

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**Tesis**

**Estimación de la radiación solar global mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow – Campbell en la región Pasco**

Para optar el grado académico de maestro en:

**Gestión del sistema ambiental**

**Autor:** Ing. Claudio Paulino LIMAYMANTA SULCA

**Asesor:** Mg. Luis Alberto PACHECO PEÑA

**Cerro de Pasco – Perú – 2019**

**UNIVERSIDAD NACIONAL “DANIEL ALCIDES CARRIÓN”**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**TESIS**

**Estimación de la radiación solar global, mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow – Campbell en la región Pasco**

**Sustentado y aprobado ante los miembros del jurado:**

---

Mg. Rubén Edgar PALOMINO ISIDRO  
**PRESIDENTE**

---

Mg. Ramiro SIUCE BONIFACIO  
**MIEMBRO**

---

Mg. Eusebio ROQUE HUAMAN  
**MIEMBRO**

**DEDICATORIA:**

Al ser divino Dios, a mis padres, a mis hermanos e hijos por enseñarme que, con amor, sacrificio y perseverancia, todo desafío puede ser vencido.

**Claudio Paulino.**

## **RECONOCIMIENTO**

- A la Universidad Nacional “Daniel Alcides Carrión”, por acogerme en sus aulas y lograr los conocimientos adquiridos para mi formación profesional.
- A los Maestros y Doctores, por su valioso aporte en el logro de mis objetivos y apoyo incondicional para lograr la sustentación de tesis.
- A los catedráticos de la Universidad Nacional “Daniel Alcides Carrión”, por su paciencia y sabios consejos, como también el ánimo que me brindaron durante mi estadía en la Universidad compartiendo agradables momentos en el diario aprender.
- Agradecimiento especial a mis compañeros de clase y amigos de la maestría, por su amistad y fortaleza moral y ansias de seguir adelante para el logro de mis metas.

## RESUMEN

El trabajo de investigación, permitió desarrollar un programa en Excel que estime la radiación solar anual, mensual y diario sobre la superficie horizontal terrestre en la Región Pasco; para ello se tomaron en cuenta 4 zonas de la región como son Chaupimarca, Yanahuanca, Pozuzo y Huancabamba lugares que no disponen con esta información, los datos de temperaturas máximas y mínimas se tomaron del SENAMHI que se encuentra en la ciudad de Huancayo; estos datos se adaptaron al modelo Bristow - Campbell (1984) para estimar la radiación solar global media mensual, con el uso de la hoja de cálculo Excel. Para comprobar el funcionamiento del modelo Bristow - Campbell, se realizó la técnica del modelaje propuesto por Espinoza (2010) y las ecuaciones planteadas en el Atlas solar del Perú. El modelo Bristow - Campbell fue validado con datos registrados en las estaciones ya mencionadas pertenecientes a Sierra y Selva. La radiación solar global media mensual obtenida como resultado en la Región Pasco fue de 4.74 kWh/m<sup>2</sup>/día, correspondiendo a sierra 4,89 kWh/m<sup>2</sup>/día y selva 4,59 kWh/m<sup>2</sup>/día. El funcionamiento del modelo es muy simple y puede ser manipulado fácilmente por cualquier persona. Se llega a la conclusión que el modelo Bristow - Campbell es funcional, adaptable y aplicable a cualquier lugar del territorio peruano y de gran utilidad para obtener resultados de la radiación solar en la Región Pasco.

**Palabras claves:** Radiación solar, temperaturas máximas y mínimas, modelo Bristow - Campbell.

## ABSTRACT

The research work allowed to develop a program in Excel that estimates the annual, monthly and daily solar radiation on the horizontal surface of the Earth in the Pasco Region; for this, 4 areas of the region were taken into account, such as Chaupimarca, Yanahuanca, Pozuzo and Huancabamba, places that do not have this information, the maximum and minimum temperature data were taken from the SENAMHI located in the city of Huancayo; these data were adapted to the Bristow - Campbell model (1984) to estimate the average monthly global solar radiation, with the use of the Excel spreadsheet. To verify the functioning of the Bristow - Campbell model, the modeling technique proposed by Espinoza (2010) and the equations proposed in the Atlas solar del Perú were carried out. The Bristow - Campbell model was validated with data recorded in the aforementioned stations belonging to Sierra and Selva. The average monthly global solar radiation obtained as a result in the Pasco Region was 4.74 kWh / m<sup>2</sup> / day, corresponding to sierra 4.89 kWh / m<sup>2</sup> / day and forest 4.59 kWh / m<sup>2</sup> / day. The operation of the model is very simple and can be easily manipulated by anyone. It is concluded that the Bristow - Campbell model is workable, adaptable and applicable to any part of the Peruvian territory and very useful to obtain results of solar radiation in the Pasco Region.

**Keywords:** Solar radiation, maximum and minimum temperatures, model Bristow - Campbell.

## INTRODUCCIÓN

En la tierra, la energía solar es aprovechada por toda la humanidad, pero ésta energía, está condicionada por la intensidad de radiación solar que cae en determinadas áreas, para lo cual es necesario contar con datos de temperaturas máximas, mínimas y registros de radiación solar que sean confiables y sirvan para modelar y diseñar equipos que aprovechen la energía solar. (Castro M., 2006, p. 23).

La radiación solar es muy importante para la investigación de las variables agroclimáticas, porque constituye un ingreso significativo de energía en los sistemas físicos y biológicos, también condiciona los factores o variables climáticas la cual genera influencia en la dinámica de los ecosistemas naturales (Espinoza R., 2012, p. 35)

La radiación solar es una energía alternativa, que es contemplada para solucionar el problema de la disponibilidad energética que sufre la mayoría de los países de forma permanente, la cual se ha ido acentuando con mayor énfasis en el mundo debido a la creciente demanda de energía (Horn, 2006, p. 45).

La poca información de la radiación solar, ha generado que los investigadores desarrollen modelos físicos estadísticos que estimen la radiación solar global, considerando el uso de los factores físicos, como la temperatura de la tierra, atmósfera y factores meteorológicos como las temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones fluviales, horas de insolación, nubosidad, altitudes, latitudes, etc. (Meizoso Lopez, M. 2012, p. 56)

Las investigaciones realizadas en el Perú, consideran que por su ubicación geográfica contiene un potencial muy alto de energía solar, una de las más altas a nivel mundial donde se estima que la radiación incidente media es de 5 a 6 kWh/m<sup>2</sup>/día.

Para la generación de nuevos recursos energéticos, es posible que el gobierno diseñe políticas y medidas con el fin de incentivar el uso de energías limpias y promueva el

desarrollo de estos recursos, especialmente en zonas rurales, en la cual es indispensable cuantificar la cantidad de energía producida y su distribución en el territorio.

Para el diseño de equipos que realicen la medición de la radiación solar en una determinada localidad a partir de la energía solar, genera un gran interés para llevar a cabo estudios de investigación. Las mediciones de la radiación solar en el Perú son muy escasas en las ciencias ambientales, esto es debido al alto costo y mantenimiento del equipo requerido. También influye la variabilidad topográfica y climática del territorio peruano, en donde se requiere de estaciones bien implementadas y distribuidas a nivel nacional, para que las evaluaciones de la radiación solar sean más precisas y detalladas.

En la investigación se plantea una alternativa para estimar la radiación solar global, que es desarrollar relaciones empíricas, con modelos matemáticos que sean aplicables y tengan una correspondencia con la radiación solar global y las variables astronómicas, trigonométricas, topográficas y atmosféricas de los lugares de estudio, estos factores influyen en diferentes magnitudes la cantidad de energía que emite el sol sobre la superficie terrestre. Este cálculo de la radiación solar global, considera que existe una igualdad de climas con el lugar de origen de la fórmula empleada y el punto de aplicación, donde los datos aplicados para el cálculo sean reales. Por ello, es muy importante contar con modelos confiables para la estimación de radiación solar en lugares que no tengan estos equipos, permitiendo emplear modelos matemáticos que estimen la radiación solar con la aplicación de algunas constantes conocidas y de cálculos confiables.

En la investigación, es importante la aplicación de los modelos matemáticos para el logro del objetivo planteado que es: Estimar la radiación solar global, mediante temperaturas extremas (máximas y mínimas), aplicando el modelo Bristow – Campbell en la región Pasco.

## ÍNDICE

<b>DEDICATORÍA</b>	
<b>RECONOCIMIENTO</b>	
<b>RESUMEN</b>	
<b>ABSTRACT</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>INDICE</b>	

### **CAPÍTULO I PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

1.1.	Identificación y determinación del problema .....	1
1.2.	Delimitación de la investigación .....	3
1.3.	Formulación del problema .....	4
1.3.1.	Problema principal .....	4
1.3.2.	Problemas específicos .....	4
1.4.	Formulación de objetivos .....	4
1.4.1.	Objetivo general .....	4
1.4.2.	Objetivos específicos .....	4
1.5.	Justificación de la investigación .....	5
1.6.	Limitaciones de la investigación .....	6

### **CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO**

2.1.	Antecedentes del estudio .....	7
2.2.	Bases teóricas – científicas .....	14
2.3.	Definición de términos básicos .....	56
2.4.	Formulación de la hipótesis .....	64
2.4.1.	Hipótesis general .....	64
2.4.2.	Hipótesis específicas .....	64
2.5.	Identificación de las variables .....	64
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores .....	65

### **CAPÍTULO III METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN**

3.1.	Tipo de investigación .....	66
3.2.	Métodos de investigación .....	66
3.3.	Diseño de investigación .....	67
3.4.	Población y muestra .....	68
3.4.1.	Población .....	68
3.4.2.	Muestra .....	68
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	69
3.6.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos .....	69
3.7.	Tratamiento estadístico .....	70
3.8.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación .....	70
3.9.	Orientación ética .....	71

### **CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1.	Descripción del trabajo de campo .....	72
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de los resultados .....	75

