa de irradiación solar global en función de las temperaturas máximas y mínimas, medidas en las estaciones meteorológicas consideradas en el proyecto de investigación

1.5. Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

“Es posible estimar la irradiación solar global en la zona alto andina de la región Tacna a partir de los datos de temperaturas ambientales máximas y mínimas aplicando el modelo Bristow-Campbell”

1.5.2 Hipótesis específicas

- Con los datos estimados de la irradiación solar global es posible obtener una base de datos para la zona alto andina de la región Tacna.
- Es posible comprobar el comportamiento del modelo Bristow-Campbell en comparación con los registros obtenidos de irradiación solar global en el CERT para 1 año cualquiera.
- Es posible elaborar un mapa de irradiación solar global en función de las temperaturas máximas y mínimas medidas en las estaciones meteorológicas consideradas en el proyecto de investigación.

1.6. Operacionalización de las variables de estudio

1.6.1 Definición conceptual.

- Variable Independiente (X): Temperaturas máxima y mínima ambiental

Son las temperaturas del aire máxima y mínima alcanzados durante el día, medidas entre 1,25 a 2 m por encima del suelo. Sus unidades de medida son °C. (OMM, 1996 citado por Senamhi, 2003).

- Variable dependiente (Y): Irradiación solar global

Es la cantidad total de energía radiante del sol que llega a una superficie determinada, siendo la suma de la irradiación solar directa, difusa y reflejada. Sus unidades de medida son J/m^2 o kWh/m^2 (Censolar, 2013).

1.6.2 Definición operacional.

- Variable independiente (X): Temperatura ambiental máxima y mínima.

Para la medición de esta variable se usan los termómetros de máxima y mínima que están en cada estación meteorológica convencional, la medición es generalmente un dato por día, se mide en °C.

- Variable dependiente (Y): Irradiación solar global

La irradiación solar global es una magnitud física que se puede medir con un solarímetro o piranómetro de manera directa, a partir de la suma de la irradiación solar directa, irradiación solar difusa más la irradiación reflejada por el suelo (albedo). Se mide en J/m^2 o Wh/m^2 . En nuestro caso va a ser calculada aplicando el

modelo Bristow-Campbell. (En anexo Tabla 15. Se muestra la Operacionalización de variables).

1.7. Limitaciones del estudio

Las limitaciones para el desarrollo de este proyecto fueron:

- Que la región Tacna no cuenta con instrumentación para la medición de la radiación solar en ninguna de las estaciones meteorológicas perteneciente al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), limitando un estudio comparativo entre datos estimados por el modelo y los datos medidos por instrumentación.
- La poca referencia bibliográfica para la aplicación del modelo en zonas alto andinas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

Para la realización del proyecto, se tomó en cuenta las experiencias en otros trabajos relacionados, tanto a nivel nacional como internacional.

2.1.1 Antecedentes a nivel nacional

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi, 2003), realizó el Atlas de energía solar, para el estudio, se utilizaron data de 197 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de nuestro territorio, el periodo seleccionado para la cuantificación y tabulación de los datos fue de 1975 a 1990. Para una evaluación más precisa y detallada del recurso solar, se hizo uso de herramientas para la generación de datos de irradiación solar en zonas que no disponen de equipos de medición, y uno de esas herramientas fue el modelo de Bristow-Campbell. Como resultados obtuvieron que, a nivel anual, la zona de mayor potencial de energía solar del territorio peruano se encuentra principalmente en la costa sur (16° a 18° S), donde se dispone de 6,0 a 6,5 kWh m⁻²d⁻¹, en la cual está incluida la región Tacna. (ver anexo Figura. 26)

En la región Tacna, Polo (2013) aplicó el modelo de Anström-Prescott para determinar el potencial energético solar global, obteniendo un valor promedio anual de $(6,04 \pm 0,36)$ kWh m⁻²d⁻¹ para una superficie horizontal, siendo Candarave la provincia con mayor potencial energético solar, y el distrito con menor recurso solar es Ite; estos valores indican que la región Tacna posee un recurso energético solar muy bueno, que puede convertirla en autónoma y segura energéticamente, diversificando su matriz energética.

Baigorria et al. (2004) realizaron la calibración, validación y evaluación de los modelos Bristow - Campbell, Hargreaves y García, entre los modelos probados y utilizados para estimar la radiación solar entrante en función de la temperatura, el modelo Bristow-Campbell se recomendó como el más aplicable a Perú. Además, propusieron dos ecuaciones empíricas para estimar los valores de los coeficientes (b_B) y (c_B) en el modelo de Bristow-Campbell, en función de la temperatura y latitud, lo que permite que el modelo se aplique a otras áreas de estudio.

Camayo et al. (2017) aplicaron y validaron el modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global solar diaria media

mensual en la región Junín, determinando un potencial de radiación solar global diaria media mensual de $5,3 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$, que es considerado muy rentable por la Organización latinoamericana de energía (OLADE).

Quispe (2018) determinó la radiación solar global diaria aplicando el modelo empírico Bristow-Campbell para la zona del altiplano de Puno en las zonas circunlacustre, puna húmeda y clima de altura, obteniendo un máximo valor promedio de $7,3 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ en la estación de Masacruz ubicado en la zona clima de altura.

Pisco et al. (2018) realizaron un Software de simulación para la radiación solar en la Amazonía peruana (Iquitos, Nauta, Tamshiyacu) haciendo uso de la plataforma de LabVIEW V6i, aplicando el modelo de Bristow-Campbell con la finalidad de conocer el comportamiento del contenido energético que incide sobre la latitud local seleccionada con ello obtuvieron un mapa solar de la Amazonía.

2.1.2 Antecedentes a nivel internacional

Cervantes et al. (2016) Realizaron una comparación entre Red neuronal artificial “backpropagation” versus modelos empíricos para estimar la radiación global diaria en Sinaloa-México,

concluyendo que las variables de temperatura mínima, temperatura máxima y horas de brillo solar, resultan indispensables para hacer un buen pronóstico de la radiación global diaria, y como resultado la red neuronal artificial “backpropagation” presenta la mejor estimación de la radiación global diaria, y es mejor que los modelos empíricos, sin embargo, para los 229 datos de pronóstico, el modelo Angström-Prescott calibrado presenta una estimación ligeramente mejor.

Gavilán (2010), aplicó varios modelos de estimación de la radiación solar diaria a partir de datos de temperatura, en Andalucía-España, entre los modelos usados, Hargreaves-Samani y dos de sus variantes y el de Bristow-Campbell modificado por Goodin y col. (1999, citado por Gavilan, 2010), se mostraron razonablemente precisos, con un error relativo medio del 19% y una subestimación media del 3%, para un conjunto de 56 estaciones meteorológicas repartidas por toda Andalucía. Sin embargo, en algunas localizaciones llegaron a alcanzarse cercanas al 30%, sobre todo en zonas costeras donde el rango medio diario de temperatura del aire (ΔT) fue inferior a 10°C. La exactitud de todos los métodos estuvo afectada fundamentalmente por la magnitud del valor de ΔT , siendo mayor la precisión en todos los casos para valores elevados de este

rango. Además, calibraron la ecuación de Hargreaves-Samani, en función del rango medio diario de temperaturas, la ecuación ajustada mejoró las estimaciones, teniendo un buen comportamiento para un amplio rango de ΔT . Por tanto, el uso de la ecuación original de Hargreaves-Samani se recomienda para valores de ΔT superiores a $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, recomendando la utilización de la ecuación ajustada. El ajuste ha sido realizado en las condiciones geográficas de Andalucía y su aplicación estaría limitada fuera de este ámbito geográfico, donde sería necesaria la realización de una calibración similar.

Tripathy, Chaudhari, & Patel (2008) evaluaron diferentes métodos de estimación de la radiación solar, determinando que el método de Angstrom-Prescott presento mejores resultados, asimismo las estimaciones de radiación derivada de satélite mostraron bajos niveles de error porcentual, sin embargo, en ausencia de estimaciones de satélite y datos de horas de sol, los datos de temperatura basado en el modelo de Bristow-Cambell o Hargreaves pueden ser utilizados.

Meza & Varas (2000) evaluaron el comportamiento de dos modelos empíricos basados en la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima y compararon los resultados con un modelo

basado en las horas de sol, concluyendo que los modelos empíricos para estimar la radiación solar global son una herramienta conveniente si los parámetros pueden ser calibrados para diferentes ubicaciones. Para Chile, los modelos propuestos por Allen y Bristow-Campbell son adecuados y permiten estimaciones de radiación solar global en función de la variación de temperatura del aire. El modelo de Allen tiene un mayor coeficiente de determinación, pero requiere ambas mediciones atmosféricas de variación de temperatura y presión. Ambos modelos tienen limitaciones cuando se aplica a los datos diarios, la radiación solar en lugares con grandes diferencias de temperatura (ΔT) no se modela correctamente con el procedimiento de Allen y el modelo Bristow-Campbell tuvo un mejor rendimiento.

Bristow & Campbell (1984) desarrollaron una relación entre la transmitancia atmosférica y la diferencia de temperaturas máxima y mínima del aire, y por el cual estimar la radiación solar global diaria, las pruebas indicaron que 70 a 90% de la variación en la radiación solar diaria puede explicarse por este modelo simple.

Hassan et al. (2017). Realizaron una comparación entre los modelos independientes y dependientes para la estimación de la

radiación solar global, los resultados de esta evaluación indican que los modelos independientes son menos precisos que los modelos basados en horas de sol debido a la fuerte relación entre la duración de la insolación y la radiación global. Sin embargo, estaban al mismo nivel de precisión de los modelos basados en parámetros de temperatura.

2.2. Relaciones astronómicas Tierra-Sol

Es una experiencia cotidiana observar al sol salir por el este, elevarse más o menos en el cielo, según la época del año, y finalmente, ocultarse por el oeste. Sabemos que en realidad no es el sol el que se mueve, sino que su aparente movimiento se debe a que la Tierra gira sobre sí misma, efectuando una revolución cada 24 horas. Para los efectos prácticos que nos interesan, es lo mismo suponer que la Tierra permanece inmóvil y es el Sol el que gira a su alrededor.

Generalizando la suposición anterior, resulta útil introducir el concepto de la esfera celeste o bóveda celeste, que no es más que una superficie esférica imaginaria y de radio muy grande, cuyo centro coincide con el centro de la Tierra, y sobre la cual todos los astros del firmamento, incluido el sol, parecen que se mueven alrededor de la Tierra. (Censolar, 2013)

2.2.1 Distancia Tierra – Sol

Matemáticamente se sabe que la intensidad de energía que llega a un área determinada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida por dicha energía. En el caso particular de la energía solar, la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra será inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existe entre el Sol y la Tierra, es decir, mientras mayor sea la distancia entre estos dos cuerpos, menor será la cantidad de radiación solar que llegue a la Tierra. Por lo tanto, conocer el valor exacto de la distancia del Tierra-Sol es de suma importancia cuando se requiere averiguar la disponibilidad de energía solar en algún lugar determinado de la superficie de la Tierra. (Sarmiento, 1995)

La distancia media entre el Sol y la Tierra r_0 se denomina una unidad astronómica, y se describe en la siguiente expresión.

$$1AU = 1,496 \times 10^8 \text{ km} \quad (1)$$

o, más exactamente, $149\,597\,890 \pm 500$ km. La distancia mínima entre la Tierra y el Sol es de aproximadamente 0,983 AU y la máxima es aproximadamente 1,017 AU. La Tierra se encuentra en su punto más cercano al sol (perihelio) aproximadamente el 3 de enero y en su punto más lejano (afelio) aproximadamente el 4 de

julio. La Tierra se encuentra a su distancia media del sol aproximadamente el 4 de abril y el 5 de octubre. (ver Figura 1)

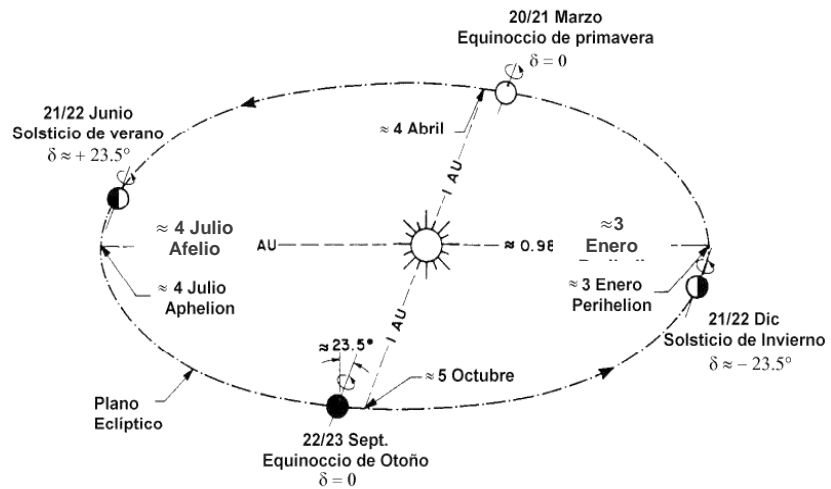


Figura 1. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. (Iqbal, 1983)

Sin embargo, es más deseable tener esta distancia expresada en una forma matemática simple: para este propósito, se han desarrollado una serie de expresiones matemáticas de diversas complejidades. Tradicionalmente, la distancia r se expresa en términos de series de Fourier con un número determinado de coeficientes. Con un error máximo de $\pm 0,0001$, Spencer (1971, citado por Iqbal, 1983) desarrolló la ecuación (2) para el recíproco del cuadrado del radio vector del radio de la Tierra, denominado *factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre*, (E_0)

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma \quad (2)$$

$$+ 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma$$

En esta ecuación Γ , está en radianes (rad) y es denominado como el día angular, y viene dado mediante la siguiente expresión:

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (3)$$

Donde d_n es el número del día del año o comúnmente llamado día juliano, es decir para el 1° de enero le corresponde d_n igual a 1 y para el 31 de diciembre le corresponde d_n igual a 365. De esta manera para cada día del año obtendremos distintos valores de la distancia entre el Sol y la Tierra en unidades astronómicas.

Para la mayoría de aplicaciones de ingeniería y tecnología, se puede aplicar una expresión más simple:

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \quad (4)$$

Utilizado por Duffie y Beckham en 1980 para determinar de una forma más sencilla la distancia entre la Tierra y el Sol. Una comparación entre la ecuación (4) con los valores del calendario se ha demostrado que esta ecuación puede emplearse de manera segura para la mayoría de los cálculos de ingeniería, no obstante para mayor precisión y para uso en ordenadores la ecuación (2), es preferido; la cual se usó para este proyecto. (Iqbal, 1983)

La Tabla 1, muestra el factor de corrección de la excentricidad E_0 para todos los días del año calendario, usando la ecuación (2).

Tabla 1
Declinación solar para cada día del año

Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1	1.0350	1.0306	1.0190	1.0014	0.9845	0.9717	0.9666	0.9700	0.9814	0.9976	1.0155	1.0291
2	1.0351	1.0303	1.0185	1.0008	0.9840	0.9714	0.9666	0.9703	0.9819	0.9982	1.0161	1.0295
3	1.0351	1.0300	1.0180	1.0002	0.9835	0.9712	0.9666	0.9705	0.9823	0.9988	1.0166	1.0298
4	1.0351	1.0297	1.0174	0.9997	0.9830	0.9709	0.9666	0.9708	0.9828	0.9994	1.0171	1.0301
5	1.0351	1.0294	1.0169	0.9991	0.9825	0.9706	0.9666	0.9711	0.9833	0.9999	1.0177	1.0304
6	1.0350	1.0290	1.0164	0.9985	0.9821	0.9703	0.9666	0.9713	0.9838	1.0005	1.0182	1.0307
7	1.0350	1.0287	1.0158	0.9979	0.9816	0.9701	0.9666	0.9716	0.9843	1.0011	1.0187	1.0310
8	1.0350	1.0283	1.0153	0.9973	0.9811	0.9698	0.9666	0.9719	0.9848	1.0017	1.0192	1.0313
9	1.0349	1.0279	1.0147	0.9967	0.9806	0.9696	0.9667	0.9722	0.9854	1.0023	1.0197	1.0316
10	1.0348	1.0276	1.0142	0.9961	0.9802	0.9694	0.9667	0.9726	0.9859	1.0029	1.0202	1.0319
11	1.0347	1.0272	1.0136	0.9956	0.9797	0.9692	0.9668	0.9729	0.9864	1.0035	1.0207	1.0321
12	1.0347	1.0268	1.0131	0.9950	0.9793	0.9690	0.9668	0.9732	0.9869	1.0041	1.0212	1.0324
13	1.0346	1.0264	1.0125	0.9944	0.9788	0.9687	0.9669	0.9736	0.9875	1.0047	1.0217	1.0326
14	1.0344	1.0260	1.0119	0.9938	0.9784	0.9686	0.9670	0.9739	0.9880	1.0053	1.0222	1.0328
15	1.0343	1.0256	1.0114	0.9932	0.9780	0.9684	0.9671	0.9743	0.9885	1.0058	1.0226	1.0330
16	1.0342	1.0251	1.0108	0.9927	0.9775	0.9682	0.9672	0.9746	0.9891	1.0064	1.0231	1.0332
17	1.0340	1.0247	1.0102	0.9921	0.9771	0.9680	0.9673	0.9750	0.9896	1.0070	1.0235	1.0334
18	1.0339	1.0243	1.0097	0.9915	0.9767	0.9679	0.9674	0.9754	0.9902	1.0076	1.0240	1.0336
19	1.0337	1.0238	1.0091	0.9910	0.9763	0.9677	0.9675	0.9758	0.9907	1.0082	1.0244	1.0338
20	1.0335	1.0234	1.0085	0.9904	0.9759	0.9676	0.9677	0.9762	0.9913	1.0088	1.0249	1.0339
21	1.0334	1.0229	1.0079	0.9899	0.9755	0.9675	0.9678	0.9766	0.9918	1.0093	1.0253	1.0341
22	1.0332	1.0224	1.0073	0.9893	0.9751	0.9673	0.9680	0.9770	0.9924	1.0099	1.0257	1.0342
23	1.0330	1.0220	1.0067	0.9888	0.9748	0.9672	0.9681	0.9774	0.9930	1.0105	1.0261	1.0344
24	1.0327	1.0215	1.0062	0.9882	0.9744	0.9671	0.9683	0.9778	0.9935	1.0111	1.0265	1.0345
25	1.0325	1.0210	1.0056	0.9877	0.9740	0.9670	0.9685	0.9782	0.9941	1.0116	1.0269	1.0346
26	1.0323	1.0205	1.0050	0.9872	0.9737	0.9669	0.9687	0.9787	0.9947	1.0122	1.0273	1.0347
27	1.0320	1.0200	1.0044	0.9866	0.9733	0.9669	0.9689	0.9791	0.9953	1.0128	1.0277	1.0348
28	1.0318	1.0195	1.0038	0.9861	0.9730	0.9668	0.9691	0.9795	0.9959	1.0133	1.0281	1.0349
29	1.0315	0.0	1.0032	0.9856	0.9727	0.9667	0.9693	0.9800	0.9964	1.0139	1.0284	1.0349
30	1.0312	0.0	1.0026	0.9851	0.9724	0.9667	0.9695	0.9805	0.9970	1.0144	1.0288	1.0350
31	1.0309	0.0	1.0020	0.0	0.9720	0.0	0.9698	0.9809	0.0	1.0150	0.0	1.0350

Nota: el (.) en la tabla es usado como separador de decimales. (Iqbal, M., 1983)

2.2.2 La declinación solar

El plano de revolución de la Tierra alrededor del Sol se denomina plano de la eclíptica. La Tierra gira sobre sí misma alrededor de un eje denominado eje polar, el cual se encuentra inclinado aproximadamente $23,5^\circ$ de la normal del plano eclíptico y permanece siempre constante. La rotación de la Tierra alrededor de este eje ocasiona los cambios diurnos en la radiación solar incidente;

la posición de este eje relativo al Sol causa los cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo entre el eje polar y la normal al plano elíptico permanece invariable. Lo mismo es verdadero para el ángulo entre el plano ecuatorial de la Tierra y el plano eclíptico. Aunque, el ángulo que forman el plano ecuatorial y la línea que une los centros del sol y de la Tierra cambia cada día, de hecho, cada instante. Este ángulo es llamado declinación solar δ .

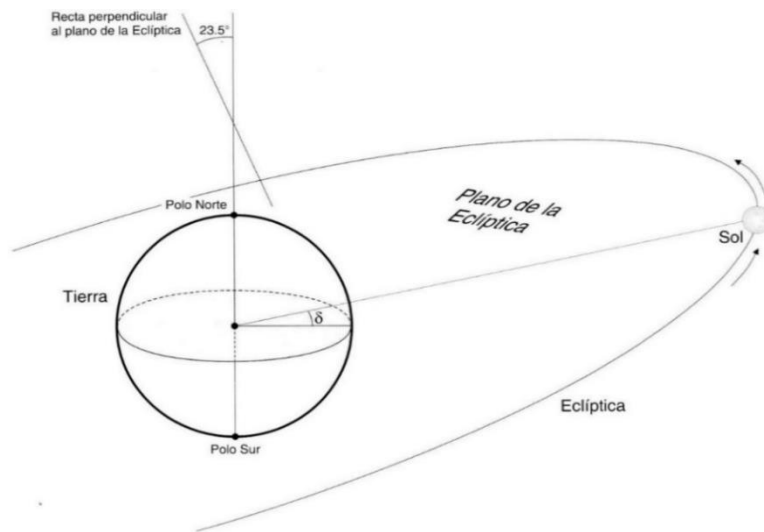


Figura 2. Movimiento aparentemente del Sol alrededor de la Tierra, siguiendo la trayectoria Eclíptica. (Censolar, 2013)

La declinación solar δ varía continuamente a lo largo del año entre los valores $-23,5^\circ$ y $+23,5^\circ$, esta variable es cero en los equinoccios de verano y otoño (se denomina equinoccio en donde la duración del día es igual al de la noche), toma el valor de $+23,45^\circ$ en el solsticio de verano y $-23,45$ en el solsticio de invierno (ver Figura 3). Las

fechas reales de los equinoccios y solsticios varían ligeramente de un año a otro. la declinación puede ser considerada constante a lo largo de un día en particular, ya que la máxima variación en 24 horas es inferior a $0,5^\circ$.