4.3.	Prueba de Hipótesis.....	103
4.4.	Discusión de resultados.....	105
4.4.1.	Referido a las estaciones meteorológicas activas en estudio de la Región Pasco. ....	105
4.4.2.	Referido a las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones en estudio .....	106
4.4.3.	Referido a la estimación de la radiación solar global en las estaciones de estudio .....	108
4.4.4.	Referido a los resultados de las Radiaciones Solares mediante el desarrollo del modelo Bristow – Campbell para las estaciones en estudio .....	112
4.4.5.	Referido a los resultados de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticados mediante la modelización con las series temporales para cada estación de la Región Pasco. ....	113

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

### ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N°</b>		<b>Pag.</b>
1	Principales propiedades del sol	16
2	Valores de los coeficientes Angstrom Prescott	42
3	Valores de los coeficientes Bristow - Campbell	44
4	Radiación solar de los departamentos del Perú	54
5	Operacionalización de las variables	65
6	Estaciones meteorológicas activas en la región Pasco	75
7	Estadísticos descriptivos de las temperaturas máximas y mínimas reales	76
8	Temperaturas máximas y mínimas de estaciones año 2010	77
9	Temperaturas máximas y mínimas de estaciones año 2011	78
10	Temperaturas máximas y mínimas de estaciones año 2012	79
11	Temperaturas máximas y mínimas de estaciones año 2013	80
12	Temperaturas máximas y mínimas de estaciones año 2014	81
13	Radiación Solar Global media mensual de las 4 estaciones de Pasco	82
14	Radiación solar estimada de Yanahuanca 2015 – 2016	84
15	Radiación solar estimada de Chaupimarca 2015-2016	86
16	Radiación solar estimada de Pozuzo 2015 – 2016	88
17	Radiación solar estimada de Huancabamba 2015-2016	90
18	Análisis de varianza para las estaciones en estudio	103

### ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N°</b>		<b>Pag.</b>
1	Radiación solar directa y difusa	17
2	Afelio y perihelio del sol y la tierra	19
3	Solsticios y equinoccios del sol y la tierra	21
4	Declinación solar del sol al año	23

5	Posición del sol en la esfera celeste	25
6	Recorrido del sol en los hemisferios	28
7	Recorrido del sol en los equinoccios y solsticios	33
8	Instrumentos para medir la radiación solar	46
9	Piranometro Kipp y Zonen	47
10	Termómetros de máxima y mínima	48
11	Comportamiento de temperaturas máx. y mín. Estación Yanahuanca.	92
12	Comparación de temperaturas máx. y mín. Estación Yanahuanca	93
13	Comportamiento de temperaturas máx. y mín. Estación Chaupimarca	95
14	Comparación de temperaturas máx. y mín. Estación Chaupimarca	96
15	Comportamiento de temperaturas máx. y mín. Estación Huancabamba	98
16	Comparación de temperaturas máx. y mín. Estación Huancabamba	99
17	Comportamiento de temperaturas máx. y mín. Estación Pozuzo	101
18	Comparación de temperaturas máx. y mín. Estación Pozuzo	102
19	Mapa de irradiancia solar del departamento de Pasco	105

#### ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N°		Pag.
1	Temperaturas extremas medias – Chaupimarca	122
2	Temperaturas extremas medias – Yanahuanca	123
3	Temperaturas extremas medias – Pozuzo	124
4	Temperaturas extremas medias – Huancabamba	125
5	Registro temperaturas extremas diarias por estación	126

# CAPÍTULO I

## PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### **1.1. Identificación y determinación del problema**

La incidencia de radiación solar sobre la tierra, genera cambios positivos y negativos en el clima, el medio ambiente y en la salud de los entes vivientes, también facilita las condiciones de habitabilidad en el planeta. Los cambios negativos están influenciados por las radiaciones químicas generadas, como las altas emisiones de carbono que generan las grandes fábricas. También, una exposición excesiva a los rayos del sol, genera el desarrollo de enfermedades muy graves, como el cáncer de piel.

La actividad solar genera una fuerte influencia en las actividades diarias de nuestro planeta, y como el sol influye en el calentamiento global del planeta, muchos investigadores han realizado estudios utilizando datos reconstruidos de la radiación solar y temperatura del aire, con el fin de evaluar si las variaciones en la temperatura global se deben al forzamiento natural debido a la actividad solar o al forzamiento derivado de las actividades humanas.

Foukal et al. (2004), las oscilaciones en el brillo del Sol, medido directamente por radiometría en los dos últimos ciclos de manchas solares (ciclo 22 y 23), parece demasiado pequeño para generar cambios significativos en el clima. Sin embargo, en periodos mayores a los 11 años (variaciones multidecadales), afirmaron que la actividad solar genera un fuerte aporte al calentamiento del planeta. Confirmado por Yamaguchi et al. (2010), quien encontró una relación entre las variaciones del flujo de los rayos cósmicos galácticos, desarrollados por el campo magnético, con los cambios climáticos importantes sucedidos durante el mínimo de Maunder

(periodo en la cual se observaron mínimas cantidades de manchas solares, 30 mil en 30 años, cuando lo normal sería más de 40 mil, ocurrido desde 1645 hasta 1715 d. C., coincidió con el periodo más frío de la pequeña Edad de Hielo).

Foukal P. (2004), estudia la concordancia entre la temperatura global y la energía solar durante el mínimo de Maunder y también estudia el mínimo de Dalton (1795 a 1825) y afirma que aproximadamente el 50% del calentamiento global observado desde 1900 es por la contribución del Sol.

La radiación solar es una característica natural muy importante para la vida terrestre, la cual moldea el clima de la tierra y emite una influencia significativa sobre el medioambiente. Así, la existencia de la vida en la tierra estriba en forma fundamental de la radiación solar y en particular, de la cantidad de radiación ultravioleta (UV) que incide sobre los organismos vivientes. La radiación solar contribuye relativamente con mínima energía al espectro solar, al representar sólo un 8,3% del espectro solar extraterrestre (Foukal. 2004) y un 5% de la radiación que llega a la superficie de la tierra; esta radiación genera procesos importantes en la biosfera, es biológicamente muy activa y genera efectos beneficiosos, pero si se excede de ciertos límites de seguridad, resulta muy perjudicial para animales, plantas y seres humanos (Cochrane, J., Baker, CR. 1985).

En este siglo, la tierra está soportando los efectos del desarrollo industrial, que se exterioriza en el calentamiento global, que significa el incremento promedio de la temperatura de la atmósfera cercana a la superficie de la tierra y de la troposfera, el mismo que contribuye a los cambios climáticos a nivel mundial. El Calentamiento global, se refiere al calentamiento inducido por las grandes emisiones de gases de efecto invernadero, dadas por las múltiples actividades cotidianas que realiza el ser

humano en su afán de progreso, y uno de estos gases es el CO<sub>2</sub> producido por el excesivo uso de los combustibles fósiles para producir energía (Córdova, E. 2009). Por tal razón, las descendencias futuras de la vida en la tierra están en peligro y es obligación de nosotros los humanos en utilizar la ciencia y las tecnologías limpias para dar alternativas social y ambientalmente viables. Por lo que se hace muy importante el uso de las energías renovables y limpias para el desarrollo sostenible, el respeto por la naturaleza y del mundo; es por ello que se empleó en la investigación la energía solar como una fuente energética que contribuye a reducir el CO<sub>2</sub> para conseguir calidad ambiental y el desarrollo sostenible.

Para la ejecución de la investigación, se tomó en cuenta las temperaturas extremas (máximas y mínimas), que dieron un problema para la obtención de estos datos, ya que los lugares en el Perú donde se realizan mediciones de esta variable son escasos debido al alto costo de los equipos a utilizar y su respectivo mantenimiento. También, la inestabilidad del terreno y el clima de la región Pasco impidió obtener los datos con mayor facilidad y permitir obtener los datos con más detalle y precisión. Frente a esto se pudo contactar con el SENAMHI – Junín para la obtención de estas temperaturas.

## **1.2. Delimitación de la investigación**

La investigación se desarrolló en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional “Daniel Alcides Carrión”. Se trabajó con datos de temperaturas máximas y mínimas, de algunas localidades de la Región Pasco (Yanahuanca, Chaupimarca, Oxapampa y Pozuzo) y por la amplitud se desarrolló el modelo Bristow – Campbell para estimar y cuantificar la radiación solar global en base a las temperaturas extremas.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **1.3.1. Problema principal**

¿Cuál es la estimación de la radiación solar global media mensual mediante las temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow – Campbell en la región Pasco?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

- ¿Cuál es la funcionalidad adecuada del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual adaptable a la Región Pasco?
- ¿Cuál es la adaptación adecuada del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual en la Región Pasco?
- ¿Cuál es la aplicabilidad de la radiación solar global media mensual, obtenida mediante el modelo Bristow – Campbell por estaciones en la región Pasco?

### **1.4. Formulación de objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo general**

Estimar y evaluar la radiación solar global media mensual mediante las temperaturas extremas, aplicando el modelo de Bristow – Campbell en la Región Pasco.

#### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Comprobar la funcionalidad del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global media mensual adaptable a la Región Pasco.

- Demostrar la adaptación del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global media mensual en la Región Pasco.
- Aplicar el modelo matemático Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global media mensual y su aplicación en el diseño de equipos en la Región Pasco.

### **1.5. Justificación de la investigación**

La cantidad de radiación solar que recibe la superficie terrestre está condicionado a los siguientes factores: La posición del sol, la latitud, la altitud, la nubosidad, la reflexión terrestre, la cantidad de ozono en la atmosfera, etc. (Iqbal, M. 1983).