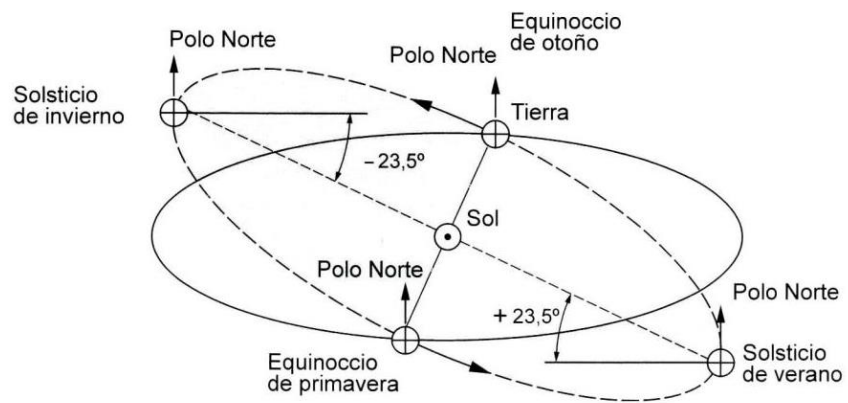


Figura 3. Variación de la declinación solar en los Equinoccios y Solsticios. (Censolar, 2013)

Se han desarrollado varias expresiones para determinar los valores aproximados de la declinación solar con diversos grados de precisión reportados por numerosos autores, la más importante de ellas por su precisión y la más ampliamente citada en la literatura solar corresponde a la de Spencer (1971, citado por Iqbal, 1983) representada por la siguiente ecuación en radianes:

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \operatorname{sen} \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \operatorname{sen} 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \operatorname{sen} 3\Gamma) \quad (5)$$

Esta ecuación estima la declinación solar δ con un error máximo de $\pm 0,0006$ radianes, lo que equivale a $\pm 0,05$ grados. Mientras que si se omite el término que se ubica dentro del segundo paréntesis de la fórmula, esta ecuación estima la declinación solar con un error máximo de $\pm 0,0035$ radianes, lo que equivale a $\pm 0,2$ grados. A través de la utilización de la ecuación (5) es posible obtener los valores de la declinación solar para cada día del año en grados, tal como se representa en la Tabla 2.

Tabla 2
Declinación solar para cada día del año

Date	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec
1	-23.07	-17.28	-7.78	4.36	14.93	22.02	23.20	18.20	8.51	-2.95	-14.26	-21.74
2	-22.99	-17.00	-7.40	4.75	15.24	22.15	23.13	17.94	8.14	-3.33	-14.58	-21.90
3	-22.90	-16.71	-7.02	5.13	15.54	22.29	23.06	17.69	7.78	-3.72	-14.90	-22.05
4	-22.80	-16.41	-6.63	5.51	15.83	22.41	22.98	17.42	7.41	-4.11	-15.22	-22.19
5	-22.70	-16.11	-6.25	5.89	16.12	22.53	22.89	17.16	7.04	-4.50	-15.53	-22.32
6	-22.59	-15.81	-5.86	6.27	16.41	22.64	22.80	16.89	6.67	-4.88	-15.83	-22.45
7	-22.47	-15.50	-5.47	6.65	16.69	22.74	22.70	16.61	6.30	-5.27	-16.13	-22.57
8	-22.34	-15.18	-5.08	7.03	16.96	22.84	22.59	16.33	5.93	-5.65	-16.43	-22.68
9	-22.21	-14.87	-4.69	7.40	17.24	22.93	22.48	16.05	5.55	-6.03	-16.72	-22.79
10	-22.07	-14.54	-4.30	7.77	17.50	23.01	22.36	15.76	5.17	-6.41	-17.01	-22.88
11	-21.92	-14.22	-3.90	8.14	17.77	23.09	22.23	15.46	4.80	-6.79	-17.29	-22.98
12	-21.76	-13.89	-3.51	8.51	18.02	23.16	22.10	15.17	4.42	-7.17	-17.57	-23.06
13	-21.60	-13.55	-3.12	8.87	18.28	23.23	21.96	14.87	4.03	-7.55	-17.84	-23.13
14	-21.43	-13.22	-2.72	9.24	18.52	23.28	21.81	14.56	3.65	-7.92	-18.11	-23.20
15	-21.25	-12.87	-2.33	9.60	18.77	23.33	21.66	14.25	3.27	-8.30	-18.37	-23.26
16	-21.07	-12.53	-1.93	9.95	19.00	23.38	21.50	13.94	2.88	-8.67	-18.62	-23.31
17	-20.88	-12.18	-1.54	10.31	19.23	23.41	21.34	13.62	2.50	-9.04	-18.87	-23.36
18	-20.68	-11.83	-1.14	10.66	19.46	23.44	21.17	13.30	2.11	-9.40	-19.12	-23.39
19	-20.48	-11.47	-0.74	11.01	19.68	23.47	20.99	12.98	1.72	-9.77	-19.36	-23.42
20	-20.27	-11.12	-0.35	11.35	19.90	23.48	20.81	12.66	1.34	-10.13	-19.59	-23.44
21	-20.05	-10.76	0.05	11.70	20.10	23.49	20.63	12.33	0.95	-10.49	-19.82	-23.46
22	-19.83	-10.39	0.44	12.04	20.31	23.49	20.43	11.99	0.56	-10.85	-20.04	-23.46
23	-19.60	-10.03	0.84	12.37	20.51	23.49	20.23	11.66	0.17	-11.21	-20.25	-23.46
24	-19.37	-9.66	1.23	12.71	20.70	23.47	20.03	11.32	-0.22	-11.56	-20.46	-23.45
25	-19.13	-9.29	1.63	13.04	20.88	23.46	19.82	10.98	-0.61	-11.91	-20.67	-23.43
26	-18.88	-8.91	2.02	13.36	21.07	23.43	19.60	10.63	-1.00	-12.25	-20.86	-23.40
27	-18.63	-8.54	2.41	13.68	21.24	23.40	19.38	10.28	-1.39	-12.60	-21.05	-23.37
28	-18.37	-8.16	2.80	14.00	21.41	23.36	19.15	9.93	-1.78	-12.94	-21.23	-23.33
29	-18.11	0.0	3.19	14.32	21.57	23.31	18.92	9.58	-2.17	-13.27	-21.41	-23.28
30	-17.84	0.0	3.58	14.63	21.73	23.26	18.68	9.22	-2.56	-13.61	-21.58	-23.22
31	-17.56	0.0	3.97	0.0	21.87	0.0	18.44	8.87	0.0	-13.94	0.0	-23.16

Nota: el (.) en la tabla es usado como separador de decimales. (Iqbal, M., 1983)

Como se mencionó anteriormente existen varias expresiones para determinar la declinación solar, cada una con cierto grado de

precisión, a continuación, se presentan dos fórmulas simples comúnmente usadas para determinar la declinación solar en grados, como son la fórmula de Perrin de Brichambaut (1975):

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left[0,4 \cdot \text{sen} \left(\frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365} \right) \right] \quad (6)$$

Y la obtenida por Cooper (1969):

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left[\frac{360}{365} \cdot (d_n + 284) \right] \quad (7)$$

Las dos ecuaciones son bastante precisas. Sin embargo, cuando se requiere una gran precisión y para el uso en ordenadores es preferible aplicar la ecuación (5).

2.2.3 Coordenadas solares

Para definir con precisión la posición del sol en cada instante con respecto a un observador hipotético que se encontrase inmóvil en un plano horizontal, se utilizan los siguientes parámetros:

El zenit (θ_z). también llamado *ángulo cenital o distancia cenital* es el ángulo entre el cenit local y la línea que une al observador y el sol. Este es un ángulo que varía entre 0° y 90° .

La altura solar (α). también llamada elevación solar es la altura angular del sol sobre el horizonte celestial del observador. Este es un

ángulo que varía entre 0° y 90° . La altura solar es el complemento del ángulo cenital.

El azimut solar (ψ). también llamado ángulo azimutal, es el ángulo en el cenit local entre el plano del meridiano del observador y el plano de un gran círculo que pasa por el cenit y el sol. Es medido hacia el este positivamente, oeste negativamente, (sur = cero) y de este modo varía entre 0° y $\pm 180^\circ$.

El ángulo horario (ω). es el ángulo medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. Contado desde el mediodía, cambia 15° por hora.

Declinación solar (δ). corresponde a la posición angular del Sol durante el día con respecto al plano del ecuador. Este ángulo varía en un rango de $\pm 23^\circ$ entre los solsticios de verano e invierno.

Latitud geográfica del lugar (ϕ). corresponde a la posición angular hacia el norte o el sur del ecuador. Este ángulo varía en un rango de 90° entre los polos geográficos norte y sur, siendo positivo en el hemisferio norte, donde va desde los 0° a 90° , y negativo en el hemisferio sur, donde va desde los 0° hasta los -90° . En la Figura 4,

Se describe cada coordenada del sol expresada anteriormente, siendo el punto “O” el observador. (Iqbal, 1983)

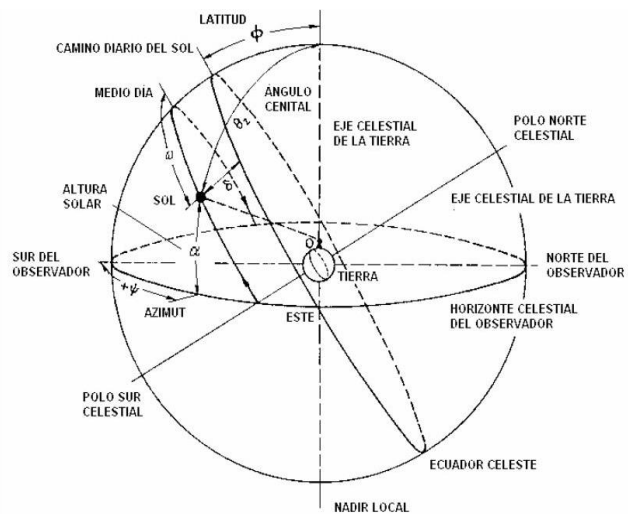


Figura 4. Esfera celeste y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la Tierra en el punto O. (Iqbal, 1983)

2.2.4 Posición relativa del sol para superficies horizontales

Para calcular la irradiación solar que llega a una superficie horizontal sobre la superficie de la Tierra, es necesario escribir las relaciones trigonométricas entre la posición del Sol en el cielo y las coordenadas (ecuatoriales) sobre la Tierra, las cuales se describieron anteriormente. En consecuencia, para una posición geográfica dada, en ausencia de la refracción atmosférica de la Tierra, las relaciones trigonométricas entre el sol y una superficie horizontal son los siguientes:

$$\cos \theta_z = \text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha \quad (8)$$

$$\cos \psi = \frac{\text{sen } \alpha \text{ sen } \phi - \text{sen } \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (9)$$

Y

$$0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \quad \cos \psi \geq 0 \quad (10)$$

$$90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \quad \cos \psi \leq 0 \quad (11)$$

A veces se usa la siguiente ecuación para obtener el azimut solar (ψ)

$$\text{sen } \psi = \frac{\cos \delta \text{ sen } \omega}{\cos \alpha} \quad (12)$$

Sin embargo, esta ecuación da valores incorrectos cuando el azimut solar es mayor a 90° ($\psi > 90^\circ$) y debe ser evitado. Las definiciones y convenciones de signos para los ángulos pueden resumirse:

- θ_z es el ángulo cenital, en grados;
- α es la altura solar también llamada elevación solar, en grados; $\alpha = 90^\circ - \theta_z$;
- ω es el ángulo horario, igual a cero a mediodía y positivo en la mañana;
- ϕ es la latitud geográfica, en grados, norte positivo;
- ψ es el azimut local, en grados, sur cero, este positivo.
- δ es la declinación solar, la posición angular del sol respecto al plano ecuatorial, norte positivo, en grados.

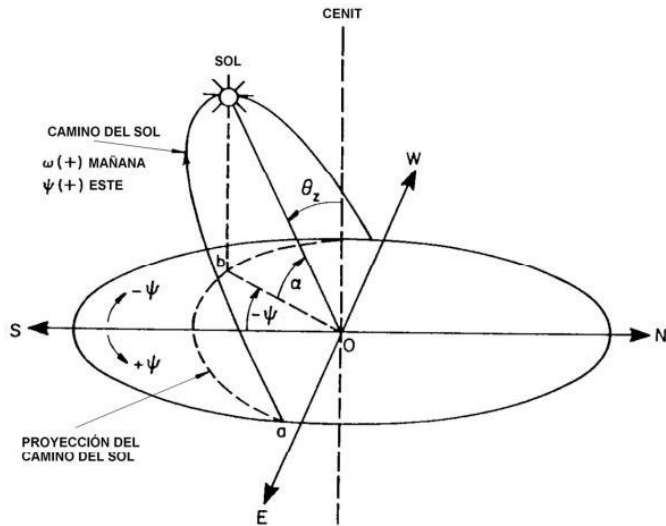


Figura 5. Definición del ángulo cenital del sol, altura solar y el acimut. (Iqbal, 1983)

La ecuación (8) puede ser resuelta para definir el ángulo horario de salida del sol para una superficie horizontal ω_s , considerando que a la salida del sol el ángulo zenit θ_z es igual a 90° ($\theta_z=90^\circ$), por lo tanto resulta:

$$\omega_s = \cos^{-1} \cdot (-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (13)$$

Nótese que el ángulo horario de la salida del sol es igual al ángulo horario de la puesta del sol excepto por la diferencia de signo. (Iqbal, 1983)

2.3. Aspectos básicos de la Radiación Solar

2.3.1 La energía del Sol

El sol es una de las innumerables estrellas que hay en nuestra galaxia, la más cercana y, sin duda, también la más importante para nosotros, ya que sin ella no existiríamos, ni existiría ninguna forma de vida sobre la Tierra. Es una estrella de tipo media; su radio es de unos 700 000 km y su masa equivale a la que se obtendría juntando unos 300 000 planetas iguales a la Tierra. Brilla en el espacio desde hace más de 5000 millones de años y se calcula que el tiempo que le resta de vida es todavía mayor. (Censolar,2013)

El origen de la energía que el sol produce e irradia está en las reacciones nucleares que ininterrumpidamente se realizan en su interior. En ellas, los átomos de hidrogeno, que es el elemento más abundante en el sol, se combinan entre sí para formar átomos de helio y, al mismo tiempo, una pequeña parte de la masa de dichos átomos se convierte en energía, de acuerdo con la famosa formula de Einstein ($E = mc^2$), la cual fluye desde el interior hasta la superficie (fotosfera) y desde allí es irradiada al espacio en todas las direcciones.

Aunque el sol también emite partículas materiales, la mayor parte de la energía irradiada es transportada en forma de ondas electromagnéticas (fotones) en una amplia gama de longitudes de ondas diferentes, las cuales se desplazan en el espacio vacío a una velocidad de 300 000 km/s, tardando solamente ocho minutos en recorrer los 150 millones de kilómetros que hay entre el sol y la Tierra.

Cada segundo el sol irradia, en todas las direcciones, una energía de 4×10^{26} julios, genera una potencia 4×10^{23} kilovatios. Para hacerse una idea de la enorme magnitud que representan estas cifras, basta considerar que la potencia generada por todas las plantas industriales del mundo trabajando juntas sería unos doscientos billones de veces más pequeña.

En el breve lapso de un solo segundo, el sol irradia mucha más energía que la consumida por todo el género humano desde sus albores hasta nuestros días. (Censolar,2013)

2.3.2 Radiación solar

La radiación solar corresponde a la energía radiante procedente del Sol en forma de radiación electromagnética como resultado de reacciones nucleares de fusión que tienen lugar fundamentalmente

en la parte más interna o núcleo de este astro. Esta energía debe ser transferida a la superficie exterior del Sol para luego ser radiada al espacio. En este proceso de transferencia de energía aparecen fenómenos convectivos y radiativos, así como también continuas emisiones, absorciones y radiaciones entre las sucesivas capas de gases que forman el Sol, dando lugar a un espectro de emisión continuo que llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía (haz de pequeñas partículas) llamados fotones que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. (Iqbal, 1983)

La radiación se describe teóricamente por dos términos que guardan una relación inversamente proporcional entre sí, la longitud de onda y la frecuencia de onda. Así, las radiaciones más intensas presentan mayores frecuencias y menores longitudes de onda, mientras que las más débiles se caracterizan por sus bajas frecuencias y amplias longitudes de onda, medidas habitualmente en μm . A partir de estos parámetros se ha establecido una clasificación, denominada espectro electromagnético.

La distribución espectral de la radiación solar, presenta diversos niveles de intensidad, esto debido a la interacción con otras partículas, algunas logran atravesar el trayecto sin colisionar

demasiado con otras partículas y sin tantos procesos de absorción y dispersión, esto sucede tanto para el trayecto del mismo núcleo del sol hasta el límite superior de la atmosfera y el trayecto hasta la superficie del suelo. Basándonos en las anteriores consideraciones resulta evidentemente que la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra tendrá una distribución espectral distinta a la existente fuera de la atmosfera debido, no solo a la absorción y reflexión ya citadas, si no a otros factores como pueden ser la zona geográfica que se considere, la altitud del lugar, estado de la atmosfera con mayor o menor proporción de nubes o polvo, etc. En la Figura 6, se muestra la distribución espectral de la radiación solar extraterrestre y global. (Censolar, 2013)

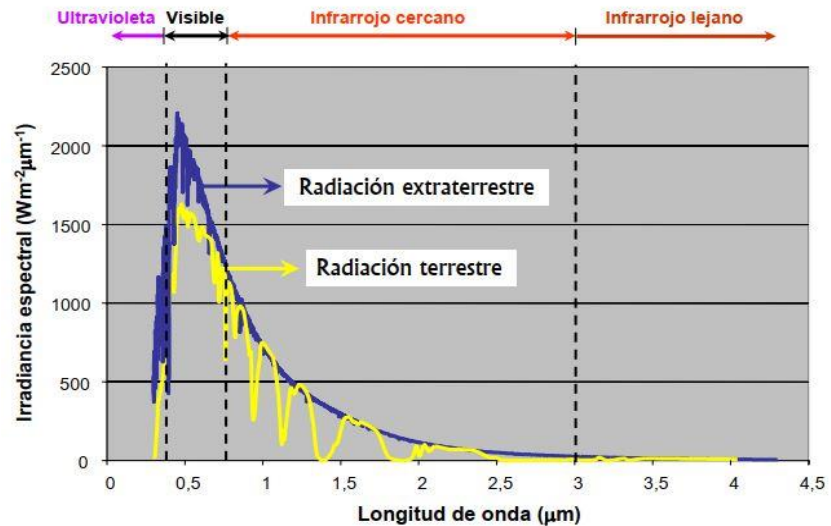


Figura 6. Distribución espectral de la radiación solar. (Censolar, 2013)

La radiación incidente sobre una superficie horizontal en el tope de la atmósfera es conocido como la radiación solar extraterrestre, al atravesar la atmósfera, los componentes atmosféricos actúan sobre la radiación solar en parte reflejándola (nubes), en parte absorbiéndola (ozono, oxígeno, anhídrido carbónico, vapor de agua, etc.) y en parte dispersándola (moléculas, gotas de agua y polvo en suspensión, etc.). El resultado de estos efectos es la descomposición de la radiación solar incidente sobre una superficie en dos componentes. *La radiación directa*, según Sánchez et al., (1993 citado por Senamhi, 2003), es la radiación que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección. *La radiación difusa*, según Hernández et al., (1991 citado

por Senamhi, 2003), es la radiación que llega a la superficie de la Tierra, que proviene de otras direcciones debido a la reflexión y dispersión que producen la atmósfera y las nubes. La radiación solar total es la suma entre la (directa + difusa) incidente en una superficie horizontal se denomina *radiación solar global*. (Lorenzo y Araujo, 1994)

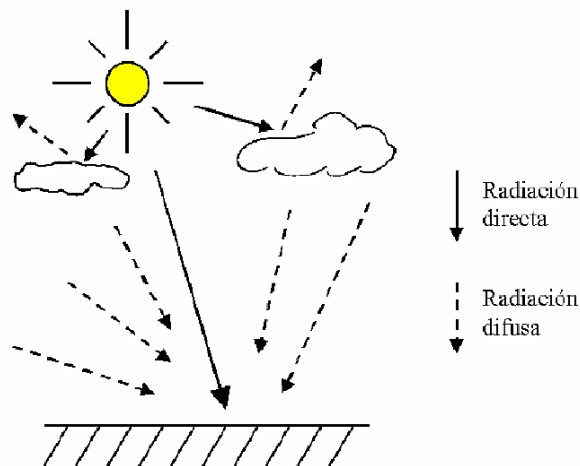


Figura 7. Radiación solar directa y difusa. (Sarmiento, 1995)

2.3.3 La constante solar

La constante solar I_{sc} es la tasa de energía solar máxima en todas las longitudes de onda que inciden sobre una superficie de área unitaria orientada perpendicularmente a la dirección de propagación de la radiación solar que está ubicada en el límite exterior de la atmósfera terrestre y cuya posición representa la distancia media anual entre el Sol y la Tierra. Cabe señalar que la distancia promedio entre el Sol y la Tierra equivale aproximadamente a 149 597 890

kilómetros, valor que es conocido comúnmente como una unidad astronómica (Liou, 1980, citado por Aburto, 2007)

Este índice de energía solar total no es una verdadera constante, sino que parece fluctuar ligeramente unas pocas décimas del porcentaje durante ciertos períodos del año, asimismo ha sido estudiada extensamente desde los comienzos del siglo XX, y las primeras mediciones se realizan a partir de observaciones en Tierra, sin embargo, el enfoque espectral basado en Tierra está sujeto a grandes errores debido a las incertidumbres de los constituyentes atmosféricos. Actualmente las mediciones de gran altitud se han llevado a cabo con el uso de aeronaves a gran altitud, globos y sondas espaciales, por lo que las correcciones para la atenuación atmosférica son muy pequeñas. La precisión que se puede lograr con estos instrumentos es de aproximadamente $\pm 0,3\%$. A partir de mediciones realizadas a gran altitud, se ha demostrado que los valores de la constante solar varían desde 1 338 a 1 368 W/m².