La emisión de radiación solar sobre la superficie terrestre, mantiene una variación durante el día y en todo el año; la mayor incidencia de radiación solar, cerca del 60% se dan entre las 10 de la mañana y las 2 de la tarde cuando el sol se encuentra en su máxima elevación; y cuando el ángulo del sol se aproxima al horizonte, los niveles de radiación solar son menores en la superficie de la tierra por que atraviesa una distancia más larga en la atmosfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a mayor absorción. (Iqbal, M. 1983).

La ubicación geográfica influye en la variación de incidencia de la radiación solar; con mayor intensidad en la zona ecuatorial, ya que los rayos solares inciden más directamente que en las latitudes medias. (Iqbal, M. 1983).

La altura respecto al nivel del mar en las ciudades como Junín, Puno o Cerro de Pasco, es determinante para evaluar los niveles de radiación solar que se recibe, por ser más delgada la capa atmosférica que recorren los rayos del sol y el aire más limpio. La radiación solar se incrementa de un 10% a 12 % por cada mil metros de aumento de altitud, significa que a mayor altitud existe mayor radiación solar. Las

nubes influyen en la cantidad de radiación que llega a la tierra, Las nubes densas limitan la incidencia de radiación solar, también las precipitaciones pluviales reducen la cantidad de radiación solar. La contaminación atmosférica reduce la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. La cantidad de ozono que pueda contener algún lugar de la tierra, influye en la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre; significa que a menor cantidad de ozono mayor radiación ultravioleta.

Para la ejecución de la investigación, se desarrolló un modelo matemático que estime la radiación solar global en las estaciones que se encuentran en la Región Pasco: Yanahuanca, Chaupimarca, Oxapampa (Huancabamba) y Pozuzo, lugares de sierra y selva que cuentan con bases de datos de temperaturas extremas como las mínimas y máximas diarias obtenidas del SENAMHI – Junín. Los datos de las temperaturas extremas fueron procesados por la hoja de cálculo Excel.

La estimación y evaluación del potencial de energía solar global diaria media mensual y su aplicabilidad en el desarrollo de la energía solar térmica, fotovoltaica y programas sostenibles, permitió proponer aplicaciones reales y competitivas en la Región Pasco y en el país.

#### **1.6. Limitaciones de la investigación**

Se tuvieron limitantes para la obtención de datos de temperaturas máximas y mínimas para determinar la radiación solar global, que fue la falta de equipo de piranometría, ya que en el Perú existen pocas ciudades que cuentan con este equipo, por lo que no se puede presentar informaciones confiables de datos de radiación solar en las estaciones meteorológicas de la Región Pasco, los datos presentados en la investigación fueron obtenidos del SENAMHI – Huancayo.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes del estudio

Se tomaron antecedentes de trabajos de investigación realizados a nivel nacional e internacional por diferentes investigadores, las cuales son:

**Aburto, Cecilia (2007)**, estudio sobre la **elaboración de un modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global mensual para Chile central**; con la finalidad de resguardar las herramientas que son capaces de evaluar la conducta anual de la radiación solar sobre la superficie terrestre en lugares que no disponen con la información confiable y detallada, se desarrolló un modelo matemático de estimación o evaluación de la repartición en el espacio de la radiación solar global media mensual para Chile central, teniendo para ello la zona continental de la IV Región de Coquimbo hasta la IX Región de la Araucanía. El objetivo principal fue la de cambiar el modelo PINSOL (United States Department of Agriculture, 2003), implantando los efectos que realizan el estado de la atmósfera y la topografía en la disposición de la radiación solar global, sobre la base de controles realizadas en las estaciones de observación que corresponden a los diferentes lugares de estudio que pertenecen a la zona de estudio.

**Almorox, (2011)**. Realizo investigaciones en donde **evaluó quince modelos empíricos de radiación mundial**, considerando las variables meteorológicas que generaron, calcularon y validaron, obteniendo la conclusión que el modelo 1 (Hargreaves y Samani) es de fácil manejo y puede evaluar la radiación solar global con alta precisión. Es recomendable evaluar la radiación global diaria en momentos que la radiación solar y las horas de sol no están disponibles, cuando sólo se dispone

de datos de temperatura y cuando los coeficientes del modelo no pueden determinarse directamente a partir de datos disponibles (o extrapolación). Modelo 3 (Bristow y Campbell), modelo basado en las temperaturas extremas que estima la radiación global con relativa precisión, las ecuaciones son más complejas y puede ser utilizado cuando existe coeficiente calibrado que se calculan con datos registrados.

**Ayllon C. Vanessa (2012)**, estudio sobre la, “**Comparación de métodos de estimación de la radiación solar en Maracay, Venezuela**”, empleando métodos empíricos para evaluarla y que manipulen variables de fácil obtención, aprovechables en todas las estaciones. Manipulando datos cotidianos o diarios de la Estación Meteorológica del CENIAP - Maracay, serial 2604, que se encuentran en la red agrometeorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, estado Aragua, Venezuela; se realizó una investigación comparativa con cinco métodos de estimación: Angstrom - Prescott (1940); Glover y Mc Culloch (1958); Bristow y Campbell (1984); Hargreaves et al. (1985); De Jong y Stewart (1993), tuvo la intención de comprobar el método que mejor estime la radiación solar global en los lugares de estudio. Se realizaron las comparaciones aplicando la prueba estadística de ji cuadrado, hallándose que los métodos aplicados se encuentran en correspondencia con los valores de radiación evaluados en cada estación. Luego de realizar las comparaciones se determinó que el método que desplego la menor estimación, fue De Jong y Stewart.

**Castellvi, (2008)**. Realizó la evaluación de “**tres métodos prácticos para estimar radiación solar en climas secos**”, concluyendo que la ecuación de Bristow y Campbell (1985) fue el que mejor se ajustó con los datos diarios de información,

realizando una calibración para un lugar específico. Esto significa que el modelo matemático de Bristow - Campbell es la mejor ecuación que la ecuación de Hargreaves *et al.* (1985).

**Camayo Lapa, Bécquer Frauberth (2013).** Investigó sobre el “**Desarrollo del modelo Bristow - Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junín**”. Con el propósito de contar con una herramienta que estime la radiación solar mensual y anual sobre la superficie horizontal terrestre en la Región Junín, zona en la cual no se dispone con esta información, se adaptó el modelo Bristow - Campbell (1984) para estimar la radiación solar global media mensual. Para desarrollar el modelo de Bristow - Campbell que estima la radiación solar global diaria media mensual se tomó la técnica del modelaje propuesto por Espinoza (2010), para ello se registraron las temperaturas máximas y mínimas diarias de 19 estaciones meteorológicas y las ecuaciones propuestas por el Atlas solar del Perú. El modelo Bristow - Campbell fue validado con datos obtenidos en las estaciones de: Santa Ana, Tarma y Satipo pertenecientes a Sierra y Selva. La rentabilidad de la radiación solar estimada fue determinada tomando como referencia la radiación solar de 4,0 kWh/m<sup>2</sup>/día como rentables y mayores de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/día muy rentable (OLADE, 1992). Los resultados determinaron que la radiación solar global media mensual en la Región Junín es de 5,3 kWh/m<sup>2</sup>/día, correspondiendo a sierra 5,6 kWh/m<sup>2</sup>/día y selva 4,2 kWh/m<sup>2</sup>/día y. La rentabilidad determinada para sierra es muy rentable y la selva es menos rentable. El modelo es de funcionamiento simple y accesible a todo usuario. Se concluye que la aplicación del modelo Bristow - Campbell adaptado, resulta un instrumento de gran utilidad para generar una base de datos completa de la radiación solar disponible en la Región Junín.

**Delgado Orellana y Orellana Samaniego (2015).** Investigaron el estudio de la **“Estimación de la radiación solar global diaria en el cantón cuenca, mediante la aplicación del modelo Bristow – Campbell”**, en donde realizaron una evaluación de la radiación solar media global diaria que tuvo como resultado el presentar bastante aproximación y precisión para dicha estimación.

**De la Casa *et al.*, (2011).** Realizaron un estudio sobre la **estimación de la radiación solar global en la Provincia de Córdoba, Argentina**, para ello aplicó un modelo de rendimiento potencial de papa, llegando a obtener las conclusiones siguientes: En el argumento de los modelos de evaluación de la radiación solar de naturaleza un poco compleja que el que analiza el trabajo, utilizan como variable independiente la heliofonia que tiene relación con la nubosidad y presentan mejor capacidad predictiva a escala diaria que los procedimientos establecidos en la amplitud térmica. Los coeficientes empíricos de ajuste demuestran bastante uniformidad en los resultados, en general para toda la región, por lo que sería permitido el desarrollo de un modelo de estimación único para cada tipo en la llanura central de la Provincia de Córdoba. El empleo de valores evaluados de radiación solar global con el modelo (Bristow - Campbell) produce simulaciones del rendimiento potencial de papa similares a las que se obtiene con datos observados de radiación solar global.

**Gonzalo *et al.*, (2010).** En la Conferencia Latinoamericana de Energía Solar relacionado al mapa solar del Uruguay, aporta que los modelos estadísticos deben ser evaluados y controlados a partir de mediciones hechos en tierra. Los modelos físicos deben estar bien desarrollados y luego controlados en sus márgenes de error, a partir de las mediciones de irradiación en la tierra. La resolución espacial y

temporal aportada por estos métodos es grande ya que se trabaja con grillas de pocos km de lado y se cuenta con datos diariamente a intervalos menores a una hora.

**Gueymard (2010).** Evaluó 18 modelos de disgregación para evaluar la radiación solar normal directa que tengan mejor adaptación con valores hallados en 4 estaciones que se encuentran, según el autor, en los más estrictos procedimientos de mantenimiento, calibración y control de calidad establecidos por la BSRN (Baseline Solar Radiation Network). En la Estación de Mauna Loa, Hawái, se evaluaron datos horarios, se observó para los 18 modelos, de los cuales se evaluaron 11 de los 12 modelos estudiados en el trabajo; valores de desvíos cuadráticos medios RMSE% que varían entre 15,2% y 30,7% siendo los modelos de Pérez con 15,2% y el de Skartveit (1998) con 16,3% los que dieron una mejor respuesta.