En el año 1 971 la NASA adoptó una intensidad de energía solar de 1 353 W /m² para el valor de la constante solar, más conocido como el Diseño Standard de la NASA (NASA Design Standard), el cual está basado en el valor promedio de numerosas mediciones

realizadas a gran altitud. El error estimado para el Standard de Diseño de la NASA es de $\pm 21 \text{ W/m}^2$ lo que equivale a un $\pm 1,5\%$ de error. Sin embargo, bajo la cooperación de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) se realizó una exhaustiva revisión de las mediciones que generaron el Standard de Diseño de la NASA, encontrándose una serie de diferencias en los tipos de instrumentos utilizados. En consecuencia, a través de este estudio, la Organización Meteorológica Mundial obtuvo una nueva intensidad de energía solar correspondiente a:

$$I_{sc} = 1\,367 \text{ Wm}^{-2} \quad (14)$$

Este sería el valor de la constante solar más preciso, en base a una nueva escala más conocido como la Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR) la cual está basada en el resultado de una serie de mediciones que se mantienen en el Centro de Radiación Mundial (World Radiation Center, WRC). La desviación estándar para la Referencia Radiométrica Mundial es de $\pm 1,6 \text{ W/m}^2$ con una desviación máxima de $\pm 7 \text{ W/m}^2$. (Iqbal, 1983).



Figura 8. Variación mensual de la Constante Solar fuera de la atmósfera. (Censolar, 2013)

2.3.4 Radiación solar extraterrestre

La radiación solar extraterrestre se genera analíticamente tomando en cuenta la evolución astronómica de la radiación solar y representa el valor de radiación solar que recibe la Tierra en el límite superior de la atmósfera.

Para calcular la radiación solar extraterrestre es necesario aclarar ciertos términos, hasta el momento se ha usado el término de radiación en sentido genérico, ya que el término radiación se aplica al cuerpo que radia, mientras que el término irradiación al objeto expuesto a la radiación, siendo la Tierra el objeto expuesto a la

radiación solar, la denominación correcta es de irradiación e irradiancia.

Se llama irradiancia a la densidad de potencia incidente en una superficie, o, en otras palabras, a la energía incidente en una superficie por unidad de tiempo, su unidad comúnmente usada es [W/m²].

Se denomina irradiación a la energía incidente por unidad de superficie y a lo largo de cierto período de tiempo, su unidad es [kWh/m²]. Ambos términos serán necesarios para definir la irradiancia solar extraterrestre y la irradiación solar extraterrestre. (Lorenzo & Araujo, 1994)

Radiación solar extraterrestre por hora para una superficie horizontal.

En un día determinado, sea I_{on} la irradiancia solar extraterrestre en una superficie normal a los rayos del sol.

Donde:

$$I_{on} = I_{sc} E_o \quad (15)$$

Siendo I_{sc} la constante solar y E_o el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre.

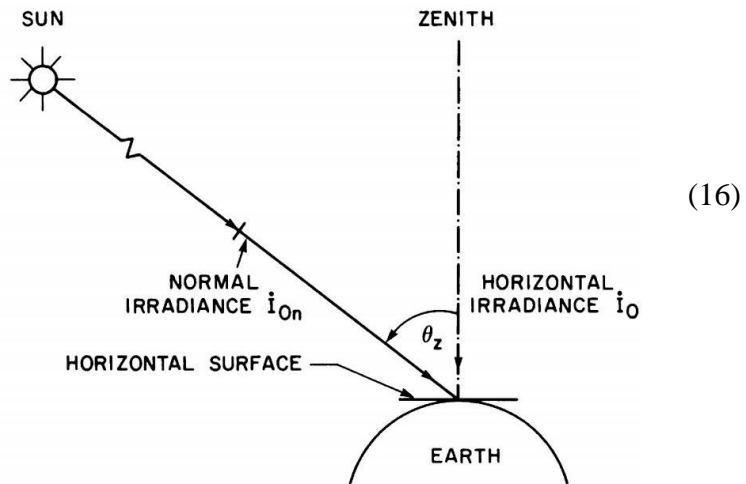


Figura 9. Relación entre la irradiancia normal directa y la horizontal. (Iqbal, 1983)

Observando la Figura 9, obtenemos que la irradiancia sobre una superficie horizontal puede ser escrito

Donde el $\cos \theta_z$ está dado por la ecuación (8), la irradiancia solar extraterrestre I_o durante un periodo corto de tiempo dt se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$dI_o = I_{sc} \cos \theta_z E_o dt \quad (17)$$

Donde la constante solar I_{sc} está en unidades de energía, $\text{kJ m}^{-2}\text{h}^{-1}$; E_o es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, $\cos \theta_z$ contiene el ángulo de hora solar ω en grados o radianes, dt está en horas.

El tiempo en horas se puede convertir al ángulo horario de la siguiente manera:

$$dt = \left(\frac{12}{\pi}\right) d\omega \quad (18)$$

Reemplazando las ecuaciones (8) y (18) en (17), quedando de la siguiente forma:

$$dI_o = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o (\text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) d\omega \quad (19)$$

Luego integrando la expresión anterior sobre un periodo de 1h, se obtiene:

$$I_o = I_{sc} E_o [\text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_i] \quad (20)$$

La ecuación (20) expresa la irradiación extraterrestre durante 1 h centrada alrededor del ángulo horario ω_i .

En algunos casos, la radiación por un periodo distinto a una hora exacta puede ser necesario, consideremos que se requiera la radiación en una superficie horizontal entre las horas t_1 y t_2 . Contando las horas desde la medianoche y mientras t_1 y t_2 estén durante el día, la irradiación entre estas dos horas es:

$$I_o = I_{sc} E_o \left[\begin{array}{c} \text{sen } \delta \text{ sen } \phi (t_2 - t_1) + \\ \frac{12}{\pi} \cos \delta \cos \phi [\sin(15t_1) - \sin(15t_2)] \end{array} \right] \quad (21)$$

Donde ϕ es la latitud del lugar, δ es la declinación y ω es el ángulo horario.

Radiación solar extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal.

La irradiación durante un día, desde la salida del sol (sr) hasta la puesta del sol (ss) viene dado por el área bajo de la curva de la irradiancia.

Por lo tanto:

$$H_o = \int_{sr}^{ss} I_o dt \quad (22)$$

$$H_o = 2 \int_0^{ss} I_o dt \quad (23)$$

Suponiendo que E_o permanezca constante durante un día y después de convertir el tiempo al ángulo horario, obtenemos que la irradiación extraterrestre H_o diaria total desde el amanecer hasta el ocaso será:

$$H_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \left[\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + (\sin \delta \sin \phi) \omega_s \left(\frac{\pi}{180} \right) \right] \quad (24)$$

Donde I_{sc} es la constante solar, E_o es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, ω_s es el ángulo horario en grados para una superficie horizontal y el factor $\frac{\pi}{180}$ es utilizado para convertir ω_s el ángulo horario de grados a radianes.

2.3.5 Efecto de la atmósfera

No toda la radiación solar interceptada por nuestro planeta llega hasta su superficie, debido a que la capa atmosférica supone un obstáculo al libre paso de la radiación mediante diversos efectos, entre los que cabe destacar la reflexión en la parte superior de las nubes y la absorción parcial por las moléculas del aire atmosférico. Este último fenómeno hace que la intensidad que llega a la

superficie, aun en días despejados y con atmosfera muy limpia, sea como máximo de unos 1100 W/m^2 , aunque en la práctica rara vez se miden valores superiores a los 1000 W/m^2 . (Censolar, 2013)

Otro factor que influye apreciablemente en la intensidad radiante que, proveniente del sol, alcanza la superficie terrestre es la absorción atmosférica que sufre, incluso en días muy claro, la radiación solar a medida que recorre las capas de aire hasta llegara la superficie. Dicha absorción es mayor cuanto mayor sea el camino recorrido por el rayo desde que penetra en las capas superiores de la atmosfera hasta que llega al suelo.

También es preciso tener en cuenta que, a pesar de que los fotones viajan en línea recta, al llegar a las capas atmosféricas y chocar con las moléculas y el polvo en suspensión, sufren difusiones y dispersiones que traducen en cambios bruscos de dirección. Aunque esta luz difundida finalmente llega también a la superficie, al haber cambiado muchas veces de dirección a medida que ha atravesado la atmósfera, lo hace, no como si procediese directamente del disco solar, sino de toda la bóveda celeste. Esta radiación es conocida con el nombre de difusa, en contraposición con la dirección directa, que es aquella que alcanza la superficie manteniendo la línea recta desde

el disco solar. La suma de las radiaciones directa y difusa es la radiación total, que es la que nos interesa a efectos energéticos. La radiación difusa hace que un cuerpo siempre este recibiendo una cierta cantidad de energía por todas sus partes, incluso por las que no recibe la luz del sol directamente.

Aunque en un día despejado la radiación directa es mucho mayor que la difusa, esta última será, evidentemente, la única forma posible de radiación en los días cubiertos, filtrándose más o menos homogéneamente por toda la bóveda celeste a través de la capa nubosa. La radiación difusa supone aproximadamente un tercio de la radiación total que se recibe a lo largo del año.

En cuanto a su distribución energética, hay que tener en cuenta que casi un 40% de la radiación que alcanza la superficie lo hace no en forma de luz visible sino como radiación infrarroja. (Censolar, 2013)

2.4. Medición de la irradiación solar global

Recordando que la radiación solar luego de atravesar las distintas capas de la atmosfera y ser sometida a los efectos absorción, dispersión y reflexión, logra llegar a la superficie del suelo, a esta radiación se le denomina radiación solar global.

La radiación solar global es la densidad de flujo de energía electromagnética proveniente del Sol que alcanza la superficie del suelo, su valor es dependiente de la radiación solar extraterrestre, así como del estado de la atmósfera, siendo compuesta por dos componentes, la radiación solar directa y la radiación solar difusa, las cuales se describieron en el capítulo 2.3.2. (Iqbal, 1983)

Si bien, la suma de la radiación solar directa y difusa determina las características de disponibilidad de la radiación solar global en una localidad específica, este cálculo se puede realizar de manera directa instalando aparatos de medición debidamente calibrados y durante largos períodos de tiempo. Sin embargo, cuando lo anterior no es posible se recurre a los métodos computacionales o a los métodos empíricos, los cuales estiman el valor de la radiación solar global a partir de modelos estadísticos elaborados en base a datos de ciertas variables climáticas. (Iqbal, 1983)

2.4.1 Medición directa

Existen diferentes instrumentos para la medición directa de la irradiancia solar global cuyas características y grados de precisión son también diferentes. A continuación, se describirán los más representativos.

Piranómetro.

La irradiancia solar global se mide mediante radiómetros con campos de visión hemisféricos, llamados piranómetros. Elementos de detección de los más comunes. Los piranómetros se basan en principios termoeléctricos, termo-mecánicos o fotovoltaicos. A diferencia de los absorbentes cónicos de algunos de los pirheliómetros, los elementos de detección de los piranómetros son superficies planas. En las mediciones meteorológicas de rutina, los piranómetros se colocan siempre en una posición horizontal.

Hay una serie de fabricantes de piranómetros. El laboratorio Eppley fabrica dos tipos de instrumentos, el blanco y negro y el piranómetro de precisión espectral, ambos basados en el principio termoeléctrico.

El piranómetro blanco y negro es un desarrollo de su conocido instrumento tipo "bombilla", que ya no está en producción. El detector de este radiómetro es una termopila diferencial de construcción radial enrollada con alambres, con tres segmentos negros recubiertos con 3M negro, y tres segmentos blancos recubiertos con sulfato de bario: de ahí el nombre de piranómetro "blanco y negro".

El instrumento está equipado con un circuito integrado de compensación de temperatura para minimizar los efectos de las fluctuaciones de la temperatura ambiente. Este piranómetro, que se muestra en la Figura 10, tiene una cubierta semiesférica de vidrio óptico Schott WG295,3 de fondo de precisión que se transmite uniformemente de 0,285 a 2,8 μm . Se proporciona una abertura en el costado del instrumento para colocar un desecador para absorber la humedad dentro de la cúpula de vidrio. El cuerpo principal del instrumento lleva tornillos de nivelación ajustables y un nivel de burbuja circular. Con el instrumento se proporciona un certificado de calibración rastreable a la referencia mundial de radiometría.

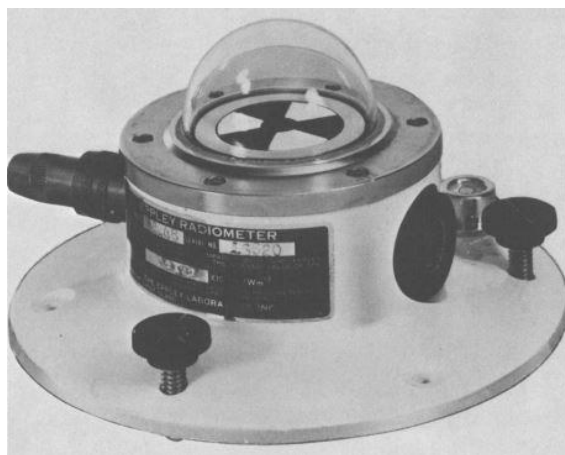


Figura 10. Piranómetro blanco y negro Eppley. (Iqbal, 1983)

El piranómetro de precisión espectral Eppley comprende una termopila circular de múltiples funciones. El sensor está cubierto con la laca negra de Parson, que tiene una alta absorbencia en todas las longitudes de onda. El instrumento está equipado con dos cubiertas hemisféricas de vidrio Schott WG295. La cubierta exterior puede ser reemplazada por filtros hemisféricos de vidrio Schott, que transmiten radiación dentro anchos de banda especificados, de ahí el nombre de piranómetro espectral. Este instrumento es más preciso que el piranómetro "blanco y negro".



Figura 11. Piranómetro de precisión espectral Eppley.
(Iqbal, 1983)

Otro piranómetro muy comercial es el piranómetros construidos sobre células fotovoltaicas de silicio. Aunque la precisión alcanzable con estos radiómetros no es alta, su respuesta es prácticamente instantánea, pueden proporcionar una señal de salida integrada sin

fuente de alimentación externa y cuestan solo una fracción del precio de un instrumento de termopila. Las inexactitudes en las mediciones resultan de las características espectrales selectivas de las células solares. Por ejemplo, la respuesta espectral de un sensor fotovoltaico típico se muestra en la Figura 12. Exhibe un pico relativamente agudo a alrededor de 1.0μ y el rango de sensibilidad está solo entre 0.4 y 1.1μ .

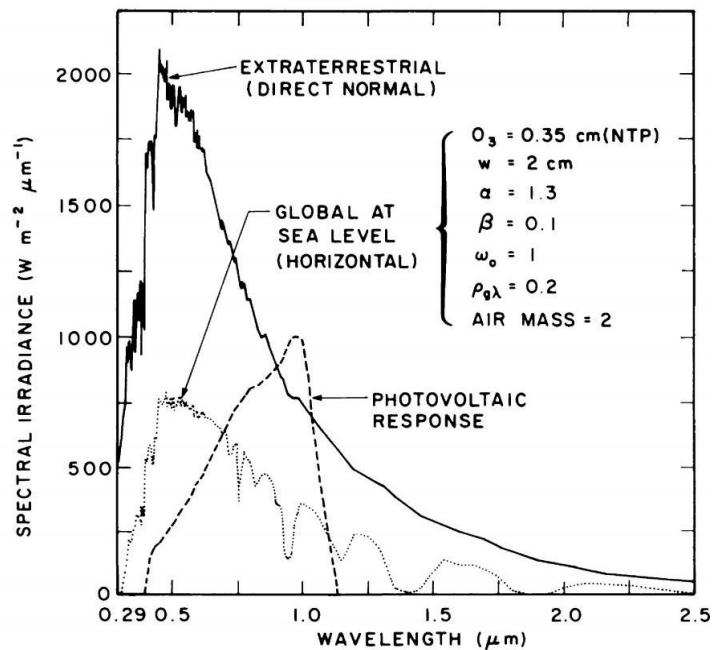


Figura 12. Respuesta espectral de la célula de silicio frente a la irradiancia espectral. (Iqbal, 1983)

En el mismo diagrama, también se dibuja la irradiancia espectral global bajo un conjunto de parámetros atmosféricos típicos. Muestra que la respuesta completa de las células solares ocurre solo en una

banda espectral estrecha. Por este motivo, la calibración de los piranómetros fotovoltaicos plantea un problema. En la Figura 13, se muestra el piranómetro de células de silicio.



Figura 13. Piranómetro de células de silicio. (Iqbal, 1983)

2.4.2 Modelos empíricos

Los modelos empíricos en aplicaciones solares se basan en correlaciones entre la radiación solar global y diferentes variables meteorológicas: horas solares, nubosidad, temperatura, el color de las fotografías obtenidas desde satélites, etc. (Lorenzo & Araujo, 1994)

Entre las variables más utilizadas se encuentra la temperatura, esto se debe a la fácil disponibilidad de datos, además se caracteriza porque su medida es simple y robusta. Entre los modelos más conocidos se encuentran los desarrollados por Hargreaves & Samani (1982), Bristow y Campbell (1983), Allen (2002), entre otros.

Modelo de Ångström-Prescott (1940).

Uno de los modelos más antiguos y más frecuentemente utilizado es el Modelo de Ångström-Prescott usado para estimar la irradiación solar relativa (H/H_o) basado en las horas de sol relativas (n/N). Esta ecuación fue sugerida por Prescott (1940) como una modificación del modelo de Ångström propuesto en 1924.

La ecuación. está dada por:

$$\frac{H}{H_o} = a + b \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \quad (25)$$

Donde H representa la irradiación solar global, H_o es la irradiación solar extraterrestre, n corresponde a las horas de sol efectivas y N es la duración astronómica del día para una fecha del año y latitud específicos, los coeficientes empíricos " a " y " b ", tienen un significado físico, están asociados al tipo de nubes y a las condiciones generales que determinan la turbidez de la atmósfera, donde $a+b$ representa el valor máximo de la transmisividad de la atmósfera (τ) mientras que el coeficiente " a " representa el mínimo valor de τ . Ångström, después de haber analizado estos coeficientes, sugirió los valores de 0,2 para el coeficiente " a " y de 0,5 para el coeficiente " b ". (Castillo y Santibáñez, 1981)

En el Atlas Solar del Perú (Senamhi, 2003) se aplicó el modelo de Ångström y Prescott utilizando información a nivel diario de las estaciones de base a instrumentación piranométrica y actinométrica se procedió a estimar los valores de los coeficientes empíricos para cada uno de las estaciones base, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Valores de los coeficientes del modelo Ångström-Prescott por estación, número de datos utilizado y error promedio

Estación meteorológica	a	b	Número de datos	Error (%)
Costa				
Miraflores	0,355	0,392	3 681	-2,4
A. Von Humboldt	0,211	0,467	12 186	12,9
San Camilo	0,321	0,468	2 241	-0,4
La Joya	0,593	0,181	7 534	2,78
Sierra				
Bambamarca	0,322	0,336	2 697	6,6
Weberbauer	0,231	0,521	18 59	-2,7
Cosmos	0,320	0,384	929	7,4
Huayao	0,397	0,379	6 285	2,2
Granja Kcayra	0,376	0,364	2 199	3,4
Chuquibambilla	0,395	0,384	1 892	-2,1
Puno	0,378	0,438	2 805	9,2
Characato-La Pampilla	0,367	0,396	1 220	10,7
Selva				
San Ramon SM	0,301	0,377	2 742	6,6
El Porvenir	0,278	0,320	1 613	7,0
Bellavista	0,355	0,341	714	5,9

Baigorria et. al., (2003)

Modelo de Bristow & Campbell (1983).

Este modelo desarrolla una relación entre transmisividad atmosférica (τ) o radiación solar relativa (H/H_0) en función de la amplitud térmica (ΔT). (Senamhi, 2003)

La explicación física de modelo de Bristow & Campbell depende de la relación de Bowen, la cual describe que la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas en un día determinado depende de la relación entre el calor sensible y el calor latente. El calor sensible varía de acuerdo a la radiación solar incidente y es responsable de las temperaturas máximas. Durante la noche, el calor sensible es perdido hacia el espacio como radiación en onda larga, disminuyendo así la temperatura del aire hasta su valor mínimo, valor que normalmente se alcanza antes del amanecer (Meza y Varas, 2000).

La diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima del aire está relacionada con el grado de cobertura nubosa en una localidad. En condiciones de cielo despejado suceden altas temperaturas durante el día ($T_{m\acute{a}x}$) porque la atmósfera es transparente a la radiación solar incidente, y bajas temperaturas

durante la noche ($T_{mín}$) porque la poca radiación de onda larga saliente es absorbida por la atmósfera.

Por el contrario, en condiciones de cielo cubierto, la temperatura máxima es relativamente más pequeña porque una parte significativa de la radiación solar incidente nunca alcanza la superficie terrestre y es absorbida y reflejada por la nubosidad. Similarmente, la temperatura mínima será relativamente más alta mientras la cobertura nubosa actúe como una capa y decrece el total de radiación de onda larga saliente. Por lo tanto, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire puede ser utilizada como un indicador de la fracción de radiación solar extraterrestre que alcanza la superficie terrestre. (Allen et al., 1998 citado por Aburto, 2007)

Utilizando este argumento, Bristow & Campbell (1984) sugirieron la siguiente relación para la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas.

$$\frac{H}{H_0} = a_B \cdot [1 - e^{-b_B(T_{máx} - T_{mín})^{c_B}}] \quad (26)$$

Donde:

H : Irradiación solar global [$\text{Wh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ o $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

H_o : Irradiación solar extraterrestre [$\text{Wh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ o $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

$T_{m\acute{a}x}$: Temperatura máxima [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{m\acute{i}n}$: Temperatura mínima [$^{\circ}\text{C}$]

a_B, b_B y c_B : coeficientes empíricos

En otras referencias es muy común encontrar que la diferencia entre la temperatura máxima y mínima, se describe como amplitud térmica (ΔT)

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (27)$$

Los valores empíricos (a_B, b_B y c_B) tienen también un significado físico; a_B representa el máximo valor de la transmisividad atmosférica (τ) que es característico de cada área de estudio y además depende de la contaminación atmosférica y de la altitud; b_B ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) y c_B determinan el efecto del incremento de la amplitud térmica sobre la máxima (τ) de la atmósfera, asimismo los valores sugeridos para cada coeficiente son de 0,7 para el coeficiente (a_B), entre 0,004 y 0,010 para el coeficiente (b_B) y 2,4 para el coeficiente (c_B). (Meza y Varas, 2000)

En el desarrollo del mapa solar del Perú, se observó que debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciadas por la topografía, latitud (ϕ) y altitud, entre otros factores, los coeficientes (b_B) y (c_B)

propuestos pueden ser aplicados sólo en áreas bajo similares condiciones de régimen térmico. Esto hace inadecuada una aplicación directa del modelo en áreas donde no existe este requisito. Es por esto que se desarrollaron algunas ecuaciones empíricas para determinar el valor de estos dos coeficientes (Baigorria et. al., 2003)

$$c_B = 2,116 - 0,072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57,574e^{\phi} \quad (28)$$

Dónde: ϕ es latitud del lugar.

$$b_B = 0,107c_B^{-2,6485} \quad (29)$$

Tabla 4

Valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación, número de datos y error promedio

Estación meteorológica	aB	bB (°C-1)	cB	Número de datos	Error (%)
Costa					
Miraflores	0,75	0,04	1,49	3 597	3,8
A. Von Humboldt	0,68	0,06	1,42	13 712	14,1
San Camilo	0,79	0,09	1,05	2 244	3,9
Sierra					
Bambamarca	0,66	0,23	0,80	2 033	12,6
Weberbauer	0,75	0,04	1,28	1 607	3,2
Cosmos	0,70	0,03	1,62	773	8,5
Huayao	0,78	0,11	0,97	5 387	4,6
Granja Kcayra	0,74	0,11	0,92	1 961	11,6
Chuquibambilla	0,78	0,19	0,76	1 476	3,6
Puno	0,82	0,20	0,87	2 156	7,2
Characato-La pampilla	0,76	0,16	0,91	3 134	7,5
Selva					
San Ramón SM	0,68	0,02	1,86	2 864	7,5
El Porvenir	0,60	0,06	1,21	2 346	4,1
Bellavista	0,70	0,06	1,22	1 038	2,3

Baigorria et. al., (2003)

Hargreaves y Samani (1982).

El mismo principio mencionado anteriormente se mantiene para este modelo el cual relaciona la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la temperatura del aire, el cual fue ajustado y validado para algunas estaciones meteorológicas en una variedad de condiciones climáticas.

$$\frac{H}{H_o} = K_{rs} \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (30)$$

Donde H representa la radiación solar global, H_o es la radiación solar extraterrestre, K_{rs} simboliza el coeficiente de ajuste, T_{max} corresponde a la temperatura máxima y T_{min} es la temperatura mínima.

Según Allen et al. (1998, citado por Aburto, 2007), la raíz cuadrada de la diferencia de temperatura está estrechamente relacionada a la existencia diaria de radiación solar en una localidad determinada. En este caso, el coeficiente de ajuste (K_{rs}) es empírico y varía de acuerdo a regiones ubicadas en el interior o en la costa. Para localidades del interior, donde dominan las grandes extensiones de Tierra y las masas de aire no están fuertemente influenciadas por un gran cuerpo de agua, el coeficiente de ajuste (K_{rs}) es 0,16 aproximadamente. En cambio, para localidades costeras, situadas en

o próximas a la costa de una gran extensión de Tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano, el coeficiente de ajuste (K_{rs}) es 0,19 aproximadamente .

2.5. Descripción de la zona de estudio

2.5.1 Ubicación geográfica

La región Tacna, está ubicada en el extremo sur del país, sus coordenadas geográficas se sitúan entre 16°18' y 18°20' de latitud sur y 69°28' y 71°02' de longitud oeste. El territorio abarca zonas de la costa y de la sierra con alturas que varían desde los 0 metros hasta más de 5 569 m.s.n.m., presenta tres zonas geográficas, la costa que va de 0 a 2 000 m.s.n.m., la zona intermedia de los 2 000 a 4 000 m.s.n.m. y la zona alto andina de los 4 000 m.s.n.m. a más.

El territorio de Tacna abarca una superficie de 16 044 Km², extensión que representa el 1,25 % del territorio nacional. (Ingemmet, 2016) El Departamento de Tacna limita internacionalmente con dos países, con un perímetro fronterizo de 210 km. aproximadamente. Norte: Departamento de Moquegua, Sur: República de Chile, Este: Departamento de Puno y República de Bolivia, Oeste: Océano Pacífico. (ver Figura 14)

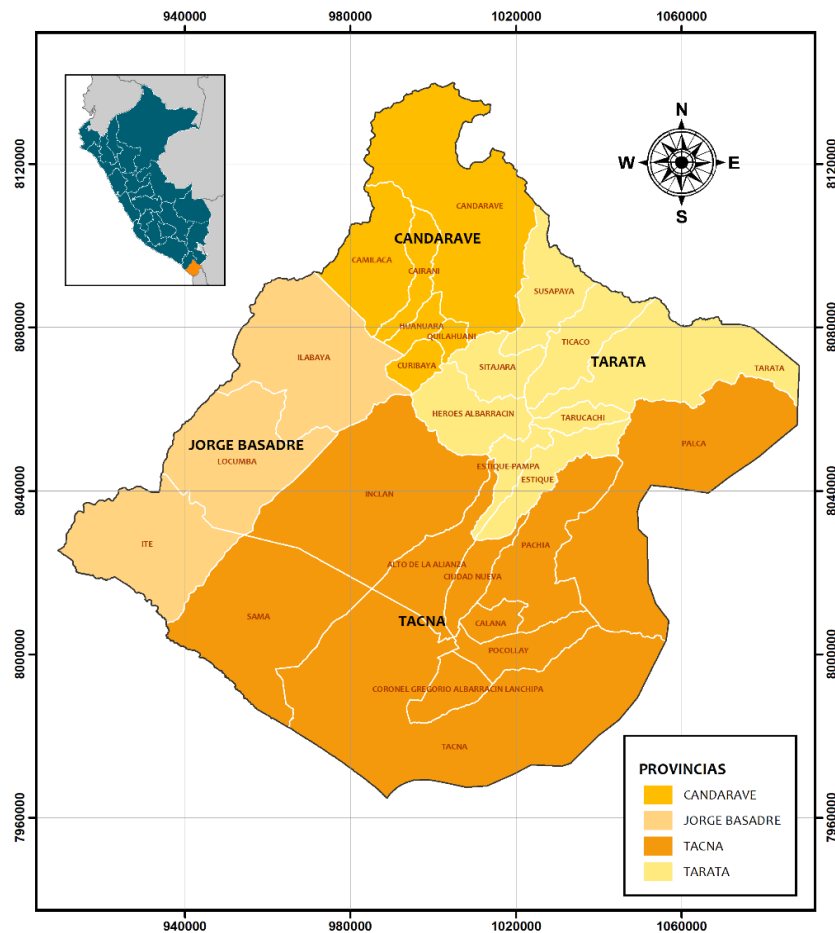


Figura 14. Mapa de ubicación, división provincial y distrital de la región Tacna.

2.5.2 Demografía y división política

De acuerdo a las cifras reportadas en el Censo de Población y Vivienda 2017, el número de habitantes en el departamento de Tacna es de 329 332, lo que representa el 1,1 por ciento de la población nacional (Inei, 2018).

Políticamente está dividida en cuatro provincias (Candarave, Tarata, Jorge Basadre y Tacna) y 28 distritos. La provincia de Tacna tiene como capital la ciudad de Tacna (568 m.s.n.m.) a su vez capital del departamento, que se subdivide en once distritos; Tarata posee ocho distritos, Jorge Basadre posee 3 distritos y Candarave con seis distritos. (ver Tabla 5)

Tabla 5
Demografía y división política de la región de Tacna

Provincia	Población	Superficie (km²)	Distritos
Candarave	6 102	2 261,10	Cairani Camilaca Candarave Curibaya Huanuara Quilahuani
Jorge Basadre	10 773	2 928,72	Ilabaya Ite Locumba
Tacna	306 363	8 066,11	Alto de la Alianza Calana Ciudad Nueva Gregorio Albarracín Inclán Pachía Palca Pocollay Sama La Yarada-Los Palos Tacna
Tarata	6 094	2 819,96	Héroes Albarracín Estique Estique Pampa Sitajara Susapaya Tarata Tarucachi Ticaco
Total	329 332	16 075,89	28

Inei. (2018)

2.5.3 Clasificación climática

El clima de Tacna no es uniforme debido a que dos terceras partes de su territorio corresponden a la faja de costa y la tercera parte se halla situada en las alturas de la cordillera.

Según la clasificación de Thornthwaite, el departamento de Tacna presenta los siguientes tipos de climas:

Clima del tipo árido. semicálido y húmedo, con carencia de lluvias en todas las estaciones del año; corresponde este tipo de clima a zonas emplazadas entre los 0 y 1000 m.s.n.m., como las localidades de Ite, La Yarada, Tacna, Sama Grande y Locumba, pertenecientes a las provincias de Jorge Basadre y Tacna.

Clima del tipo semiárido. templado y seco, con carencia de lluvias en otoño, invierno y primavera. Este clima corresponde a las localidades ubicadas entre los 1000 m.s.n.m. y 2000 m.s.n.m., en las estribaciones andinas de las provincias de Jorge Basadre y Tacna.

Clima del tipo semiseco, frío. con carencia de lluvias en otoño, invierno y primavera. Corresponde este tipo de clima a las localidades de las provincias de Jorge Basadre, Candarave y Tarata, ubicadas entre los 2000 m.s.n.m. y 4000 m.s.n.m.

Clima del tipo lluvioso, semifrío y seco. con carencia de lluvias en otoño, invierno y primavera. Corresponde este tipo de clima a las zonas altas de las provincias de Candarave y Tarata, ubicados entre los 4000 m.s.n.m. y 5000 m.s.n.m. (Senamhi, s.f.a)

En la Figura 15, se muestra la clasificación climática según el Servicio Nacional de meteorología e hidrología del Perú (Senamhi) en el departamento de Tacna.

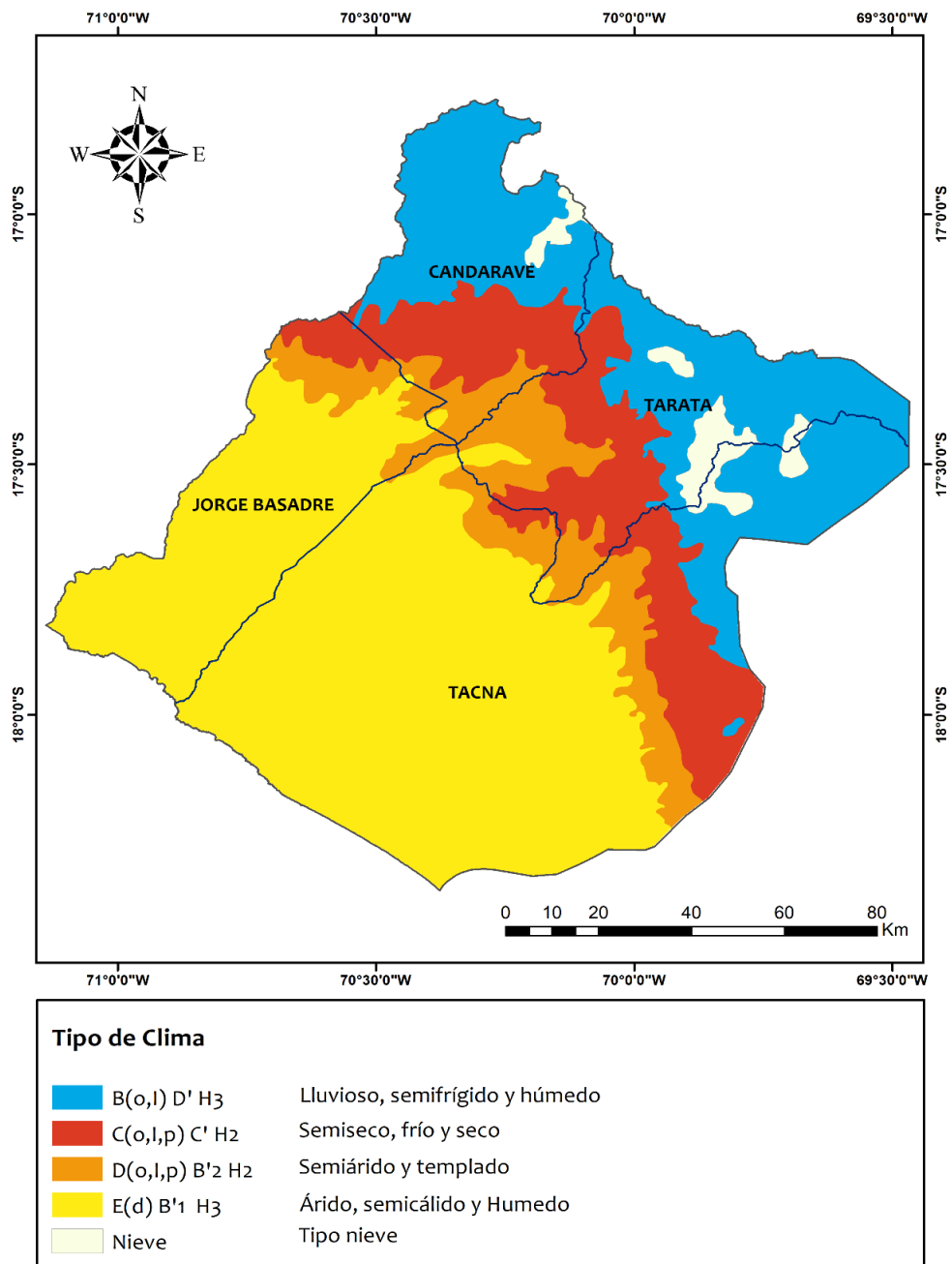


Figura 15. Mapa climático de la región de Tacna. Adaptado para Tacna de Ideseportal web.

2.5.4 Zona alto andina de Tacna

La zona alto andina se caracteriza por estar a una altitud de 4000 m.s.n.m. a más.

Región natural. En el Perú, se suele dividir la geografía peruana en 8 regiones naturales propuestas por el geógrafo Javier Pulgar Vidal en 1967, dentro de esta división transversal o altitudinal a la zona alto andina de la región de Tacna le corresponde la región natural Puna.

Puna o Alto Andino, se encuentra entre los 4000 y 5200 m.s.n.m. De las 3 clases de punas existentes en los Andes, Tacna pertenece al tipo Puna semihúmeda. La vegetación de esta región lo compone una densa vegetación raquílica adherida al piso y son comunes la yareta y la pallagua. Otra característica de esta zona es la abundancia del ichu que sostiene la ganadería de auquénidos sudamericanos en el altiplano de la cuenca del río Maure. Entre los árboles característicos de esta zona destacan el queñual. A esta altura se encuentran las comunidades alpaqueras de Alto Perú, Mamuta, Queñuavichinca, entre otras. (Sifuentes, s.f.)

Ecorregión. Con un análisis más completo respecto a la clasificación de las regiones geográficas del Perú, el investigador

peruano Antonio Brack Egg en el 2000, tomando en consideración diferentes factores ecológicos: tipos de clima, regiones geográficas, hidrografía, flora y fauna ha identificado la existencia de once ecorregiones en el Perú.

Una ecorregión, es un área geográfica que se caracteriza por tener el mismo clima, similares caracteres en cuanto a suelos, condiciones hidrográficas, la misma flora y fauna, es decir, una región donde los factores medio ambientales o ecológicos son los mismos y están en estrecha interdependencia.

La zona alto andina de la región de Tacna se encuentra en la ecorregión Puna, la ecorregión Puna, región alto andina situada por encima de los 3800 msnm como promedio, se caracteriza por sus temperaturas extremas, con mucho sol durante el día y frío intenso durante las noches, con clima frío de montaña subhúmedo, una flora de tundra y fauna adaptada a la altura. Las grandes planicies y accidentadas montañas caracterizan a su paisaje, así como los más altos glaciares y nevados. (Brack, 2000)

La Figura 16, muestra el mapa de las ecorregiones en la región Tacna.

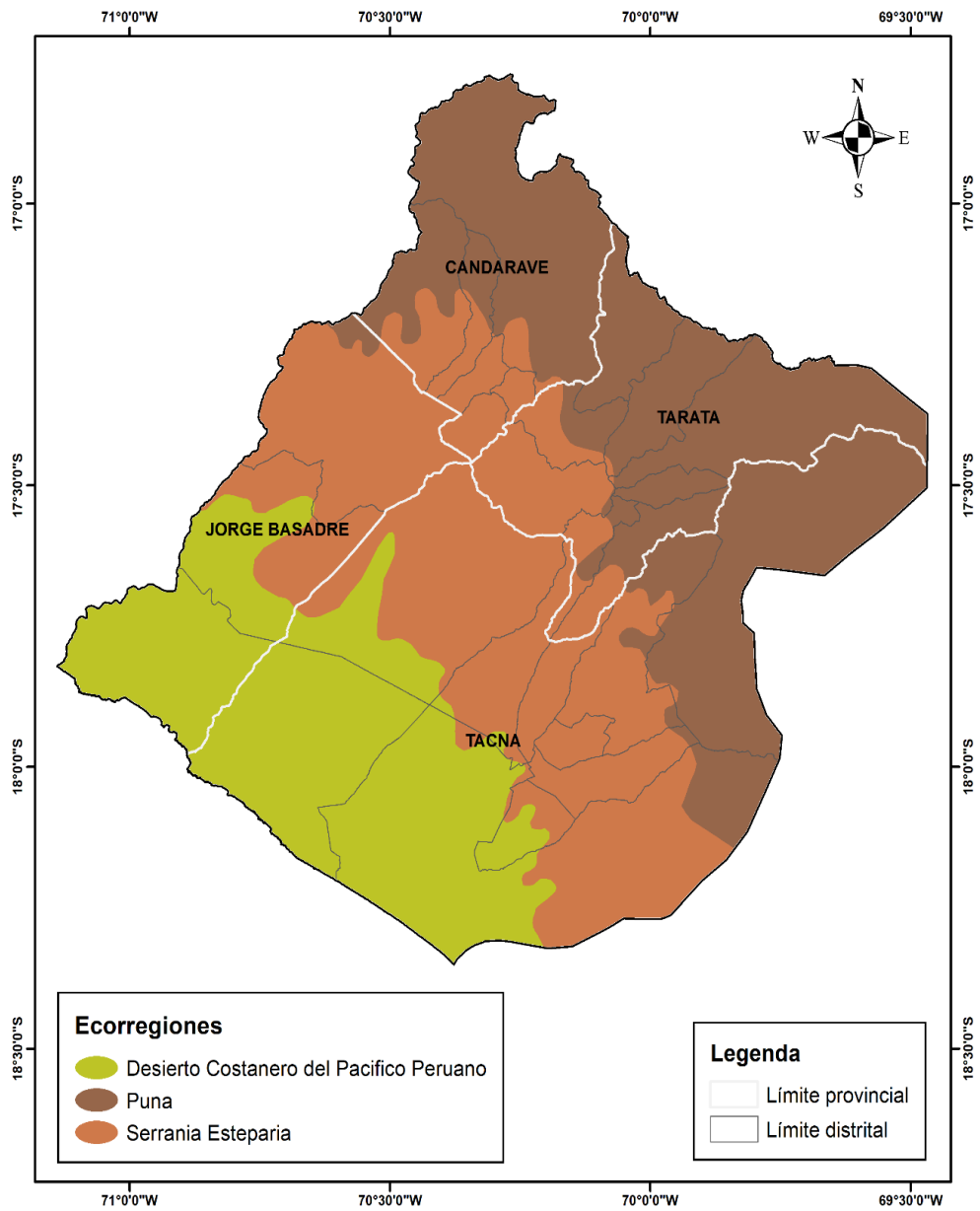


Figura 16. Mapa de las ecorregiones del departamento de Tacna.

Adaptado para Tacna de Idesep portal web.

2.6. Definición de términos

Radiación solar (G): Término genérico para la energía radiante que emite el Sol. (RISOL, 1999) El término radiación se aplica al cuerpo que radia, mientras que el término irradiación al objeto expuesto a la radiación. Estrictamente, la superficie terrestre es irradiada y los mapas y tablas son de irradiación solar, sin embargo, aún hoy en día suele usarse el término radiación para referirse a la irradiación (Rodríguez y González, 1992 citado por Senamhi, 2003).

Irradiación solar (H). Es la cantidad total de energía radiante del sol que llega a una superficie determinada. Se trata de una medida de la energía incidente sobre una superficie, sus unidades son J/m^2 o kWh/m^2 (Censolar, 2013).

Irradiancia solar (I). Potencia solar incidente en una superficie por unidad de área. (W/m^2) (RISOL, 1999).

Irradiación solar directa (H_b). Es la radiación que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección (Sánchez et al., 1993 citado por Senamhi, 2003).

Irradiación solar difusa (H_d). Radiación que llega a la superficie de la Tierra, que proviene de otras direcciones debido a la reflexión y dispersión

que producen en la radiación solar, la atmósfera y las nubes (Hernández et al., 1 991 citado por Senamhi, 2003).

Irradiación solar reflejada (H_d). Fracción de la radiación solar (directa y difusa) que es reflejada por la superficie terrestre (RISOL, 1 999).

Irradiación solar global (H): Suma de la irradiación solar directa, difusa y reflejada (RISOL, 1999).

Irradiación solar extraterrestre (H_o). Radiación incidente sobre una superficie horizontal en el tope de la atmósfera, que viene a ser el límite superior de la exósfera (ausencia casi total de gases). La irradiación extraterrestre varía con la latitud y la fecha (Hernández et al., 1 991 citado por Senamhi, 2003).

Temperatura máxima y mínima. Son las temperaturas del aire máxima y mínima alcanzados durante el día, medidas entre 1,25 a 2 m por encima del suelo (OMM, 1 996 citado por Senamhi, 2003).

Termómetro de máxima. Está construido en forma similar a la de los termómetros corrientes de mercurio y cristal, salvo que existe un estrangulamiento o estrechamiento en la luz del tubo, inmediatamente por encima de la ampolla. Al dilatarse, el mercurio se ve forzado a atravesar ese estrechamiento, pero al contraerse por enfriamiento la delgada columna de mercurio que queda por encima del estrechamiento se separa del mercurio

de la ampolla, con lo que queda registrada la temperatura máxima.
(Fuess,1992)

Termómetro de mínima. Está constituido por un tubo lleno de alcohol en el que está sumergido un índice. Al contraerse el alcohol, el índice es arrastrado por adherencia en dirección a la ampolla y queda fijo señalando la temperatura mínima alcanzada (Fuess, 1992).