Se puede afirmar en forma general y al igual de lo observado aquí, no se puede aseverar que los nuevos modelos mejoren significativamente en su capacidad predictiva a los establecidos 30 años atrás.

**Ramos Araujo, C.; Pérez Londo, N, (2014).** Estudiaron la tesis sobre la “**Estimación y modelación geo estadística de la radiación solar**”. Utilizaron métodos estadísticos univariantes y multivariantes, en donde se obtuvieron datos atípicos dentro de la muestra, aplicando un análisis de regresión lineal simple y múltiple se obtuvieron los coeficientes estimados del modelo de radiación solar y por último emplearon el método geo estadístico kriging ordinario para la modelación espacial de radiación solar global. En el trabajo se halló que el mejor modelo de regresión para estimar radiación solar global en la ciudad de Riobamba es el modelo de Angstrom Prescott establecido en la heliofanía, donde se explica que, aproximadamente el 80% de la variabilidad total de la radiación solar global,

y el mejor modelo geo estadístico para evaluar la radiación solar es el kriging ordinario lineal, que explica aproximadamente el 68% de la variabilidad espacial de radiación solar. Finalmente concluyeron que se puede evaluar o estimar la radiación solar global con el modelo de Angstrom-Prescott y el modelo kriging ordinario para la modelación geo estadística, para ello, se recomienda que los lugares en donde se aplique el modelo de Angstrom-Prescott tengan características topográficas similares a aquellas de la ciudad de Riobamba.

**Raichijk *et al.*, (2012).** Realizó estudios para comparar modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria, en Lujan, Buenos Aires y pudo determinar 12 modelos de descomposición, utilizados para estimar la radiación solar directa y después con distintos estimadores estadísticos hicieron la comparación con los modelos entre sí, llevando a cabo un orden relativo medio de sus capacidades predictivas. Los modelos que dieron mejor respuesta son lo que aplicaron una función logística como el modelo de Boland *et al.*, (2001) y su aplicación posterior en Ridley *et al.*, (2010), junto al modelo de Skartveit *et al.*, (1998). Al comparar valores estimados de radiación global solar media mensual, se llegaron a observar desvíos cuadráticos medios, RMSE%, que tuvieron una variabilidad entre 11,6% y 18,4% y sesgos medios relativos, MBE%, entre 0,3% y 9,2%. Estos valores son comparados con los publicados por Gueymard (2010).

**Rivintong *et al.*, (2005)**, al utilizar modelos de estimación de radiación solar, llega a concluir que, cuando se trabaja con datos de duración de la insolación, es preferible utilizar el modelo de Johnson – Woodward (JW), en vez de utilizar los modelos basados en la temperatura del aire. Pero, teniendo mayor disponibilidad de los datos de temperatura, tanto espacial como temporalmente, los dos métodos

basados en la temperatura del aire a prueba, realizarán estimaciones que tengan mayor confiabilidad lo cual permitirá la creación de conjuntos de datos completos. Los resultados encontrados demuestran que cada modelo es capaz de realizar mejores estimaciones en muchos lugares y los más deficientes en otros. El modelo Johnson – Woodward presenta errores de subestimación sistemática al culminar la primavera, el verano y el período de principios de otoño. El modelo Campbell – Donatelli (CD) tiende a subestimar los valores en el invierno al período de primavera temprana. El modelo Donatelli – Bellocchi (DB) tiende a sobreestimar los valores en el invierno con el período de primavera.

**Tao et al., (2013).** Realizó estudios de investigación que conciernen a la estimación de la radiación solar, en la que concluye que el modelo Bristow – Campbell fue evaluado y validado aplicando observaciones meteorológicas diarias en la meseta del Tíbet de China. Igualmente, el autor determina que después de la parametrización, el modelo tiene un mejor desempeño en la zona de estudio. Además, las variables y parámetros a utilizar son pocos en diferencia a otros modelos y los datos de temperatura máxima y mínima son fáciles de obtener. El modelo Bristow – Campbell es un modelo sencillo, rápido, fiable y eficaz para estimar la radiación solar global.

**Varo Martínez, Martha; (2006),** en su tesis **Modelización de la Radiación Ultravioleta**, llevó a cabo la caracterización del comportamiento de la radiación ultravioleta total y su componente espectral UV-B, modelando la variabilidad de los datos hallados respecto a diferentes condiciones atmosféricas, meteorológicas y geográficas. De esta manera, se presenta un estudio detallado sobre el

comportamiento de la componente ultravioleta de la radiación solar, planteando los siguientes objetivos:

- Modelar las distribuciones del índice de claridad total y ultravioleta en función de la masa de aire atravesada.
- Modelar la radiación ultravioleta en función de la radiación total.
- Modelar la relación existente entre la radiación ultravioleta horaria y la radiación total horaria.
- Modelar la relación existente entre la radiación ultravioleta diaria y la radiación total diaria.

## **2.2. Bases teóricas – científicas**

### **a) El Sol**

El Sol, por el efecto gravitacional de su masa, presenta un dominio sobre el sistema planetario en la que también está incluida la Tierra. Mediante la radiación de su energía electromagnética, contribuye directa o indirectamente con la energía necesaria que salvaguarda la vida en la Tierra, los alimentos y los combustibles provienen de las plantas que utilizan la energía de la luz del Sol. (Lqbal, M. 1983).

No se ha estudiado con tanto detalle a ninguna otra estrella como el sol. El Sol gira una vez cada 27 días cerca del Ecuador, pero una vez cada 31 días más cerca de los polos. (Viorel. 2008).

El núcleo del sol, tiene suficiente cantidad de hidrógeno que puede durar 4500 millones de años; al término de este combustible, el Sol realizará un cambio, según se vaya expandiendo las capas exteriores hasta el tamaño actual de la

órbita de la Tierra, el Sol se convertirá en un gigante rojo, algo más frío, pero 10000 veces más brillante a causa de su enorme tamaño, (Viorel. 2008).

El sol emite una radiación de energía en forma constante y presenta una variación en décimas de 1% en varios días. El Sol se compone sobre todo de hidrógeno (71%); también contiene helio (27%) y otros elementos más pesados (2%). En las proximidades del centro del Sol, la temperatura es casi 16.000.000 K y la densidad es 150 veces la del agua. En estas condiciones, los núcleos de los átomos de hidrógeno individuales actúan entre sí, experimentando la fusión nuclear. La combustión nuclear del hidrógeno en el centro del Sol se extiende a un 25% del radio solar. (Viorel. 2008).

El sol presenta una influencia sobre la tierra mediante la energía solar que es la fuente de luz y calor; los alimentos, viviendas y vestidos no existirían sin los rayos del sol. La desaparición de la energía solar representaría el final de toda manifestación de vida sobre nuestro planeta.

El sol nos da calor y luz. Si por alguna razón el sol dejara de brillar, todos los seres vivos, animales y vegetales, se congelarían. En poco tiempo todos los lagos, ríos y océanos quedarían cubiertos de hielo. Pocos días después toda el agua de los océanos formaría una masa helada. El aire que rodea la tierra se convertiría en líquido y cubriría la faz del planeta. Aun este aire líquido se congelaría y solidificaría. La temperatura de la tierra descendería a un nivel que apenas podemos imaginar. (Viorel. 2008).

**Tabla 1**  
Principales propiedades del Sol

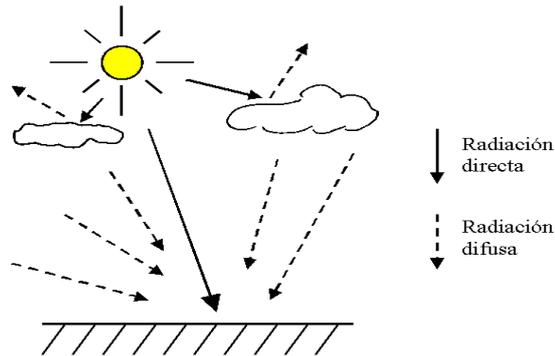
Característica	Dimensión
Masa	$1.99 \times 10^{30}$ kg
Diámetro	$1.392 \times 10^9$ m
Superficie	$6.087 \times 10^{18}$ m <sup>2</sup>
Volumen	$1.412 \times 10^{27}$ m <sup>3</sup>
Densidad media	$1.41 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
Diámetro angular (desde la tierra)	31 <sup>m</sup> 59.3 <sup>s</sup>
Distancia media Tierra - Sol	$1.496 \times 10^{11}$ m
Temperatura efectiva	5777 K
Potencia	$3.86 \times 10^{26}$ w

**Fuente.** Viorel. 2008

**b) Radiación solar**

Es la energía aportada sobre la superficie terrestre en forma de radiación electromagnética procedente del Sol (Álvarez et al., 2014), fuente de energía abundante y limpia que disponen los seres vivos que habitan el planeta Tierra. Pero, la dispersión y discontinuidad de este tipo de energía dificultan notablemente su aprovechamiento, lo que la sitúa en desventaja en relación a otros tipos de fuentes energéticas, ya que, la radiación solar es afectada por diferentes factores (localización geográfica, efecto de la atmósfera, presencia o no de nubosidad, etc.) que determinan su naturaleza (directa o difusa) y el valor finalmente observado. Se trata de un fenómeno dinámico que no sólo se pueden distinguir ciertas pautas deterministas (ciclos estacionales y diarios) que pueden ser representadas de forma elemental por relaciones astronómicas, sino que también presenta comportamientos de tipo aleatorio, que dificultan su estimación mediante modelos u otros procedimientos indirectos.