Estación meteorológica convencional o mecánica. También conocida como tradicional, puede realizar en forma continua y mecánica registros de diferentes variables. Necesitan de personal u observador meteorológico, quien se encarga de realizar las lecturas de algunos de los aparatos de medición a determinadas horas del día, además debe de cambiar las bandas de registro de algunos instrumentos. (Instituto Meteorológico Nacional, s.f)

Estación meteorológica automática. Es un equipo que integra pequeños instrumentos o sensores electrónicos, destinados a medir variables climáticas, permite medir y almacenar información climática a intervalos regulares de tiempo, y permanecer en funcionamiento durante las 24 horas del día y los 365 días del año. La información puede ser recogida o transmitida a un computador, donde es procesada. Se instala en una torre de 2 m o 10 m, dependiendo de los parámetros a medir. (Centro del agua para la Agricultura,2014)

Estación agro-meteorológica. Las estaciones agrometeorológicas son instaladas con el fin de proporcionar asistencia a la agricultura, realiza observaciones meteorológicas, biológicas y en el suelo, 4 veces al día. (Senamhi, s.f.b)

Estación hidrológica. Las estaciones hidrométricas son reglas graduadas colocadas escalonadamente en un río, arroyo, laguna o embalse que miden la cantidad de agua disponible en estos cuerpos de agua originados por las lluvias y los escurrimientos. (Iagua, 2017)

Radiación solar en plano horizontal. Este valor representa a la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal. Generalmente se utiliza para determinar la insolación sobre plantas vegetales, calentamiento de estanques, etc. (Guevara, 2003)

Radiación solar en plano inclinado. Este valor representa la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada y se utiliza para diseñar calentadores solares de agua, sistemas fotovoltaicos, etc. (Guevara, 2003)

Transmisividad atmosférica (τ , H/H_0). También conocida como coeficiente de transmisión de la atmósfera. Es la medida de la tasa de transferencia de la energía solar que no es absorbida después que el haz atraviesa la unidad de espesor del medio atmosférico (Euromet, 2002 citado por Senamhi, 2003)

Heliofanía (n). Es el tiempo, en horas, durante el cual el sol tiene un brillo solar efectivo en el que la energía solar directa alcanza o excede un valor umbral variable entre 120 y 210 W/m², que depende de su localización geográfica, del equipo, del clima y del tipo de banda utilizada para el registro (WMO, 1 992 citado por Senamhi, 2003). También se le suele denominar “brillo solar” o “insolación”.

Amplitud térmica (ΔT). Es la medida de la variación entre la temperatura máxima y mínima del aire alcanzados durante un día y está relacionado con el grado de cobertura nubosa en una localidad, sus unidades con °C. (Allen et al., 1998 citado por Aburto, 2007)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo descriptivo explicativo.

3.2. Descripción del ámbito de la investigación

La zona en estudio la constituye la zona alto andina de la región Tacna, la cual se caracteriza por estar a una altitud de 4000 m.s.n.m. a más, abarca parte de las provincias de Tarata, Candarave y el distrito de Palca, en la zona se encuentran cuatro estaciones meteorológicas convencionales del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi), sin embargo al contar con poca cantidad de estaciones en la zona y para un mayor análisis de datos se agregaron tres estaciones más, pertenecientes también a Senamhi, entre 2500 a 4000 m.s.n.m. de altitud ubicados en la zona inter andina de la región Tacna.

3.3. Población y muestra de estudio

3.3.1 Descripción de la población

La población en estudio la constituye la zona alto andina de la región Tacna, con una extensión aproximada de 5776,10 km² la cual abarca parte de la provincia de Tarata, Candarave y el distrito de Palca, a una altitud de 4000 m.s.n.m. a más y la zona inter andina de

Tacna, situada a una altitud de 2500 a 4000 m.s.n.m. también abarca parte de las zonas de la provincia de Tarata, Candarave y palca.

3.3.2 Descripción de la muestra

La muestra en estudio la constituyen los registros diarios de temperaturas máximas y mínimas ambientales obtenidas de siete estaciones meteorológicas convencionales distribuidas en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna, pertenecientes al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi).

La Dirección zonal 7, Senamhi Tacna-Moquegua y el portal web Senamhi, bajo el propósito de investigación, proporcionó cuatro años de registros diarios y promedios mensuales de temperatura máxima y mínima correspondiente a siete estaciones meteorológicas convencionales del periodo 2014 al 2017, de las cuales, cuatro estaciones están ubicadas en la zona alto andina y tres en la zona inter andina de la región Tacna.

La cantidad de datos de temperatura máxima y mínima por día, equivalen a un dato para cada variable, estos son medidos a las 7:00 y 19:00 h respectivamente, en la Tabla 6 se describe la cantidad de datos por estación de las variables de temperatura máxima y mínima, durante el periodo 2014-2017, con un total de 20228 datos para las

siete estaciones meteorológicas distribuidas en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna.

Para comprobar el comportamiento del modelo Bristow-Campbell, entre datos estimados por el modelo y datos medidos por instrumentación, se hizo uso de los datos registrados de irradiancia solar global y temperatura máxima y mínima del Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT), ubicado en la ciudad de Tacna, que comprende datos diarios del año 2011.

Tabla 6
cantidad de datos de temperaturas máxima y mínima, por estación meteorológica durante el periodo 2014 al 2017

N°	Estación	2014	2015	2016	2017	Total
1	Chuapalca	718	718	729	716	2 881
2	Vilacota	730	728	732	730	2 920
3	Pampa umalzo	730	730	671	666	2 797
4	Paucarani	730	730	732	730	2 922
5	Aricota	724	720	728	718	2 890
6	Tarata	728	728	724	722	2 902
7	Cairani	730	725	732	729	2 916
						20 228

3.4. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.4.1 Técnicas de recolección de datos

Con el propósito de obtener los registros de temperatura máxima y mínima ambiental en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna, se solicitó los registros al Servicio Nacional de Meteorología

e Hidrología (Senamhi), dirección zonal 7 Tacna – Moquegua, la cual cuenta con una red de estaciones meteorológicas convencionales a lo largo y ancho de la región Tacna.

3.4.2 Instrumentos para la recolección de datos

El primer instrumento para la recolección de datos fueron los registros diarios de temperatura máxima y mínima ambiental del periodo 2014 al 2017 del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi).

Para la obtención de los datos de irradiación solar global para una superficie horizontal, se aplicó el modelo empírico de Bristow & Campbell (1984), el desarrollo se hizo en hojas de cálculo del software Microsoft Excel, las gráficas del comportamiento de las variables en el software OriginPro 9.0 y el software Arcgis 10.3 para el análisis espacial.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

3.5.1 Procesamiento de datos

Temperatura máxima y mínima

Los datos diarios y promedios mensuales de temperatura máxima y mínima, fueron procesados en hojas de Excel, durante el proceso de cuantificación de datos se notó que la cantidad de datos de temperatura máxima y mínima no coincidían, ya que en ciertos días

había registro de temperatura máxima y no de temperatura mínima y viceversa , sin embargo, para la aplicación del modelo es necesario ambas temperaturas, para estos días se decidió eliminar el registro incompleto, esto se realizó para un promedio de cinco datos por año, lo cual no afecta en el análisis de datos.

Irradiación solar global

Para la obtención de datos de irradiación solar global se aplicó el modelo Bristow-Campbell, para ello se utilizó diversas expresiones matemáticas de geometría solar descritas en el marco teórico y datos de entrada como latitud (ϕ) de cada estación meteorológica, la constante a_B y los datos de temperatura máxima y mínima.

A continuación, se muestra la secuencia de ecuaciones para aplicar el modelo de Bristow-Campbell para luego ser llevadas a una hoja de cálculo de Excel y así generar una base de datos irradiación solar global diaria para una superficie horizontal.

- Irradiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal (H_o) [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$], descrita en la ecuación (24).

$$H_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o [\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + (\text{sen } \delta \text{ sen } \phi) \omega_s]$$

- La constante solar (I_{sc}) expresada en la ecuación (14), equivale a $4,92 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

- Factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre (E_0), expresado en la ecuación (2) en fundamento teórico.

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma \\ + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma$$

- Día angular (Γ), descrito por la ecuación (3), donde (d_n) representa el n° de día del año. [rad]

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365}$$

- Declinación solar (δ) [rad], expresado en la ecuación (5).

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma \\ - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma \\ - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma)$$

- Ángulo horario de salida del sol para un plano horizontal (ω_s) [rad], se describe en la ecuación (13).

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

- Irradiación solar global para un plano horizontal (H) [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$]

$$H = H_0 a_B [1 - e^{-b_B(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{c_B}}] \quad (26)$$

- Coeficientes o constante empíricas b_B y c_B , expresados en la ecuación 28 y 29.

$$c_B = 2,116 - 0,072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57,574e^{\phi} \quad [-]$$

$$b_B = 0,107c_B^{-2,6485} \quad [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

3.5.2 Análisis de datos

Para el análisis de datos de la irradiación solar global se tomó en cuenta la información de energía solar de la región Tacna descrita en el atlas solar del Perú (Senamhi, 2003), en anexo figura 26.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Resultado de la base de datos

4.1.1 Registro de las estaciones meteorológicas

La Tabla 7 muestra, latitud, longitud y altitud de las siete estaciones meteorológicas convencionales distribuidas en la zona de estudio, siendo la zona alto andina por encima de los 4000 m.s.n.m. y la zona inter andina entre 2500 a 4000 m.s.n.m., así como la ubicación provincial y distrital.

Tabla 7

Estaciones meteorológicas de Senamhi Tacna para la medición de las temperaturas máxima y mínima

N°	Estación	Provincia	Distrito	Latitud [°]	Longitud [°]	Altitud [m.s.n.m]
Zona Altoandina						
1	Chuapalca	Tarata	Tarata	-17,305	-69,644	4177
2	Vilacota	Tarata	Susapaya	-17,129	-70,051	4390
3	Pampa umalzo	Candarave	Candarave	-16,875	-70,424	4609
4	Paucarani	Tacna	Palca	-17,525	-69,779	4609
Zona Inter Andina						
5	Aricota	Candarave	Quilahuani	-17,326	-70,235	2850
6	Tarata	Tarata	Tarata	-17,479	-70,036	3100
7	Cairani	Candarave	Cairani	-17,288	-70,339	3920

Con el software ArcGis 10.3, se obtuvo el mapa de ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas convencionales ubicados en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna, la cual se muestra en la Figura 17.

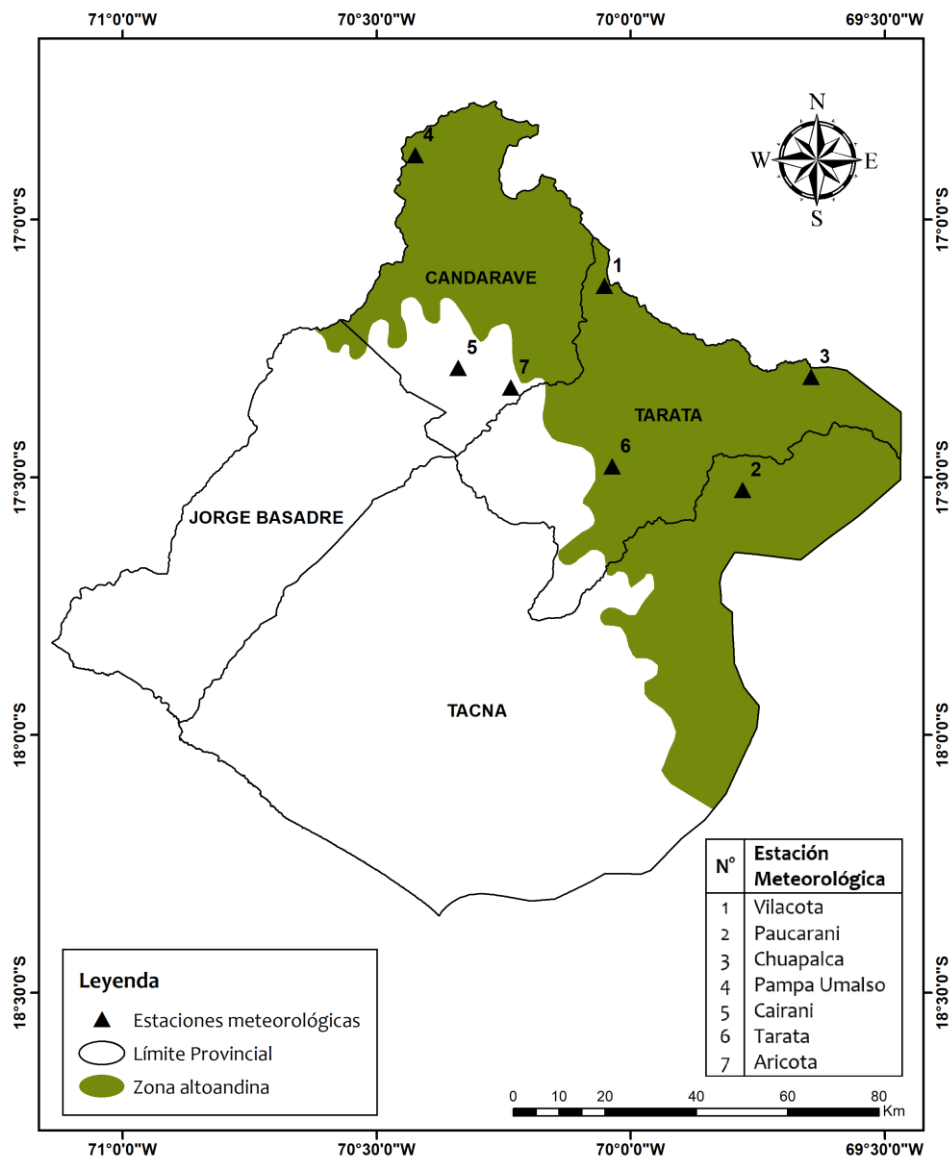


Figura 17. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna

4.1.2 Registros procesados de temperatura máxima y mínima

En la Tabla 8 y 9, se muestran los promedios mensuales de temperatura máxima y mínima, pertenecientes a las siete estaciones meteorológicas distribuidas en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna del periodo 2014 al 2017.

Tabla 8

Promedios mensuales de temperatura máxima del periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna

N° Estación	Temperatura Máxima [°C]											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Zona Altoandina												
1 Chuapalca	16,6	17,0	17,0	16,0	14,9	14,8	14,4	15,3	16,7	17,7	18,9	19,2
2 Vilacota	13,3	13,6	13,6	12,8	12,1	12,1	11,7	12,2	13,4	14,3	15,0	15,2
3 Pampa umalzo	11,5	11,8	11,8	11,4	11,0	11,2	10,5	11,3	11,9	12,5	12,9	12,6
4 Paucarani	13,2	13,4	13,5	12,4	11,0	11,1	10,7	11,5	12,8	14,0	14,9	15,2
Zona Inter-Andina												
5 Aricota	18,8	18,4	18,5	19,8	19,4	19,6	19,3	19,5	19,9	20,0	19,4	19,5
6 Tarata	20,7	20,3	20,5	21,7	21,3	21,7	21,3	21,6	22,0	21,8	21,8	21,8
7 Cairani	17,9	17,4	17,3	17,8	17,4	17,1	17,4	16,8	17,2	17,5	17,1	17,3

Tabla 9

Promedios mensuales de temperatura mínima del periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna

N° Estación	Temperatura Mínima [°C]											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Zona Altoandina												
1 Chuapalca	-1,2	-1,4	-2,5	-4,5	-9,7	-12,1	-12,6	-12,7	-9,1	-8,4	-8,6	-4,9
2 Vilacota	-4,8	-5,1	-5,5	-7,0	-11,8	-14,0	-13,7	-13,6	-11,0	-10,2	-9,5	-7,2
3 Pampa umalzo	-3,3	-2,2	-2,4	-3,2	-9,2	-11,9	-11,5	-11,5	-9,5	-9,7	-9,1	-6,6
4 Paucarani	-1,6	-1,4	-2,3	-3,5	-5,6	-6,6	-8,2	-7,8	-5,6	-5,4	-5,6	-3,4
Zona Inter-Andina												
5 Aricota	7,9	7,6	7,0	5,5	3,5	2,5	2,8	3,2	4,6	4,7	4,7	6,1
6 Tarata	5,9	5,9	5,3	3,5	1,2	2,1	2,9	3,0	4,4	4,4	3,8	5,0
7 Cairani	4,2	4,8	4,9	4,5	3,5	1,8	1,4	2,1	3,0	3,7	3,8	4,1

4.2. Desarrollo del modelo de Bristow-Campbell

La Tabla 10 muestra el resultado del desarrollo del modelo Bristow-Campbell en el software Microsoft Excel, siendo los datos de entrada para cada hoja de cálculo:

- Latitud de cada estación meteorológica
- Constante empírica a_B
- Datos diarios de temperatura máxima y mínima,

Con ese procedimiento se obtuvo una base de datos de irradiación solar global diaria para una superficie horizontal, para cada estación meteorológica en la zona de estudio.

Para la selección de la constante empírica a_B , se utilizó los valores de la Tabla 4, para la selección se consideró al clima y la altitud, según Camayo et al. (2013), siendo para la zona alto andina $a_B = 0,7$ y para la zona inter andina $a_B = 0,76$.

En anexo, Figura 34. muestra el mapa climático de la región Tacna, con la ubicación de las estaciones meteorológicas de estudio.

Tabla 10

Desarrollo del modelo Bristow-Campbell en el software Microsoft Excel

ESTACIÓN: PAUCARANI		ALTITUD :	4609	[msnm]	LATITUD :	-0,3059	[rad]	CONSTANTE B-C [aB] :	0,7		
Meses	Día año	Excentricidad [EO]	Declinación solar [δ]	Ángulo Horario [ωsh]	Irradiación Extraterrestre [H0]	Temperatura Máxima [Tmax]	Temperatura Mínima [Tmin]	Constante B-C [bB]	Constante B-C [cB]	Irradiación solar Global para una superficie horizontal [H]	
[-]	[-]	[-]	[rad]	[rad]	[MJ m ⁻² día ⁻¹]	[°C]	[°C]	[°C ⁻¹]	[-]	[MJ m ⁻² d ⁻¹]	[kWh m ⁻² d ⁻¹]
Enero	1	1,0351	-0,4024	1,7056	41,6601	10,9	1,0	0,0436	1,4032	19,3422	5,3728
	2	1,0351	-0,4011	1,7051	41,6553	13,6	-2,4	0,1179	0,9640	23,8710	6,6308
	3	1,0351	-0,3995	1,7045	41,6495	16,3	-4,2	0,3489	0,6400	26,5393	7,3720
	4	1,0351	-0,3979	1,7039	41,6426	13,9	2,5	0,0539	1,2952	20,8908	5,8030
	5	1,0351	-0,3961	1,7032	41,6346	10,4	0,9	0,0413	1,4320	18,8291	5,2303
	6	1,0350	-0,3942	1,7025	41,6254	12,2	2,6	0,0419	1,4248	18,9542	5,2650
	7	1,0350	-0,3922	1,7018	41,6152	12,5	-0,2	0,0658	1,2016	21,9087	6,0857
	8	1,0350	-0,3900	1,7010	41,6037	11,4	1,4	0,0442	1,3960	19,4350	5,3986
	9	1,0349	-0,3877	1,7001	41,5911	13,0	0,8	0,0608	1,2376	21,5271	5,9798
	10	1,0348	-0,3853	1,6992	41,5772	14,9	-1,0	0,1156	0,9712	23,7736	6,6038
	11	1,0347	-0,3827	1,6983	41,5621	15,9	-1,7	0,1652	0,8488	24,6728	6,8536
	12	1,0347	-0,3800	1,6973	41,5457	14,0	-1,8	0,1134	0,9784	23,7029	6,5841
	13	1,0346	-0,3772	1,6962	41,5281	14,6	-2,4	0,1448	0,8920	24,3266	6,7574
	14	1,0344	-0,3743	1,6952	41,5090	12,8	-1,9	0,0923	1,0576	23,0903	6,4140
	15	1,0343	-0,3713	1,6941	41,4887	14,5	-2,6	0,1480	0,8848	24,3571	6,7659
	16	1,0342	-0,3681	1,6929	41,4669	8,9	0,1	0,0377	1,4824	17,7754	4,9376
	17	1,0340	-0,3648	1,6917	41,4437	11,4	-0,3	0,0564	1,2736	21,0498	5,8472
	18	1,0339	-0,3614	1,6905	41,4190	9,8	-0,4	0,0455	1,3816	19,5784	5,4384
	19	1,0337	-0,3579	1,6892	41,3929	14,0	-1,3	0,1030	1,0144	23,3512	6,4864
	20	1,0335	-0,3543	1,6879	41,3652	12,4	-0,4	0,0668	1,1944	21,8469	6,0686
	21	1,0334	-0,3506	1,6865	41,3360	15,6	-0,7	0,1252	0,9424	23,8450	6,6236
	22	1,0332	-0,3467	1,6851	41,3051	11,5	-0,9	0,0628	1,2232	21,5293	5,9804
	23	1,0330	-0,3428	1,6837	41,2727	8,8	-0,2	0,0387	1,4680	17,9845	4,9957
	24	1,0327	-0,3387	1,6823	41,2386	11,4	-0,6	0,0590	1,2520	21,1894	5,8859
	25	1,0325	-0,3345	1,6808	41,2028	10,4	-0,8	0,0524	1,3096	20,4902	5,6917
	26	1,0323	-0,3303	1,6793	41,1654	12,8	-1,7	0,0890	1,0720	22,7882	6,3301
	27	1,0320	-0,3259	1,6777	41,1261	13,5	-4,8	0,1942	0,7984	24,8068	6,8908
	28	1,0318	-0,3214	1,6761	41,0851	13,9	-6,2	0,3105	0,6688	25,9057	7,1960
	29	1,0315	-0,3168	1,6745	41,0423	15,2	-4,7	0,2935	0,6832	25,7449	7,1514
	30	1,0312	-0,3122	1,6729	40,9976	14,0	-3,5	0,1615	0,8560	24,2834	6,7454
	31	1,0309	-0,3074	1,6712	40,9511	14,0	-3,4	0,1580	0,8632	24,2018	6,7227

4.3. Datos estimados de irradiación solar global

4.3.1 Comportamiento diario de la irradiación solar global

En la Figura 18, muestra el comportamiento diario de la irradiación solar global para una superficie horizontal, durante el periodo 2014 al 2017 de la estación Paucarani, ubicado en la zona alto andina, provincia de Tacna, distrito de Palca y a una altitud de 4609 m.s.n.m.

En la figura se observa el típico comportamiento oscilante de la energía solar, los picos de las curvas son la radiación solar global correspondientes a las estaciones de verano (diciembre-marzo) y los mínimos de radiación solar corresponde a la estación de invierno (junio-setiembre), esto en nuestro hemisferio.

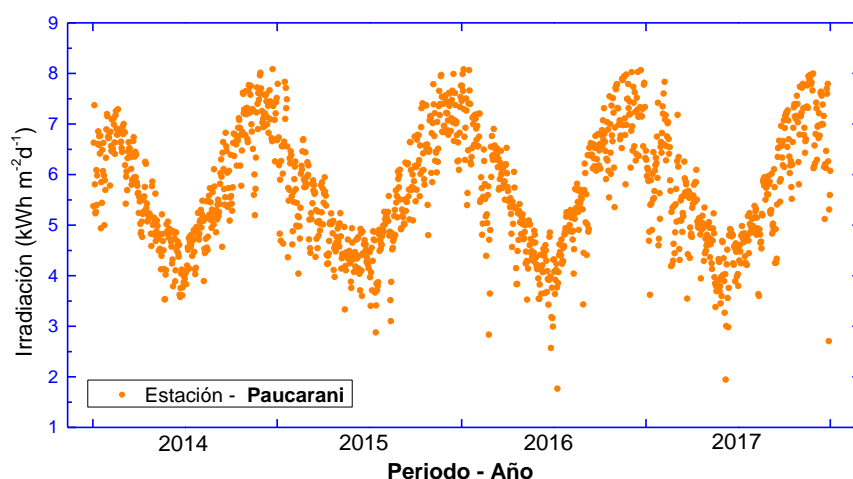


Figura 18. Irradiación solar global diaria de la estación Paucarani del periodo 2014 al 2017.

El comportamiento diario de la irradiación solar global correspondientes a las demás estaciones se encuentran en Anexo, Figura. 27-32.

4.3.2 Comportamiento mensual de la irradiación solar global

La Figura 19, muestra los promedios mensuales de la irradiación solar global diaria durante el año 2017, para cada estación meteorológica de estudio, donde se observa que el comportamiento de la irradiación solar global, muestra como valor promedio mensual mínimo de $4,4 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para la estación Cairani, ubicado en la provincia de Candarave perteneciente a la zona inter andina y un máximo de $7.5 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para la estación Vilacota en la provincia de Tarata ubicado en la zona alto andina de la región Tacna.

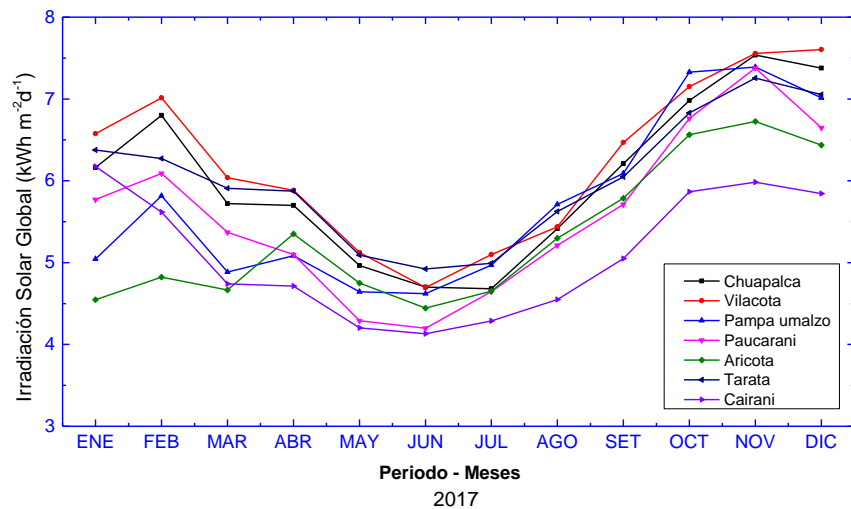


Figura 19. Irradiación solar global promedio mensual durante el año 2017 para cada estación meteorológica.

La Tabla 11, muestra los resultados de irradiación solar global promedios mensuales para las siete estaciones meteorológicas distribuidas en la zona inter andina y alto andina de la región Tacna, estos se obtuvieron promediando los datos mensuales del periodo 2014 al 2017.

Tabla 11

Promedios mensuales de la irradiación solar global para un plano horizontal del periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en zona alto andina e inter andina de la región Tacna

N° Estación	Irradiación Solar Global [kWh m ⁻²]											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Zona Alto andina												
1 Chuapalca	6,76	6,42	6,02	5,50	5,15	4,80	4,61	5,43	6,24	6,96	7,55	7,56
2 Vilacota	6,90	6,72	6,30	5,63	5,25	4,88	5,02	5,60	6,38	7,16	7,57	7,66
3 Pampa umalzo	6,19	5,87	5,45	5,45	4,88	4,78	4,83	5,56	6,22	6,93	7,36	7,11
4 Paucarani	6,29	6,03	5,78	5,09	4,49	4,21	4,48	5,14	5,80	6,62	7,19	7,02
Zona Inter Andina												
5 Aricota	5,87	5,57	5,39	5,34	4,82	4,52	4,62	5,19	5,85	6,50	6,81	6,66
6 Tarata	6,90	6,53	6,19	5,86	5,30	4,80	4,81	5,48	6,18	6,83	7,36	7,30
7 Cairani	6,72	6,25	5,68	5,18	4,56	4,35	4,57	5,00	5,66	6,26	6,52	6,60

La Figura 20, muestra el comportamiento mensual de la irradiación solar global, estimada con registros de temperatura máxima y mínima de las estaciones meteorológicas de Senamhi en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna, del periodo 2014 al 2017. Se observa que la irradiación mínima en las siete estaciones es de 4,21 kWh m⁻²d⁻¹ correspondiente a la estación de Paucarani en el distrito de Palca y un máximo de 7,66 kWh m⁻²d⁻¹ en la estación Vilacota de la provincia de Tarata.

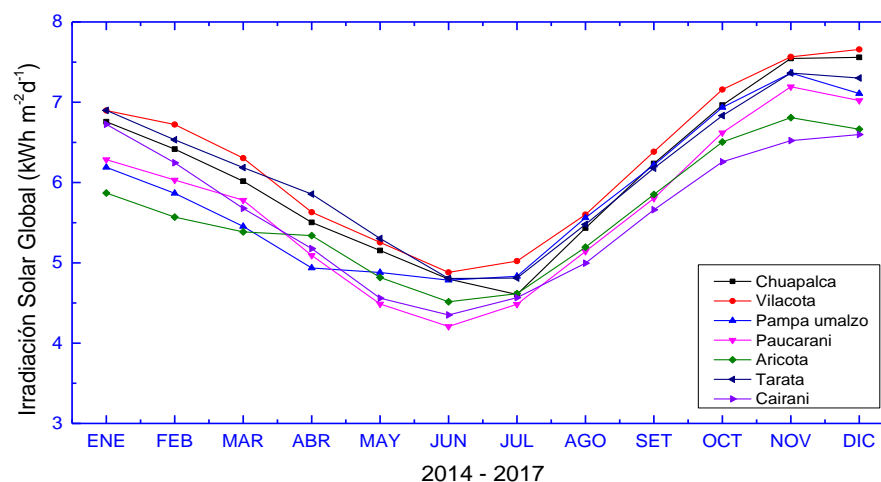


Figura 20. Promedios mensuales estimados de la irradiación solar global para un plano horizontal, para el periodo 2014 al 2017 pertenecientes a las estaciones en zona alto andina e inter andina de la región Tacna.

4.3.3 Comportamiento anual de la irradiación solar global

La Tabla 12. describe el comportamiento anual de la irradiación solar global para una superficie horizontal, para cada estación meteorológica de estudio durante el periodo 2014 al 2017.

Tabla 12

Promedio anual del 2014 al 2017 de la irradiación solar global para una superficie horizontal en la zona alto andina e inter andina de la región Tacna

N°	Estación	Irradiación Solar Global [$\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$]			
		2014	2015	2016	2017
Zona Alto andina					
1	Chuapalca	6,03	6,10	6,31	6,06
2	Vilacota	6,28	6,11	6,33	6,20
3	Pampa umalzo	5,89	5,79	5,54	5,72
4	Paucarani	5,81	5,54	5,76	5,59
Zona Inter Andina					
5	Aricota	5,67	5,66	5,73	5,35
6	Tarata	6,13	6,07	6,30	6,03
7	Cairani	5,87	5,81	5,66	5,10

La Tabla 13, muestra el promedio de la irradiación solar global para un plano horizontal para cada estación meteorológica de los 4 años de estudio, que comprende del 2014 al 2017, así como también su ubicación provincial y distrital.

Se observa que la irradiación solar global máxima anual es de 6,23 kWh m⁻²d⁻¹ correspondiente a la estación Vilacota perteneciente a la zona alto andina en la provincia de Tarata, distrito de Susapaya y la mínima de 5,60 kWh m⁻²d⁻¹ que corresponde a la estación Aricota, en la zona interandina ubicado en el distrito de Quilahuani provincia de Candarave.

Tabla 13

Promedio anual total de la irradiación solar global para cada estación meteorológica

N°	Estación	Provincia	Distrito	Irradiación Solar Global [kWh m ⁻² d ⁻¹]
Zona Altoandina				
1	Chuapalca	Tarata	Tarata	6,12
2	Vilacota	Tarata	Susapaya	6,23
3	Pampa umalzo	Candarave	Candarave	5,74
4	Paucarani	Tacna	Palca	5,68
Zona Inter Andina				
5	Aricota	Candarave	Quilahuani	5,60
6	Tarata	Tarata	Tarata	6,13
7	Cairani	Candarave	Cairani	5,61

Con el software Arcgis 10.3 y los promedios anuales de la Tabla 13, se realizó el mapa de irradiación solar global para una superficie horizontal de la zona alto andina e inter andina de la región Tacna. (ver Figura 21)

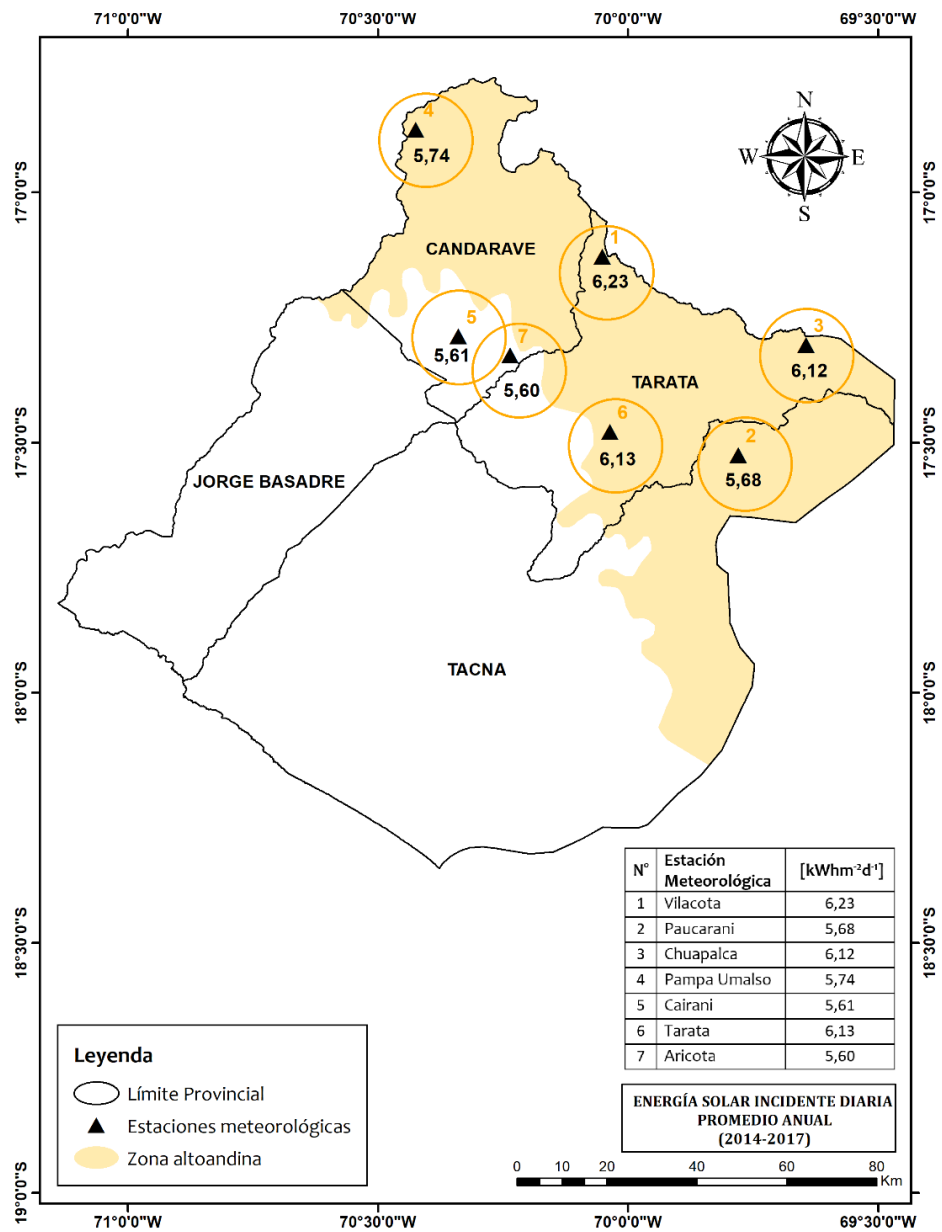


Figura 21. Mapa de irradiación solar global de la zona alto andina e inter andina de la región Tacna

4.4. Irradiancia solar global y amplitud térmica

La Figura 22, en (a), (b) y (c) muestra la relación entre la irradiación solar global y la amplitud térmica diaria, recordando que la amplitud térmica se describe como la diferencia entre la temperatura máxima y mínima ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$), para tres estaciones en diferentes zonas.

La amplitud térmica diaria para la estación Paucarani correspondiente a la zona alto andina, llega a un máximo de 30°C, en la estación Aricota ubicado en la zona inter andina llega hasta los 20°C y la estación del CERT (Centro de Energías Renovables Tacna) ubicado en la zona costa de la región, no supera los 15°C, presentando sus picos máximos durante los meses de invierno para la zona altoandina e interandina y sus mínimos durante los mismos meses en la estación del CERT.

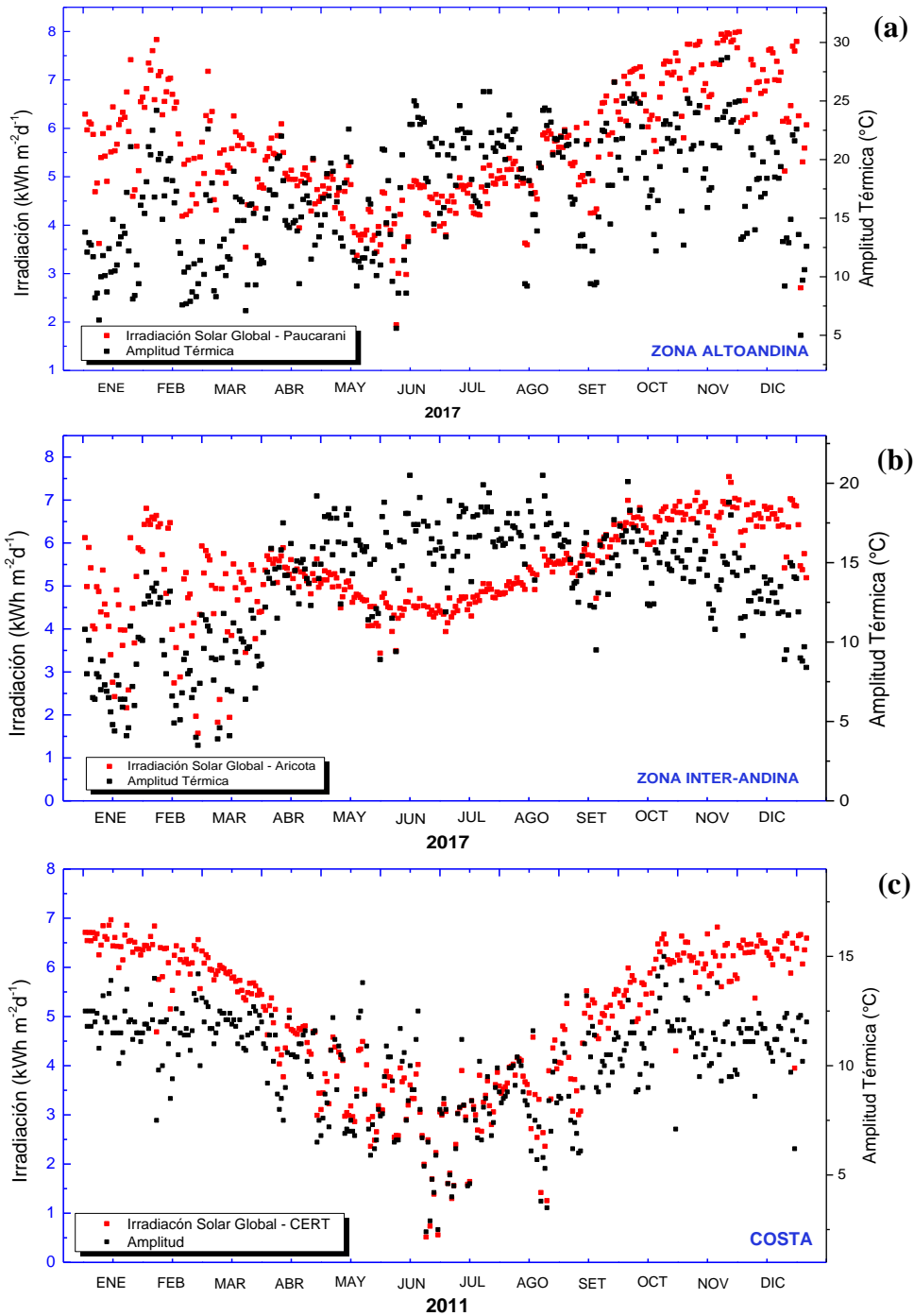


Figura 22. Relación entre la irradiación solar global y la amplitud térmica, para tres estaciones en distintas zonas (zona altoandina, inter andina y costa). (a) Estación Paucarani, (b) Estación Aricota, (c) Estación CERT.

La Figura 23, muestra el comportamiento diario de la irradiación solar global y la amplitud térmica durante el periodo 2014 al 2017, de la estación Paucarani (a), ubicado en la zona alto andina y de la estación Aricota (b), ubicado en la zona inter andina de la región Tacna.

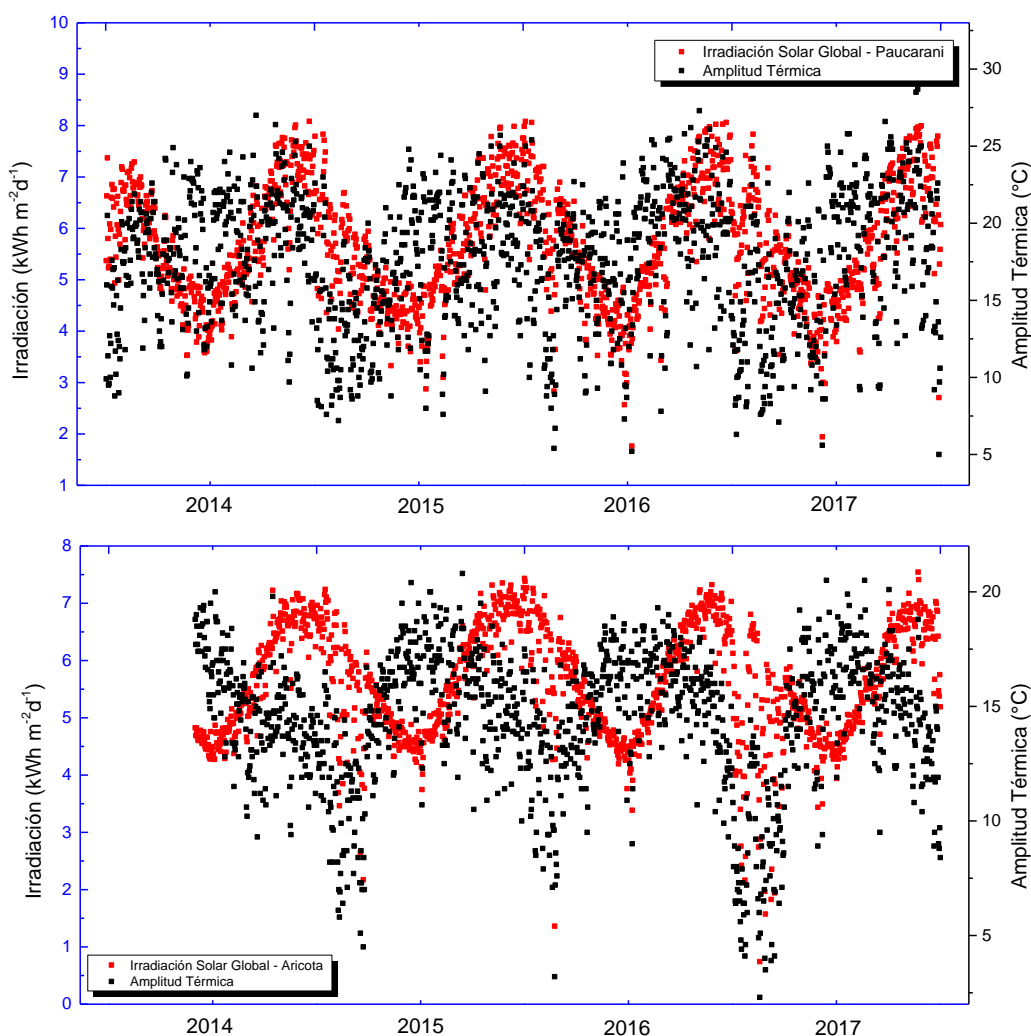


Figura 23. Relación entre la irradiación solar global y la amplitud térmica diaria durante el periodo 2014 al 2017 perteneciente a la estación (a) Paucarani (b) Aricota.