La intensidad de radiación solar global ( $R_g$ ) que llega a la tierra varía de acuerdo a factores atmosféricos relacionados con la composición de la atmósfera terrestre. Esta interacción afecta la dirección e intensidad de los rayos del sol, dando dos nuevos flujos de energía radiante que son radiación solar directa ( $R_{dir}$ ) y la radiación solar difusa ( $R_{dif}$ ), (Sarmiento, 1995).



**Figura 1.** Radiación solar directa y difusa. Sarmiento, 1995

Se ha comprobado que la mayor parte del calor y luz del Sol incide sobre las regiones ecuatoriales y sólo una pequeña parte va a parar a las zonas polares. Este calentamiento desigual de la superficie terrestre produce una compleja circulación de los elementos que componen la atmósfera, los cuales se desplazan desde las regiones más cálidas hacia las regiones más frías. A través del estudio de estos fenómenos se concluye que existen ciertas variables meteorológicas, influyen sobre los parámetros atmosféricos producen notables variaciones en la cantidad de radiación solar global ( $R_g$ ) dentro de las cuales se considera la temperatura y la presión atmosférica (Rondón, F. 1986).

### c) **Factor astronómico entre el sol y la tierra**

La radiación solar atraviesa el espacio interplanetario e interestelar desde el sol hasta llegar a la tierra, la intensidad de esta energía varía notablemente durante su recorrido por el espacio. Se establece factores astronómicos entre el sol y la

tierra que pueden predecir con bastante precisión, el cambio en la cantidad de radiación solar sobre la superficie terrestre. Así, dentro de la relación astronómica que existe entre el sol y la tierra se consideran el movimiento de la tierra alrededor del sol, el movimiento de la tierra alrededor de su eje polar, y el ángulo entre el ecuador terrestre y el plano que contienen el sistema orbital sol y tierra. (Sarmiento. 2015).

**d) Distancia del sol a la tierra**

Matemáticamente, la intensidad de energía que llega a un área determinada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida por dicha energía. 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. Así, conocer el valor exacto de la distancia del sol a la tierra con considerable precisión 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 ( $r_0$ ) abarca precisamente 149 597 890 kilómetros, por lo general se utiliza una unidad de medida mucho más pequeña, la Unidad Astronómica ([AU]). Esta unidad establece el valor de la distancia media entre el sol y la tierra en 1 Unidad Astronómica (One Astronomical Unit, 1 [AU]), tal como lo señala la siguiente ecuación (Ec. 1) (Iqbal, 1983).

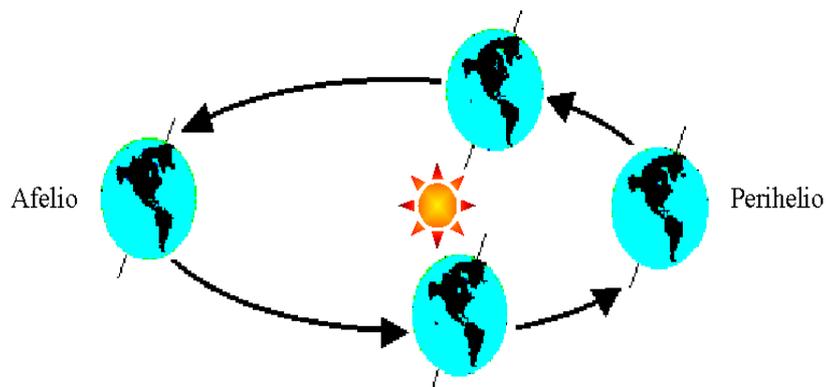
$$1(\text{AU}) = 1,496 \cdot 10^8 (\text{km}) \quad \text{Ec. 1}$$

La distancia mínima entre el sol y la tierra es aproximadamente a 0,983 [AU], esta órbita terrestre en el cual la tierra se encuentra más cerca del sol se

denomina perihelio y ocurre alrededor del 3 de enero. La distancia máxima entre el sol y la tierra corresponde aproximadamente a 1,017 [AU], esta órbita terrestre en el cual la tierra ocupa la posición más lejana al sol se denomina afelio y ocurre alrededor del 4 de julio. También la órbita terrestre en el cual la tierra se encuentra en su distancia media con respecto al sol se produce entre los días 4 de abril y 5 de octubre (Iqbal, 1983).

Estas grandes distancias se encuentran ligeramente influenciadas por la gran variedad de cuerpos celestes que viajan a través del espacio y por los ciclos de los años bisiestos, no obstante, la distancia entre el sol y la tierra para cualquier día de cualquier año es conocida con considerable precisión.

En la figura 2, se aprecian las posiciones que representan las distancias entre el sol y la tierra mencionadas anteriormente. (Sarmiento. 1995)



**Figura 2.** Distancia entre el Sol y la Tierra. Sarmiento, 1995.

La distancia entre el sol y la tierra está dada mediante la serie de Fourier con determinado número de coeficientes. Con un error máximo de 0,0001 (Spencer 1971, citado por Castro Diez, Y. 1986) desarrolló la siguiente expresión (Ec. 2 y Ec. 3) para el recíproco del cuadrado del radio vector de la tierra, que es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre ( $E_0$ ).

$$E_0 = \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \quad \text{Ec. 2}$$

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,001280 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma \quad \text{Ec. 3}$$

Este factor de corrección para la posición de la tierra en su órbita determina la distancia entre el sol y la tierra en unidades astronómicas. En tanto, la variable  $\Gamma$  es denominada como el día angular en radianes, (Castro Diez, Y. 1986) presenta la siguiente expresión (Ec. 4).

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot (d_n - 1)}{365} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $d_n$  representa el día juliano del año, es decir, se trata de una ordenación ordinaria de los días del año asignando como  $d_n$  igual a 1 el 1° de Enero,  $d_n$  igual a 32 el 1° de Febrero, y así sucesivamente hasta llegar a  $d_n$  igual a 365 que corresponde al 31 de diciembre. Se obtiene los valores de la distancia entre el sol y la tierra para cada día del año en [AU], tal como se representa en la Figura 3, donde la variación anual de la distancia del sol a la tierra fue obtenida a través de las ecuaciones desarrolladas por Spencer (Ec. 2 y Ec. 3).

Existen diferentes fórmulas para estimar la distancia del sol a la tierra, la elección de una fórmula depende de las necesidades para las cuales se requieren obtener los valores de distancia, esto va en la ecuación (Ec. 5).

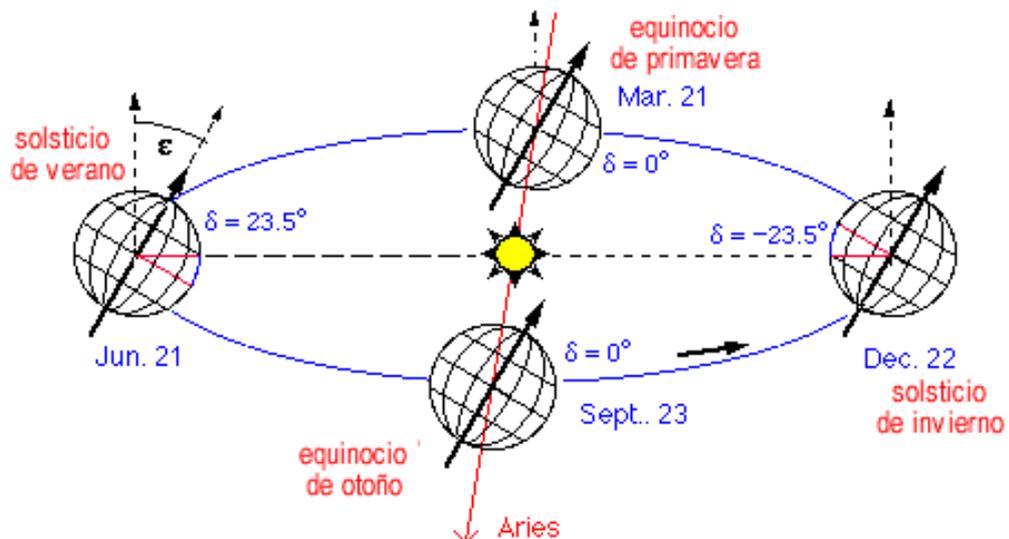
$$E_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot d_n}{365} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

Así en la ecuación anterior (Ec. 4), en este caso  $d_n$  representa el día juliano del año. Esta ecuación (Ec. 5) fue desarrollada por Duffie y Beckman para

determinar la distancia entre el sol y la tierra, esta es utilizada en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería y tecnología solar (Castro Diez, Y. 1986).

e) **Declinación solar**

El movimiento de rotación que produce el día y la noche lo realiza la tierra alrededor del eje polar, que está inclinado aproximadamente  $23.5^\circ$  con respecto a la normal al plano eclíptico. Al año el ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico permanece sin variación, lo mismo es válido para el ángulo entre el plano ecuatorial terrestre y el plano eclíptico. Sin embargo, el ángulo que existe entre el plano ecuatorial terrestre y la línea que une los centros del sol y la tierra cambia cada día, en realidad, cada instante. Este ángulo que se representa a través de la letra  $\delta$  es denominado declinación solar (Iqbal, 1983). El valor de esta variable es alrededor de cero los días 21 de marzo y 21 de setiembre, durante los respectivos equinoccios. En cambio, la declinación solar tiene un valor de aproximadamente  $+23^\circ 27'$  el 21 de junio, y alrededor de  $-23^\circ 27'$  el 21 de diciembre, durante los respectivos solsticios.



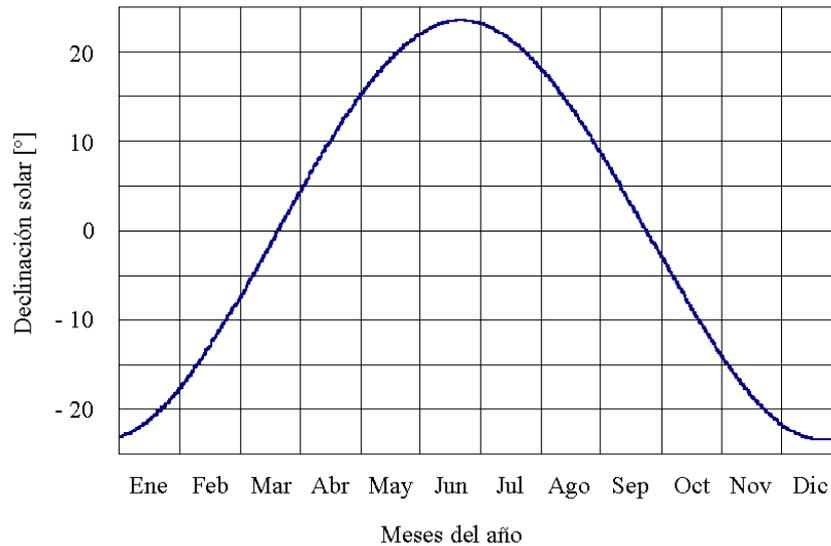
**Figura 3.** Declinación solar durante los respectivos solsticios de invierno y verano. Iqbal, 1983.

Desde un observador en cualquier punto de la tierra, el significado de la declinación solar se describe mediante el trazado de la esfera celeste. Así, la trayectoria que realiza el sol a través de la esfera celeste describe una órbita, la cual es consecuencia de la variación de la declinación solar a lo largo del año. La intersección del plano ecuatorial terrestre con el plano descrito por el movimiento aparente del sol forma un ángulo de aproximadamente  $23^{\circ} 27'$ . En cualquier tiempo, la posición del sol relativa al plano del ecuador celeste describe el ángulo de declinación solar (Iqbal, 1983).

En 24 horas, el cambio máximo en la declinación solar, que ocurre durante los equinoccios, es de menos de  $0,5^{\circ}$ . No obstante, por lo general para su cálculo esta variable es considerada constante en el día. A raíz de esto, un gran número de autores ha desarrollado expresiones mediante las cuales es posible obtener valores aproximados de declinación solar con variados grados de precisión. Spencer 1971, (citado por Castro y Colmenar 2008) presentó la siguiente expresión (Ec. 6) para la declinación solar medida en grados.

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \Gamma + 0,070257 \cdot \text{sen } \Gamma - 0,006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000907 \cdot \text{sen } 2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \text{sen } 3\Gamma) \cdot \left( \frac{180}{\pi} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

Esta ecuación estima la declinación solar con un error máximo de 0,0006 radianes, lo que equivale a 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 0,0035 radianes, lo que equivale a 0,2 grados. A través de la utilización de esta fórmula (Ec. 6) es posible obtener los valores de la declinación solar para cada día del año en grados como en la figura 4.



**Figura 4.** Curva de variación de la declinación solar a lo largo del año. Sarmiento, 1995.

Para estimar la declinación solar, la elección de una fórmula y otra depende de las necesidades que se requieren para obtener los valores de declinación solar. Las siguientes ecuaciones (Ec. 7 y Ec. 8) corresponden a dos fórmulas que son consideradas mucho más simples y, por lo tanto, utilizadas con mayor frecuencia para obtener la declinación solar en grados (Jutglar, 2004).

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left[ 0,4 \cdot \text{sen} \left( \frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365} \right) \right] \quad \text{Ec. 7}$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} \cdot (d_n + 284) \right] \quad \text{Ec. 8}$$

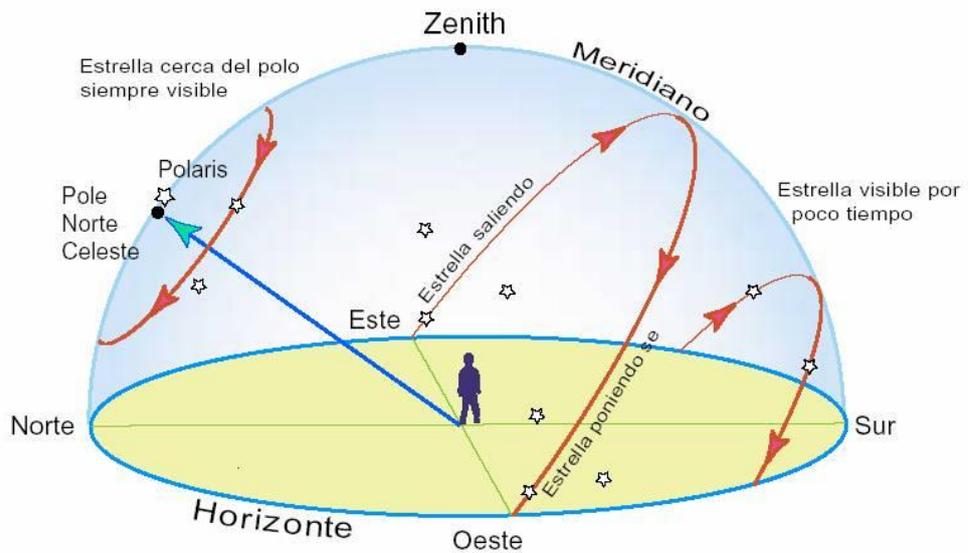
En este caso, en ambas ecuaciones la variable  $d_n$  representa el día juliano del año. Según la información citada por Jutglar (2004), la primera ecuación (Ec. 7) fue desarrollada por Perrin de Brichambaut, en cambio, la segunda ecuación (Ec. 8) fue generada por Cooper. A través de ambas ecuaciones es posible

obtener valores realmente correctos de la declinación solar en grados, sin embargo, para mayores precisiones es preferible utilizar la ecuación presentada por Spencer (Ec. 6).

**f) Relación trigonométrica entre el sol y la tierra**

La intensidad y disponibilidad de radiación solar que llega a la superficie de la tierra depende principalmente del factor astronómico entre el sol y la tierra y del factor topográfico de la superficie terrestre, matemáticamente se han ido desarrollado ciertas relaciones físicas entre estos dos factores considerando una serie de términos que se establecen a partir de la utilización de la esfera celeste. A partir de este sistema de coordenadas astronómicas es posible definir la posición del sol en el cielo con respecto a las coordenadas de una superficie cualquiera en la tierra, ya sea horizontal o inclinada (Cañada, J. 1988).

Con este plano de referencia se puede establecer que en cualquier momento un observador ubicado sobre un punto de la superficie terrestre tiene una posición correspondiente con la esfera celeste, tal como se indica en la Figura 5, la cual es denominada la línea zenit (cenit) del observador. Este término corresponde al punto de intersección de la esfera celeste con la normal a la superficie terrestre en el punto del observador. El punto direccionalmente opuesto al zenit es denominado nadir, este término es de origen árabe e indica el punto de la bóveda celeste a las antípodas del observador.



**Figura 5.** Posición del sol en la esfera celeste. Cañada, J. 1998

Considerando este sistema de referencia, luego, se explican los parámetros más importantes que definen la posición del sol en el cielo con respecto a un observador ubicado sobre la superficie de la tierra (Sarmiento, 1995).

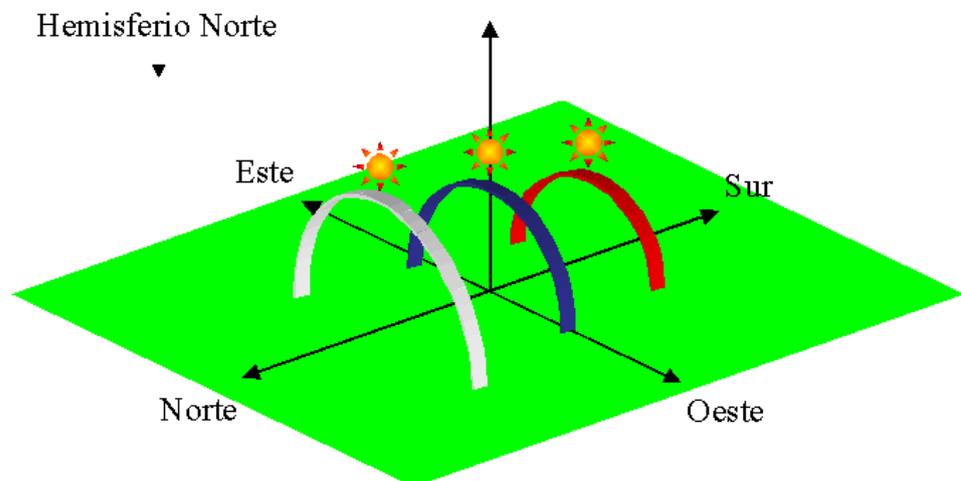
- **Ángulo zenit ( $\theta_z$ )**, también denominado la distancia del zenit, corresponde al ángulo que se forma entre la línea zenit del observador y la línea que une al observador con el Sol. Es un ángulo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .
- **Altitud solar ( $\alpha$ )**, también denominada la elevación solar o la altura solar, corresponde a la altura angular del sol sobre el horizonte celeste del observador. Es un ángulo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . La altitud solar es el complemento del ángulo zenit, es decir, la suma de ambos es  $90^\circ$ .
- **Azimut (acimut) solar ( $\psi$ )**, también denominado ángulo azimutal del sol, corresponde a la desviación angular de la proyección del rayo solar en el plano horizontal con respecto al meridiano local. Este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, hacia el norte es  $180^\circ$

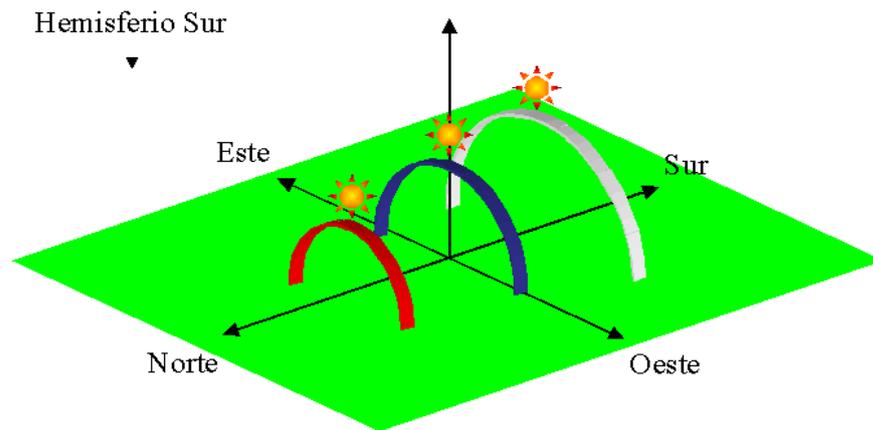
y hacia el sur es  $0^\circ$ , de esta manera, el azimut solar varía de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  hacia el oeste y de  $0^\circ$  a  $-180^\circ$  hacia el este.