Durante el desarrollo de las ecuaciones en el software Microsoft Excel, se observó limitaciones en el cálculo de los valores de la constante (b_B), haciendo que para aquellos días no se pueda determinar la irradiación solar global con el modelo, tal como se observa en la Tabla 14. Estas limitaciones en el cálculo fueron un promedio de 15 datos por año, y se presentaron en las estaciones de la zona alto andina durante los meses de invierno.

Tabla 14
Limitación en el cálculo por el crecimiento de la amplitud térmica

ESTACIÓN		VILACOTA	ALTITUD	4390 [msnm]	LATITUD	-0,2990 [rad]	CONSTANTE B-C [ae]		0,7			
Meses	Día año	Excentricidad [e]	Declinación solar [δ]	Ángulo Horario [ωh]	Irradiación Extraterrestre [H ₀]	Temperatura Máxima [T _{max}]	Temperatura Mínima [T _{min}]	Constante B-C [b _B]	Constante B-C [c _B]	Irradiación solar Global para una superficie horizontal [H _{sh}]	Amplitud Térmica [ΔT]	
[-]	[-]	[-]	[rad]	[rad]	[MJ/m ² /día]	[°C]	[°C]	[°C ⁻¹]	[-]	[MJ m ⁻² d ⁻¹] [kWh m ⁻² d ⁻¹]	[°C]	
	152	0,9717	0,3831	1,4463	26,3141	12	-11,4	0,9930	0,4312	18,0344	5,0096	23,4
	153	0,9714	0,3855	1,4454	26,2400	13	-13	4,4861	0,2440	18,3671	5,1020	26,0
	154	0,9711	0,3878	1,4446	26,1691	12,5	-14	6,8467	0,2080	18,3183	5,0884	26,5
	155	0,9709	0,3900	1,4438	26,1014	13	-13,7	8,2795	0,1936	18,2710	5,0753	26,7
	156	0,9706	0,3921	1,4430	26,0370	12	-11,4	0,9930	0,4312	17,8445	4,9568	23,4
	157	0,9703	0,3940	1,4423	25,9759	13	-13,7	8,2795	0,1936	18,1832	5,0509	26,7
	158	0,9701	0,3959	1,4416	25,9182	14	-13	11,3259	0,1720	18,1428	5,0397	27,0
	159	0,9698	0,3976	1,4410	25,8639	13	-14	11,3259	0,1720	18,1047	5,0291	27,0
	160	0,9696	0,3992	1,4404	25,8130	14	-16	#¡NUM!	-0,0440	#¡NUM!	#¡NUM!	30,0
Junio	161	0,9694	0,4007	1,4399	25,7655	13	-15	47,6277	0,1000	18,0358	5,0100	28,0
	162	0,9691	0,4021	1,4394	25,7215	10,2	-14,9	2,4042	0,3088	17,9781	4,9939	25,1
	163	0,9689	0,4033	1,4389	25,6809	11	-15	4,4861	0,2440	17,9758	4,9933	26,0
	164	0,9687	0,4045	1,4385	25,6439	10,2	-15,2	2,9132	0,2872	17,9395	4,9832	25,4
	165	0,9685	0,4055	1,4381	25,6104	13	-15,2	71,8950	0,0856	17,9273	4,9798	28,2
	166	0,9684	0,4064	1,4378	25,5804	15	-13,7	305,0366	0,0496	17,9063	4,9740	28,7
	167	0,9682	0,4072	1,4375	25,5540	12,5	-11,3	1,1925	0,4024	17,6376	4,8993	23,8
	168	0,9680	0,4079	1,4372	25,5311	11,4	-12,5	1,2509	0,3952	17,6490	4,9025	23,9
	169	0,9679	0,4084	1,4370	25,5119	14	-14	47,6277	0,1000	17,8583	4,9606	28,0
	170	0,9677	0,4088	1,4369	25,4962	11,4	-12	0,9930	0,4312	17,4738	4,8538	23,4

La Figura 24. muestra el comportamiento de las constantes empíricas (b_B) y (c_B), con respecto a la amplitud térmica (ΔT), se observa que a medida que la amplitud térmica crece, los valores de la constante (c_B) se hacen más pequeños, todo lo contrario sucede con los valores de la constante (b_B) que toman valores más grandes; y a partir de $\Delta T \geq 29,4^\circ\text{C}$ los valores de b_B no estarían definidos.

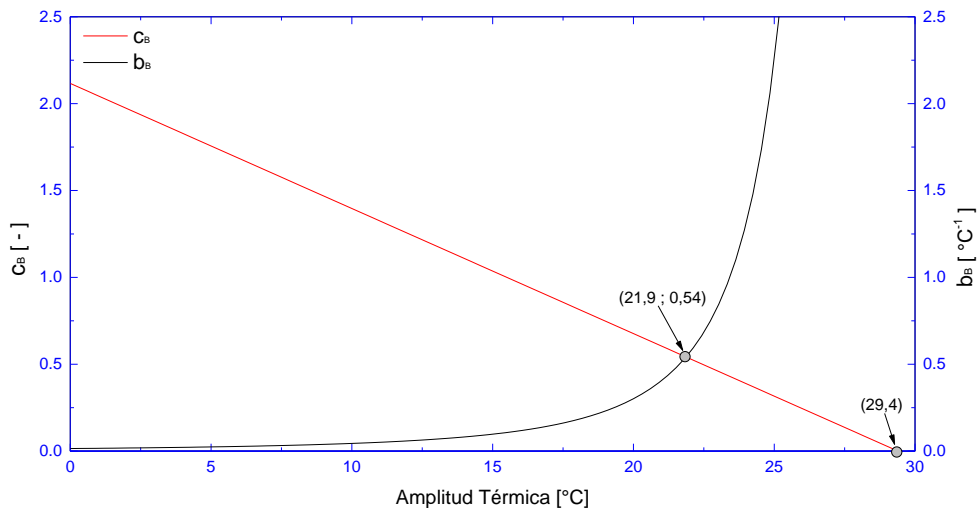


Figura 24. Gráfica de las ecuaciones de las constantes empíricas (b_B) y (c_B).

4.5. Comparación entre datos estimados y medidos de la irradiación solar global

Con los registros de irradiación solar global del Centro de Energías Renovables de Tacna (CERT) ubicado en la zona costa de la región a una altitud de 560 m.s.n.m., se realizó una comparación del comportamiento entre datos medidos y estimados.

La Figura 25, muestra el comportamiento entre los datos estimados con temperaturas máxima y mínima y datos medidos del CERT de la irradiación solar global diaria, durante el año 2011 en la ciudad de Tacna.

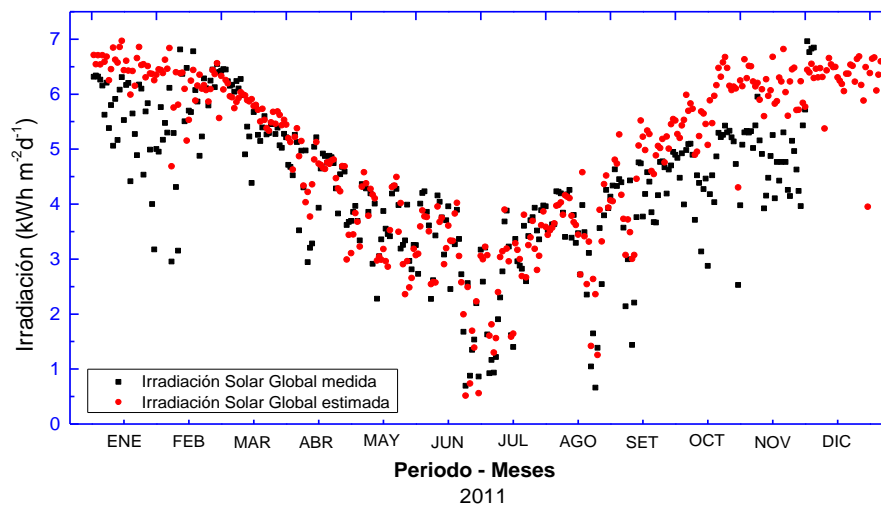


Figura 25. Irradiación solar global diaria estimada y medida en la ciudad de Tacna, correspondiente al año 2011.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

- La Figura 20, describe el típico comportamiento promedio mensual de la irradiación solar global esto es producto del fenómeno de afelio y perihelio, es decir la distancia Tierra sol, en consecuencia, durante la estación de invierno y otoño (junio-septiembre); existirá un decaimiento de la energía solar, mientras que, durante el verano y primavera (diciembre-marzo) habrá un crecimiento, esto en nuestro hemisferio.
- En la Figura 22. Se observa que el comportamiento de la amplitud térmica diaria es diferente para cada zona, mientras que en la zona alto andina, estación Paucarani llega a valores máximos de hasta 30°C, en la zona inter andina, estación Aricota llega hasta los 20°C y en la estación del CERT parte costa de la región no supera los 15°C, además durante los meses de invierno la amplitud térmica en la zona alto andina e inter andina llega a sus valores máximos mientras que en la zona costa llega a valores mínimos. Esto se debe principalmente al tipo de clima de cada zona y, además que a medida que crece la altitud habrá un decaimiento de la temperatura mínima, tal como se presentan en la zona altoandina de Tacna, por consecuencia a mayor altitud mayor será la amplitud térmica. Asimismo, gráficamente no se observa una relación directa entre la amplitud térmica y la irradiación solar global.

- Al graficar las ecuaciones de las constantes empírica (b_B) y (c_B) (ver Figura 24.), confirmamos lo visto en la Tabla 14. se observa que la ecuación de (b_B), admite un valor máximo de la amplitud térmica de 29,4°C, cuando la amplitud térmica supera este límite, los valores de (b_B) no estarían definidos, por lo tanto no se podrá determinar valores de irradiación solar global para esos días.

Esta limitación en el cálculo, se ha presentado en las estaciones de la zona alto andina debido a sus altos valores de la amplitud térmica que superan el límite permitido por la ecuación (b_B), afectando un promedio de 15 datos diarios por año durante los meses de invierno, no obstante la zona interandina no presenta estas limitaciones.

Como una solución para esta limitación, es la calibración de las ecuaciones de las constantes empíricas (b_B) y (c_B), de tal manera que permita ampliar el rango de la amplitud térmica, sobre todo para la aplicación en la zona alto andina donde la amplitud térmica diaria llega a valores máximos de hasta 34°C en los meses de invierno, tal como se hizo en el estudio realizado por Gavilán (2010), donde también encontró esta limitación en el cálculo, pero en su caso fue contrario al nuestro, su zona de estudio presentaba valores menores a 12°C de amplitud térmica, como solución calibraron las ecuaciones de las constantes con datos medidos por instrumentación, ampliando el rango de la amplitud térmica y así estimar valores de irradiación solar global en esos días donde la

amplitud térmica era mínima. Recordar que estas ecuaciones están limitadas a la zona geográfica de aplicación, es decir las ecuaciones de las constantes empíricas realizadas por Baigorria et.al (2003) para el atlas solar del Perú, no son las mismas que las de otros países, una solución planteada es calibrar las ecuaciones que se tienen por regiones geográficas (costa, sierra y selva), ya que actualmente se usa las mismas ecuaciones de las constantes empíricas para estas tres zonas.

- En la Tabla 13. los valores anuales, promedios de los cuatro años de estudio de irradiación solar global para una superficie horizontal, se encuentran dentro del rango determinado en el atlas solar del Perú (Senamhi, 2003) para la región sierra de 5,5 - 6,5 $kWh\ m^{-2}d^{-1}$, confirmando que la zona alto andina e inter andina de la región Tacna tienen alto potencial solar, siendo el distrito de Susapaya, provincia de Tarata el que presenta el mayor índice de energía solar promedio anual de 6,23 $kWh\ m^{-2}d^{-1}$ y el distrito de Aricota, provincia de Candarave con el mínimo de 5,61 $kWh\ m^{-2}d^{-1}$.

Además, según el atlas solar global, publicado por el Banco mundial (2017), (ver Anexo Figura 34), la zona sierra de Tacna tiene un rango aproximado de 5,8 – 6,6 $kWh\ m^{-2}d^{-1}$ y los datos estimados por el modelo en este estudio se encuentran dentro del rango, confirmando la solidez del modelo, a pesar de las limitaciones por las ecuaciones de las constantes empíricas.

Los promedios anuales de irradiación solar global superan los $5,5 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$, tanto para la zona alto andina e inter andina de la región Tacna; lo que representa alta rentabilidad para las aplicaciones solares según la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía).

- La constante empírica (a_B) es muy relevante a la hora de aplicar el modelo, ya que representa la máxima transmisividad atmosférica, es decir a mayor sea el valor de la constante (a_B) mayor será la irradiación solar global, con respecto a este proyecto se tomó los valores determinados por el atlas solar del Perú (ver Tabla 4), considerando el clima de la zona, y la altitud, que son parámetros limitantes para la constante a_B , sin embargo lo más recomendable es la calibración de la constante con datos de instrumentación.

CONCLUSIONES

- El modelo Bristow-Campbell permite determinar la irradiación solar global diaria para un plano horizontal en la zona inter andina y la media o promedio mensual diaria de la zona alto andina de la región Tacna, obteniendo así una base de datos, usando registros de temperaturas máxima y mínima del lugar.
- La zona alto andina e inter andina presenta valores anuales de irradiación solar global superiores a los $5,5 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$, por lo tanto, es viable y rentable las aplicaciones solares en estas zonas, con tecnologías adecuadas para regiones frías. Confirmando que la zona sierra de Tacna tienen alto potencial solar, siendo la estación Vilacota, ubicado en el distrito de Susapaya, provincia de Tarata el que presenta el mayor índice de energía solar promedio anual de $6,23 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y la estación Aricota ubicado en el distrito de Quilahuani, provincia de Candarave con el mínimo de $5,61 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$, con estos datos se elaboró un mapa de irradiación solar global en función a las estaciones meteorológicas consideradas en el proyecto, esta información servirá como herramienta para futuras aplicaciones solares.

Los valores determinados de irradiación solar global para un plano horizontal en la zona de estudio mediante el modelo Bristow-Campbell se encuentran

dentro del rango determinado por el Senamhi en el atlas solar del Perú y el mapa solar global del banco mundial.

- Según los resultados obtenidos con el modelo Bristow-Campbell, los mayores índices de irradiación solar global se encuentran en la provincia de Tarata y los menores en la provincia de Candarave.
- A partir de la comparación de los datos estimados por el modelo Bristow-Campbell y los datos registrados del CERT en cuanto a la irradiación solar global, se puede concluir que los valores obtenidos por el modelo aplicado concuerdan con los obtenidos a través de las mediciones realizadas en el CERT.
- La ecuación de (b_B) , admite un valor máximo de la amplitud térmica de $29,4^{\circ}\text{C}$, cuando la amplitud térmica supera este límite, los valores de (b_B) no estarían definidos, por lo tanto no se podrá determinar valores de irradiación solar global para esos días.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar la red de estaciones meteorológicas e instrumentación piranométrica, el cual nos permitirá la mejora y la validación de los modelos empíricos de recursos solares.
- Se recomienda la calibración de las ecuaciones empíricas (b_B) y (c_B), para cada región geográfica (costa, sierra y selva), ya que el comportamiento de la amplitud térmica es distinto para estas tres regiones y el modelo Bristow-Campbell depende de esta variable.
- Para futuras aplicaciones del modelo Bristow-Campbell en zona altas, tomar en consideración los valores de la amplitud térmica, ya que según las ecuaciones de las constantes empíricas (b_B) y (c_B), la amplitud térmica máxima de entrada es de 29,4°C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aburto, C. (2007). *Elaboración de un modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global mensual para Chile central*. (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Angstrom, A. (1940). *Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50(210), 121-126. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50(210), 121-126.
- Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos, J. F., & Quiroz, R. (2004). *Atmospheric transmissivity: distribution and empirical estimation around the central Andes*. International Journal of Climatology, 24(9), 1121-1136.
- Banco Mundial. (2017). *Global Solar Atlas*. Solar gis. Portal web: <https://globalsolaratlas.info>
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). *On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature*. Agricultural and forest meteorology, 31(2), 159-166.
- Camayo, B. F., Pomachagua, J. E., Massipe, J. R., Quispe, M. O., & Torres-Ten, A. (2017). *Validación y aplicación del modelo Bristow Campbell para estimar*

- la radiación solar global de la región de Junín*. Tecnología Química, 37(3), 574-590.
- Castillo, H. y Santibáñez, F. (1981). *Evaluación de la radiación solar global y luminosa en Chile: Calibración de fórmulas para estimar radiación solar global diaria*. Agricultura Técnica. 41, 145-152 p.
- Censolar, (2013). *Instalaciones de energía solar* (6ª ed.). Mairena de Aljarafe, Sevilla: Progensa.
- Centro del agua para la Agricultura. (2014). *Estación meteorológica automática*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción. Recuperado de: <https://cutt.ly/ZegF3LO>
- Cervantes, R., Arteaga, R., Vázquez, M. A., & Ojeda, W. (2016). *Red neuronal artificial backpropagation versus modelos empíricos para estimación de radiación global diaria en Sinaloa, México*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 7(5). Editorial Ausonia.
- Cooper, P. I. (1969). *The absorption of solar radiation in solar stills*, Solar Energy, 12, 3, 333-346.
- Duffie, J. a., & Beckman, W. a. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes. Journal of Solar Energy Engineering* (4ª ed.). University of Wisconsin-Madison, New Jersey.
- Fuess, R. (1992). *Termómetros de uso en Meteorología-Climatología-Hidrología*, Berlín, Alemania.

- Gavilán, P. (2010) *Modelos de estimación de la radiación solar diaria a partir de medidas de la temperatura*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Córdoba, España.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). *Estimating potential evapotranspiration*. Journal of the irrigation and Drainage Division, 108(3), 225-230.
- Hassan, M. A., Khalil, A., Kaseb, S., & Kassem, M. A. (2017). *Independent models for estimation of daily global solar radiation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Horn, M. (2006). *El estado actual del uso de la energía solar en el Perú: situación y perspectivas de la energía solar en el Perú*. Perú Económico, 29(11).
- Iagua. (2017). *Sabes que es una estación hidrométrica*. Valencia, España. Recuperado de: <https://www.iagua.es/noticias/mexico/conagua/17/07/07/sabes-que-es-estacion-hidrometrica>
- Idesep. (2002) *Mapa Climático del Perú*. Ministerio del ambiente, portal web: <http://idesep.senamhi.gob.pe/>
- Inei. (2018). *Crecimiento y distribución de la población, 2017*. Lima, Perú.
- Ingemmet. (2016). *Zonas críticas por peligros geológicos en la región Tacna*. Lima, Perú. Recuperado de: <https://www.ingemmet.gob.pe/zonas-criticas-por-peligro-geologico>.

- Instituto Meteorológico Nacional. (s,f). *Estaciones meteorológicas e instrumentos de más uso en Costa Rica*. Recuperado de: <https://n9.cl/1vhp>
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto, New York: Academic Press.
- Liou, K. (1980). *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press New York, 404, 1261-1273.
- Lorenzo, E., & Araujo, G. L. (1994). *Electricidad solar: Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos* (1ª ed.). Madrid: Instituto de Energía Solar.
- Meza, F., & Varas, E. (2000). *Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(2-3), 231-241.
- Perrin de Brichambaut, C. (1975). *Estimation des ressources énergétiques solaires en France*. Edition Européennes Thermique et Industrie, Paris.
- Pisco, G. R., García, J. F., Rengifo, J. A. D., & Riberos, M. A. P. (2018). *Software de simulación para la radiación solar (SSRS) en la Amazonía peruana* (Iquitos, Nauta, Tamshiyacu). *Conocimiento Amazónico*, 7(1), 61-72
- Polo, C. (2013). *Potencial energético solar y su impacto ambiental en la Región Tacna*. (tesis de maestría). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.
- Pulgar, J. (1967). *Geografía del Perú: Las ocho regiones naturales*. Lima: Ausonia.