- **Declinación solar ( $\delta$ )**, corresponde a la posición angular del sol durante el día con respecto al plano del ecuador terrestre. Este ángulo varía en un rango de  $\pm 23,45^\circ$  entre los solsticios de verano e invierno.
- **Latitud geográfica del lugar ( $\phi$ )**, posición angular hacia el norte o al sur del ecuador terrestre. Este ángulo varía en un rango de  $90^\circ$  entre los polos norte y sur, siendo positivo en el hemisferio norte, donde va desde los  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , y negativo en el hemisferio sur, donde va desde el  $0^\circ$  hasta los  $-90^\circ$ .
- **Ángulo horario ( $\omega$ )**, corresponde al desplazamiento angular del sol hacia el este o el oeste del meridiano local debido al movimiento de rotación de la tierra sobre su propio eje. Este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, en el mediodía solar tiene un valor de  $0^\circ$ , de esta manera, el ángulo horario cambia  $15^\circ$  por cada hora.
- **Pendiente de la superficie ( $\beta$ )**, corresponde al ángulo de inclinación que presenta la superficie donde se encuentra el observador con respecto a la posición horizontal.
- **Ángulo de incidencia ( $\theta$ )**, para una superficie orientada arbitrariamente corresponde al ángulo que se forma entre la normal a la superficie y la línea que une al observador con el sol. Este es un ángulo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .
- **Azimut (acimut) de la superficie ( $\gamma$ )**, también denominado ángulo azimutal de la superficie, es a la desviación angular de la proyección de la normal a la superficie inclinada con respecto al meridiano local. Este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, hacia el

norte es  $0^\circ$  y hacia el sur es  $180^\circ$ , de esta manera, el azimut de la superficie varía de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  hacia el oeste y de  $0^\circ$  a  $-180^\circ$  hacia el este. En términos prácticos, este concepto corresponde a la orientación o exposición que presenta la superficie donde se encuentra el observador.

La figura 6 describe las trayectorias del movimiento del sol con respecto a un observador ubicado sobre la superficie de la tierra para cada uno de los hemisferios por separado y tomando como referencia la esfera celeste. El recorrido del sol determinado por la curva roja ocurre durante el solsticio de invierno, mientras que la curva de color blanca describe el recorrido del Sol durante el solsticio de verano. Además, la trayectoria que realiza el sol durante los equinoccios de otoño y primavera son representados por la curva de color azul.





**Figura 6.** Recorridos del sol para un observador ubicado en el Hemisferio Norte y Hemisferio Sur, teniendo como referencia la esfera celeste. Los recorridos de color rojo, azul y blanco corresponden al solsticio de invierno, a los equinoccios y al solsticio de verano, respectivamente. Sarmiento, 1995.

De las figuras anteriores se deduce que durante el solsticio de verano el sol se desplaza alcanzando mayor altitud al mediodía y el azimut solar recorrido es superior a  $180^\circ$ . En cambio, durante el solsticio de invierno el Sol alcanza la menor altitud al mediodía y el azimut solar recorrido es inferior a  $180^\circ$ . En tanto que, durante los equinoccios de otoño y primavera, mientras se desprecie la variación de la declinación durante el día, el sol se desplazará a través de un plano recto y el azimut solar recorrido será igual a  $180^\circ$  (Sarmiento, 1995).

A partir de la utilización de estos parámetros es posible establecer ciertas relaciones trigonométricas entre la posición del sol en el cielo con respecto a una superficie horizontal o a una superficie con cierto grado de inclinación. Para el caso particular de una superficie inclinada es necesario considerar la pendiente de la superficie con respecto a la posición horizontal y la orientación de la superficie en relación al meridiano local.

Una forma apropiada de explicar lo que ocurre con los rayos solares sobre una superficie inclinada es establecer como casos independientes las relaciones trigonométricas entre la posición del sol en el cielo con respecto a una superficie orientada arbitrariamente y a una superficie orientada hacia el ecuador tal como se explica a continuación (Iqbal, 1983).

**g) Posición del sol relativa a posiciones horizontales**

Para una posición geográfica dada, las relaciones trigonométricas entre el sol y una superficie horizontal en la Tierra dan las siguientes ecuaciones (Ec. 9, Ec. 10 y Ec. 11).

$$\cos \theta_z = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_h \quad \text{Ec. 9}$$

$$\text{sen} \alpha = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_h \quad \text{Ec. 10}$$

$$\cos \psi = \frac{\text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \phi - \text{sen} \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde  $\theta_z$  es el ángulo zenit medido en grados para una superficie horizontal,  $\delta$  corresponde a la declinación solar medida en grados,  $\phi$  es la latitud geográfica del lugar medida en grados,  $\omega_h$  representa al ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal,  $\alpha$  es la altitud solar medida en grados para una superficie horizontal y  $\psi$  corresponde al azimut solar dado en grados para una superficie horizontal. Para estimar el azimut solar a partir de la ecuación anterior es necesario considerar que el  $\cos \psi$  será mayor o igual a cero si el azimut solar varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , en cambio, el  $\cos \psi$  será menor o igual a cero mientras el azimut solar varíe entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ , se señala a continuación (Ec. 12 y Ec. 13).

$$0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \qquad \cos \psi \geq 0 \qquad \text{Ec. 12}$$

$$90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \qquad \cos \psi \leq 0 \qquad \text{Ec. 13}$$

En algunas ocasiones se suele obtener el azimut solar a partir de la siguiente ecuación (Ec. 14).

$$\text{sen} \psi = \frac{\cos \delta \cdot \text{sen} \omega_h}{\cos \alpha} \qquad \text{Ec. 14}$$

Donde  $\psi$  es el azimut solar medido en grados para una superficie horizontal,  $\delta$  representa a la declinación solar medida en grados,  $\omega_h$  es el ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal y  $\alpha$  corresponde a la altitud solar medida en grados para una superficie horizontal. No obstante, es necesario señalar que esta ecuación entrega valores incorrectos cuando el azimut solar es mayor a  $90^\circ$  (Jutglar, 2004).

De las ecuaciones dadas es posible definir la magnitud del desplazamiento angular diario del sol con respecto al meridiano local para una superficie horizontal en función de la declinación solar y de la latitud geográfica del lugar considerando que en el orto, como en el ocaso del sol el ángulo zenit  $\theta_z$  para una superficie horizontal es igual a  $90^\circ$  y la altitud solar  $\alpha$  para una superficie horizontal corresponde a  $0^\circ$ . En consecuencia, el ángulo horario para este tipo de superficie definido por los puntos de salida y puesta del sol en un día cualquiera está determinado por la siguiente ecuación (Ec. 15).

$$\omega_h = \pm \cos^{-1} \cdot (-\tan \phi \cdot \tan \delta) \qquad \text{Ec. 15}$$

Donde  $\omega_h$  es el ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal,  $\phi$  representa a la latitud geográfica del lugar medida en grados y  $\delta$  es la declinación solar medida en grados. Es necesario señalar que la diferencia del signo representa el ángulo horario correspondiente al orto y al ocaso del sol, donde el signo negativo corresponde a la salida del sol por el horizonte, en cambio, el signo positivo corresponde a la puesta del sol por el horizonte. De esta manera, el ángulo horario de cada uno de estos puntos para una superficie horizontal corresponde a las siguientes ecuaciones (Ec. 16 y Ec. 17).

$$\omega_{srh} = -\cos^{-1} \cdot (-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad \text{Ec. 16}$$

$$\omega_{ssh} = +\cos^{-1} \cdot (-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad \text{Ec. 17}$$

Donde  $\omega_{srh}$  corresponde al ángulo horario de la salida del sol dado en grados para una superficie horizontal, en cambio,  $\omega_{ssh}$  es el ángulo horario de la puesta del sol dado en grados para una superficie horizontal. En este caso, es posible observar que el ángulo horario de la salida del sol para una superficie horizontal es igual al ángulo horario de la puesta del sol para una superficie horizontal, excepto por la diferencia del signo (Castro Diez, Y. 1986).

Si bien, las ecuaciones anteriores son válidas exclusivamente para todas aquellas superficies que no presentan algún grado de inclinación, es decir, superficies que sean horizontales, existen algunas excepciones relacionadas con el ángulo horario para este tipo de superficies que se generan en ciertos lugares y épocas del año. Por ejemplo, en la región polar, a partir del solsticio

de invierno y durante aproximadamente seis meses seguidos el sol no llega a salir por el horizonte, sucediendo una noche continua durante medio año.