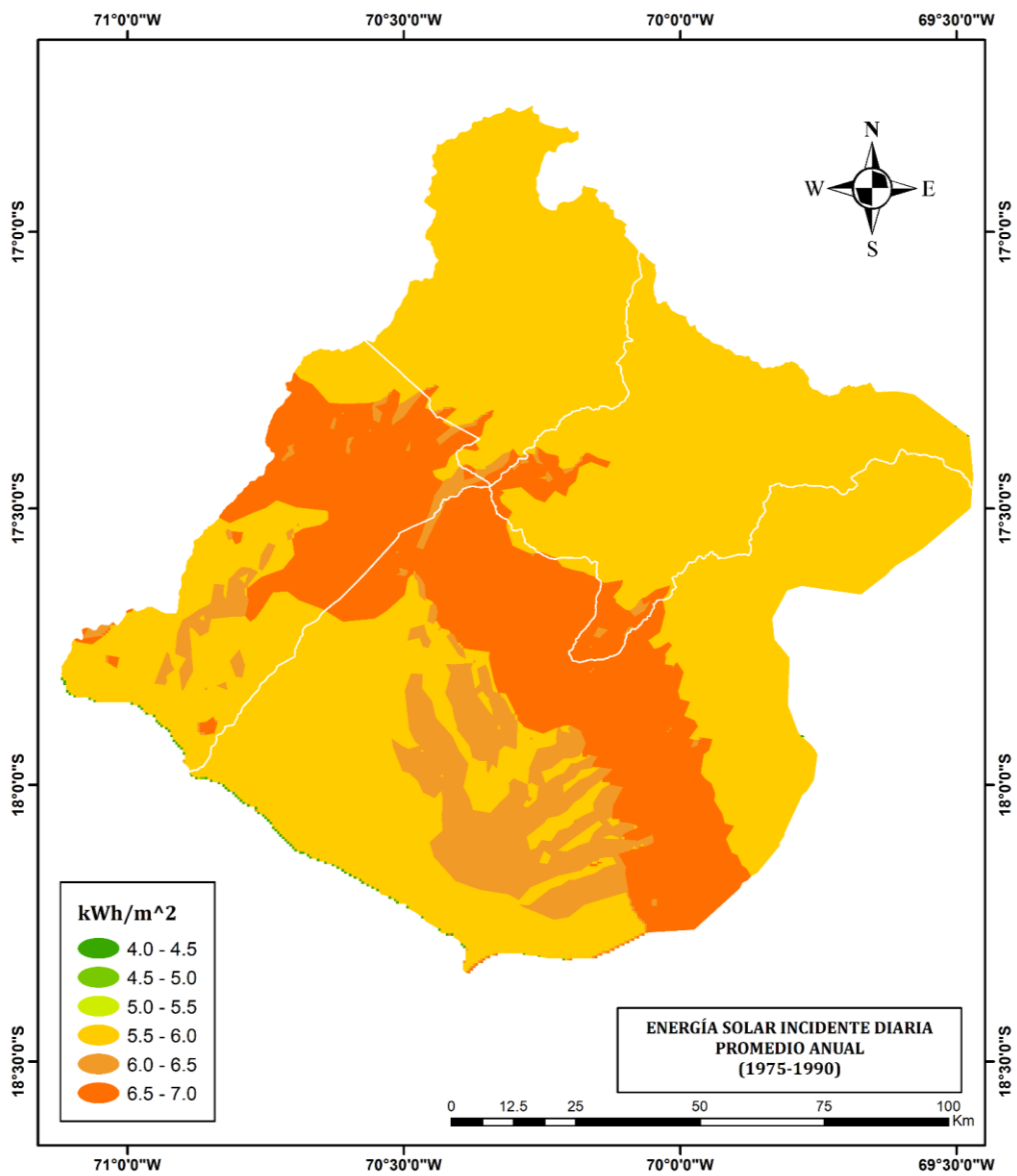
- Quispe, L. (2018). *Determinación y análisis espacio temporal de la radiación solar global en el altiplano de Puno*. (tesis de maestría). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Raichijk, C., Grossi Gallegos, H., y Righini, R. (2005). *Evaluación de un método alternativo para la estimación de valores medios mensuales de irradiación global en Argentina*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, 11-05.
- RISOL 1999. *Terminología, definiciones y simbología. Energías renovables y medio ambiente*. Vol. 8. Junio del 2 000. Pp. 29-30.
- SARMIENTO, P. (1995). *Energía solar: Aplicaciones e ingeniería*. Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso, Chile.
- Senamhi (s.f.a). *Guía climática turística*. Lima, Perú. Recuperado de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-20.pdf>
- Senamhi (s.f.b). *Taller Regional sobre Metrología y Retos Tecnológicos de las Ciencias del Clima y la Energía Renovable*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. Recuperado de: <https://bit.ly/37i1mNL>
- Senamhi, (2003). *Atlas de energía solar del Perú*. Lima-Perú: Proyecto PER98/G31-MINEM
- Sharifi, S. S., Rezaverdinejad, V., & Nourani, V. (2016). *Estimation of daily global solar radiation using wavelet regression, ANN, GEP and empirical models:*

A comparative study of selected temperature-based approaches. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 149, 131-145.

Sifuentes, L. (s.f). *Las regiones geográficas de Perú.* Recuperado de:
<https://cutt.ly/FegGoj7>

Tripathy, R., Chaudhari, K. N., & Patel, N. K. (2008). *Evaluation of different methods to estimate incoming solar radiation.* Journal of Agrometeorology, 10, 174.

ANEXO



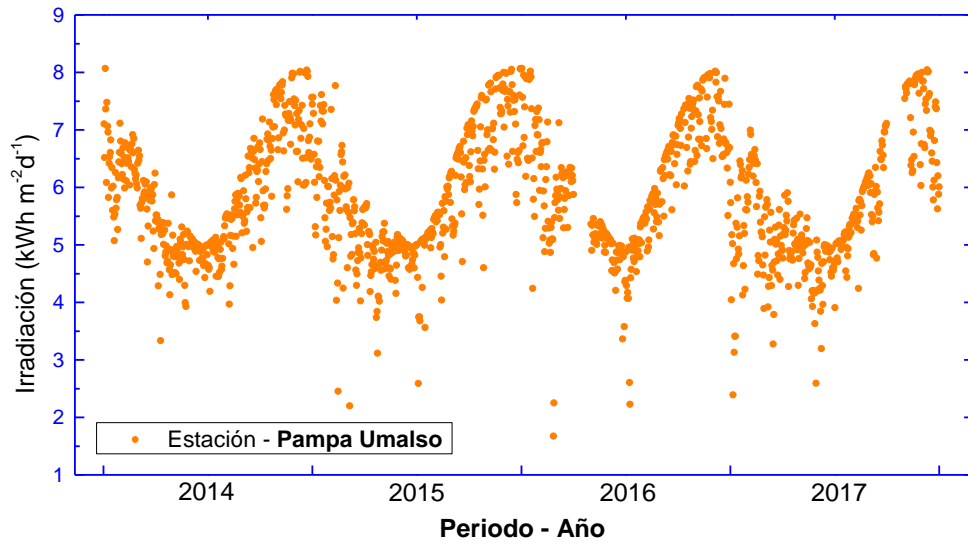


Figura 27. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Pampa Umalso.

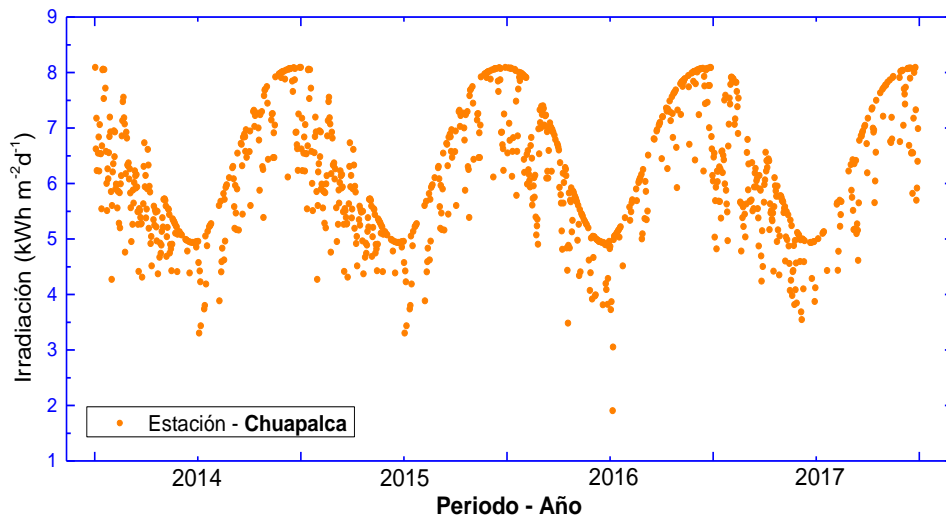


Figura 28. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Chuapalca.

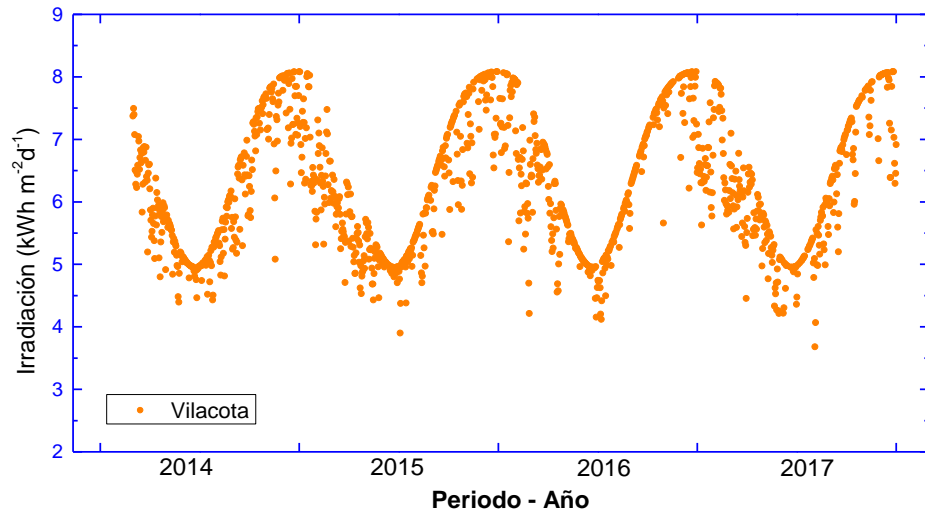


Figura 29. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Vilacota.

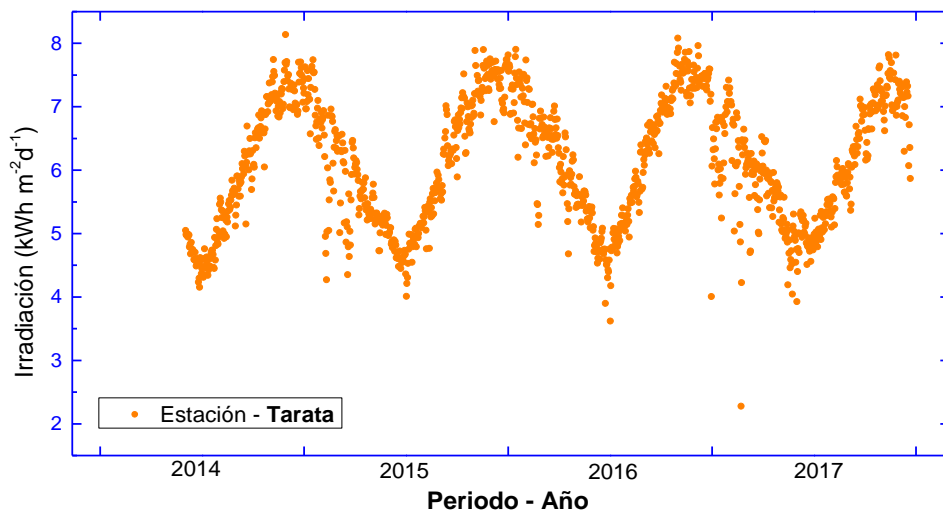


Figura 30. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Tarata.

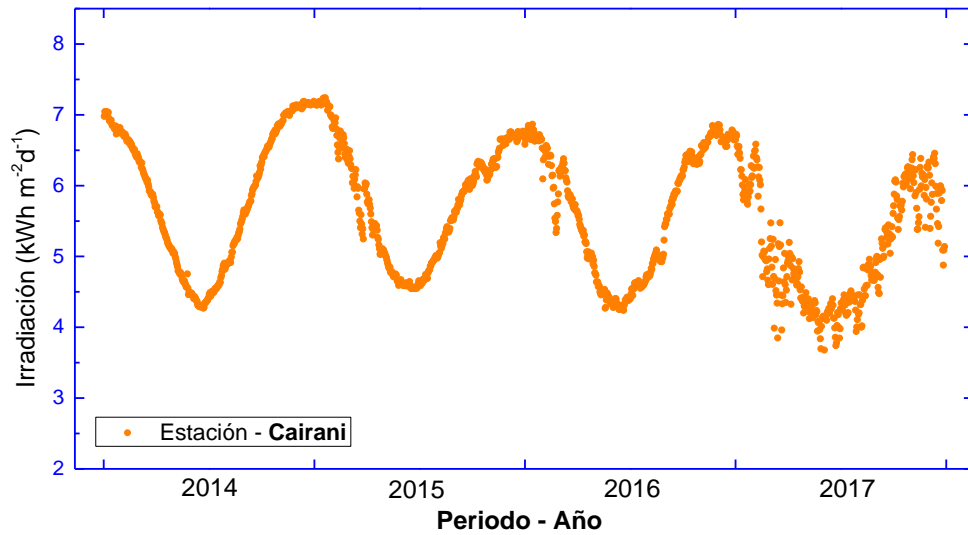


Figura 31. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Cairani.

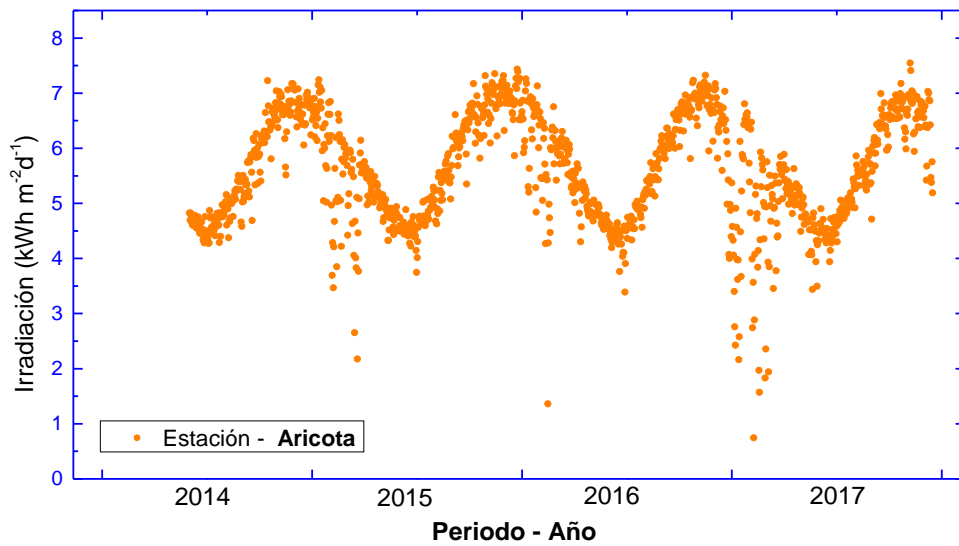


Figura 32. Irradiación solar global diaria del periodo 2014 al 2017 de la estación Aricota.

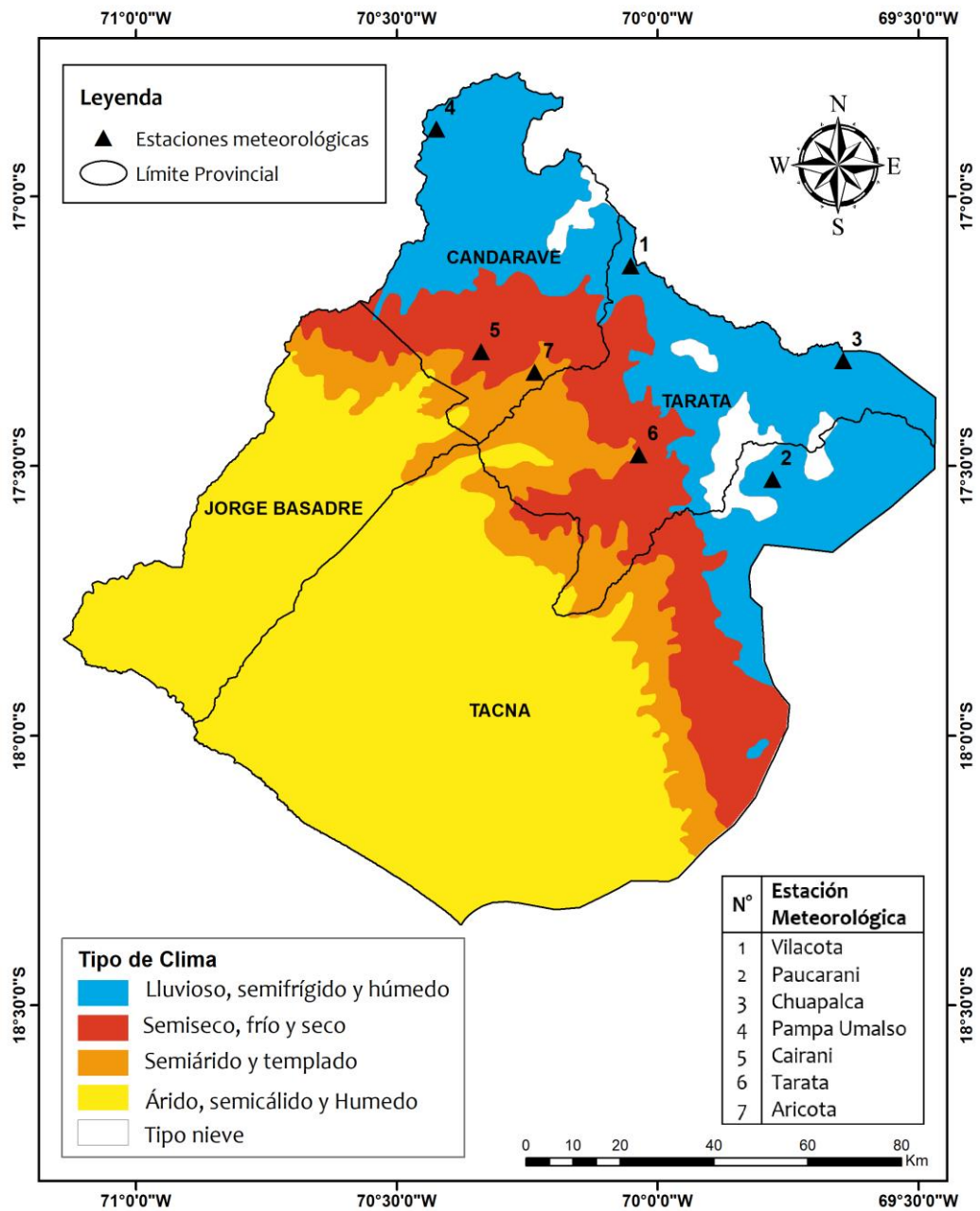


Figura 33. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas de estudio en el mapa climático.

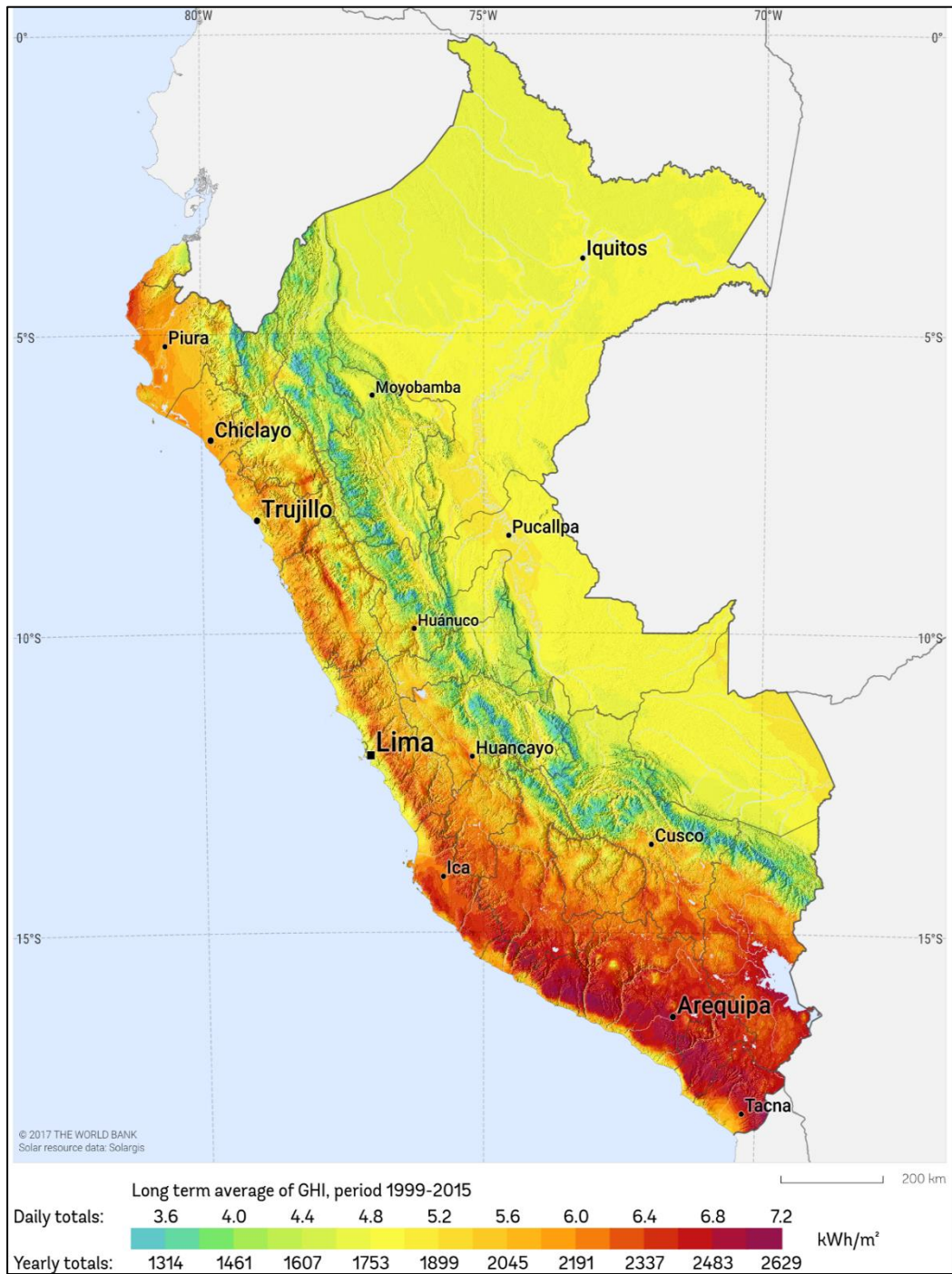


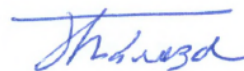
Figura 34. Mapa de la irradiación solar global del Perú, Banco mundial, (2017)

Tabla 15
Operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	instrumentos
<p>Variable independiente:</p> <p>Temperatura máxima y mínima ambiental</p>	<p>Son las temperaturas del aire máxima y mínima alcanzados durante el día, medidas entre 1,25 a 2 m por encima del suelo. (sus unidades son °C)</p>	<p>Para medir los valores de temperatura máx y mín, se usan termómetros de máxima y mínima que están en cada estación meteorológica convencional, la medición es generalmente en un día.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Amplitud térmica • Valores medios de temperaturas máxima y mínimas diarias 	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetros de máxima y mínima.
<p>Variable dependiente:</p> <p>Irradiación solar global</p>	<p>Es la cantidad total de energía radiante del sol que llega a una superficie determinada y es la suma de la irradiación solar directa, difusa y reflejada. (sus unidades son J/m² o kWh/m²)</p>	<p>La irradiación solar global es una magnitud física que se puede medir directamente con un solarímetro o piranómetro. En nuestro caso va a ser calculada a partir de la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas ambientales, aplicando el modelo Bristow-Campbell.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Irradiación solar global extraterrestre • Constantes empíricas. • Latitud • Amplitud térmica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Piranómetro • Modelo empírico de estimación de Bristow-Campbell



MSc. Hugo Alfredo Torres Muro
Asesor



MSc. Jhony Chávez Delgado
Co - asesor



Bach. Lilian Katerin Caceres Masco
Tesista