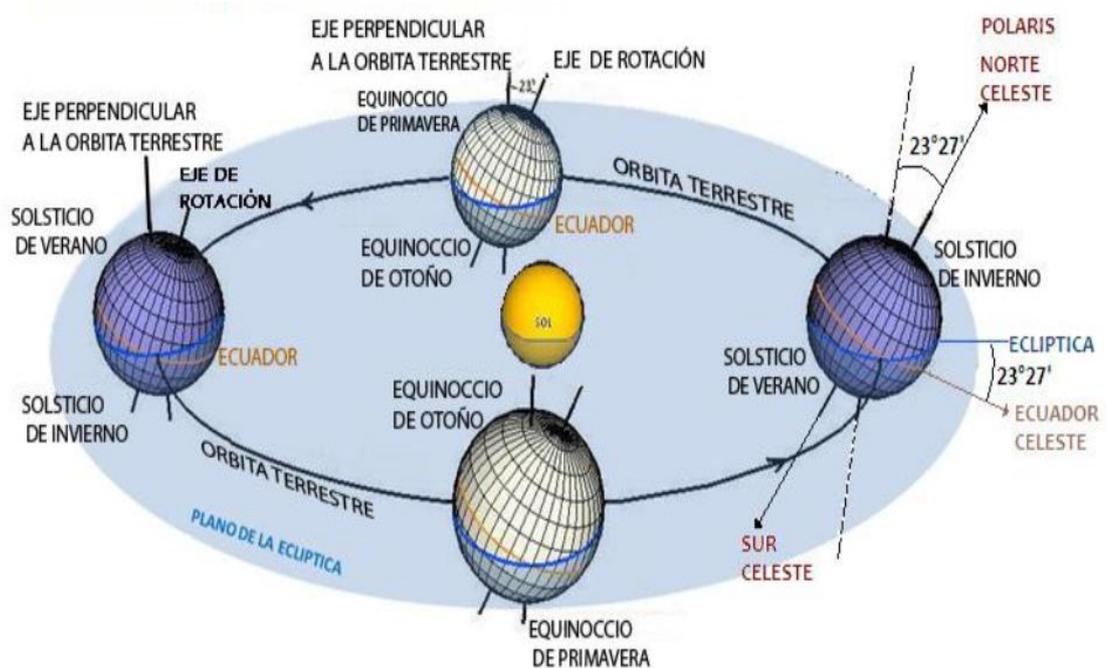
También, en la región polar, a partir del solsticio de verano y durante seis meses seguidos el sol no llega a ponerse en el horizonte, sucediendo un día continuo durante medio año. En ambos casos es imposible calcular la hora de salida y puesta del sol, debido a que ocurre lo siguiente (Ec. 18 y Ec. 19).

$$\cos \omega_{srh} < -1 \quad \text{Ec. 18}$$

$$\cos \omega_{ssh} > +1 \quad \text{Ec. 19}$$

La excepción relacionada con el ángulo horario para superficies horizontales ocurre en el ecuador, donde el valor de la latitud geográfica corresponde a cero grados. Según las ecuaciones anteriores es posible estimar la magnitud del ángulo horario de la puesta del sol y del ángulo horario de la salida del sol, las cuales entregan un valor de  $90^\circ$  para cada uno de estos ángulos. En este caso, la duración del día es siempre igual a 12 horas, cuyo valor depende exclusivamente de la declinación solar del día (Jutglar, 2004).

Además, durante los respectivos equinoccios, el valor de la declinación solar para una superficie horizontal ubicada en cualquier latitud geográfica corresponde a cero grados. Nuevamente, las ecuaciones que estiman la magnitud del ángulo horario de la puesta del sol y del ángulo horario de la salida del sol entregan un valor de  $90^\circ$  para cada uno de estos ángulos. En este caso, la duración del día es siempre igual a 12 horas, cuyo valor es independiente de la latitud geográfica (Castro Diez, Y. 1986).



**Figura 7.** Recorridos del sol en los equinoccios y solsticios de las estaciones. Sarmiento, 1995.

#### h) Radiación solar extraterrestre

Para entender el cálculo de la radiación solar extraterrestre es necesario conceptualizar términos que ayudarán a simplificar y comprender la nomenclatura utilizada y su significado físico. En este sentido es necesario considerar dos términos, denominados irradiancia solar extraterrestre e irradiación solar extraterrestre.

**La irradiancia solar extraterrestre  $R_e$** , es definida como la energía incidente sobre la unidad de superficie en el borde exterior de la atmósfera en la unidad de tiempo, cuya unidad normalmente empleada es el  $[W m^{-2}]$ . Por otro lado, la irradiación solar extraterrestre es la energía recibida por la unidad de superficie en el borde exterior de la atmósfera durante un período de tiempo determinado y se obtiene integrando el valor de la irradiancia solar extraterrestre a lo largo

de dicho período de tiempo (Jutglar, 2004). Si el período de tiempo corresponde a una hora, la irradiación solar extraterrestre se representa por la letra  $I_e$ , donde la unidad habitualmente utilizada es el  $[\text{W m}^{-2} \text{h}^{-1}]$ . En tanto que, si dicho período corresponde a un día, la irradiación solar extraterrestre se representa por la letra  $H_e$ , en cuyo caso la unidad aplicada comúnmente es el  $[\text{W m}^{-2} \text{día}^{-1}]$ .

Existen fórmulas matemáticas para determinar tanto la irradiancia solar extraterrestre como la irradiación solar extraterrestre en varias orientaciones y para diferentes períodos de tiempo, obteniendo valores integrados del espectro de radiación electromagnética sobre todas las longitudes de onda, las cuales son explicadas a continuación:

### 1) Irradiancia solar extraterrestre sobre superficie horizontal

La irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizontal está en función de las relaciones astronómicas y trigonométricas mencionadas anteriormente dentro de las cuales es necesario considerar la distancia entre el sol y la tierra, la latitud geográfica, el ángulo horario y la declinación solar. De modo que, el valor de la irradiancia para este tipo de superficie se obtiene a través de la siguiente expresión (Ec. 20).

$$R_{eh} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \quad \text{Ec. 20}$$

Donde  $R_{eh}$  corresponde a la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizontal,  $I_{sc}$  es la constante solar,  $E_0$  representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre y  $\theta_z$  es el ángulo zenit medido en grados para una superficie horizontal. Así, para ciertas aplicaciones relacionadas

con este tipo de superficie es frecuentemente necesario contar con los valores de radiación solar para un período de tiempo determinado, como una hora o un día. En ambos casos se considera la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizontal integrado para los respectivos períodos de tiempo (Jutglar, 2004).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie horizontal a lo largo de una hora se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano horizontal  $R_{eh}$  durante dicho intervalo de tiempo, tal como se define en la siguiente expresión (Ec. 21 y Ec. 22).

$$I_{eh} = \int_{t_1}^{t_2} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \cdot dt \quad \text{Ec. 21}$$

$$I_{eh} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[ \begin{aligned} & \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot (t_2 - t_1) + \\ & \frac{12}{\pi} \cdot \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot [\text{sen}(15 \cdot t_1) - \text{sen}(15 \cdot t_2)] \end{aligned} \right] \quad \text{Ec. 22}$$

Donde  $I_{eh}$  corresponde a la irradiación solar extraterrestre horaria sobre un plano horizontal,  $I_{sc}$  es la constante solar,  $E_0$  representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre,  $t_1$  es la hora solar correspondiente al principio del intervalo de cálculo y  $t_2$  corresponde a la hora solar al final del intervalo de cálculo. En este caso, tanto  $t_1$  como  $t_2$  son medidas a partir de medianoche, es decir, de las 0 horas hasta las 24 horas, de este modo, para calcular la irradiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal entre las 3 y las 4 de la tarde se consideraría  $t_1$  igual a las 15 horas y  $t_2$  igual a las 16 horas. Esta expresión permite, además, el

cálculo de la irradiación solar extraterrestre en períodos de tiempo distintos de una hora sobre una superficie horizontal (Jutglar, 2004).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie horizontal a lo largo de un día se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano horizontal  $R_{eh}$  durante dicho intervalo de tiempo, tal como se define en la siguiente expresión (Ec. 23 y Ec. 24).

$$H_{eh} = \int_{\omega_{srh}}^{\omega_{ssh}} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \cdot d\omega_h \quad \text{Ec. 23}$$

$$H_{eh} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[ \begin{array}{l} \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \omega_h \cdot \frac{\pi}{180} + \\ \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \omega_h \end{array} \right] \quad \text{Ec. 24}$$

Donde  $H_{eh}$  es la irradiación solar extraterrestre diaria sobre un plano horizontal,  $I_{sc}$  representa a la constante solar,  $E_0$  es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre,  $\omega_{srh}$  corresponde al ángulo horario a la salida del sol,  $\omega_{ssh}$  es el ángulo horario a la puesta del sol y  $\omega_h$  representa al ángulo horario dado en grados en la superficie horizontal (Jutglar, 2004). La constante solar ( $I_{sc}$ ) es la irradiancia recibida por una superficie, a la distancia media sol – tierra y fuera de la atmósfera. Su valor se ha determinado a partir de datos experimentales, obtenidos de satélites

$$I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2 = 4,871 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{h}) = 1,94 \text{ cal/cm}^2 \text{ min)} \quad \text{Ec. 25}$$

artificiales y se acepta (Jutglar, 2004).

## 2) Evaluación de la Radiación Solar Global Terrestre

El aprovechamiento del recurso solar tiene lugar en la superficie terrestre. Esta es la razón como la atmósfera se convierte en el principal factor que

determina las características de la radiación solar al nivel de la tierra. En los primeros 80 kilómetros de la atmósfera es donde transcurre la mayor parte de los fenómenos que convierten a esta capa gaseosa en un medio atenuador de la radiación solar. Los principales fenómenos que ocurren sobre la radiación solar debido a la composición de la atmósfera son la absorción y la dispersión o *scattering* de la radiación solar. Los componentes de la atmósfera se convierten en nuevos emisores de energía cuando incide sobre ellos la radiación solar, de manera que parte de esta energía captada es de nuevo radiada en todas direcciones debido al fenómeno de dispersión. También, los componentes de la atmósfera se pueden convertir en verdaderos sumideros de energía gracias al fenómeno de la absorción, proceso que origina distintas reacciones químicas con el fin de mantener el equilibrio atmosférico como es el caso del ciclo del ozono (Jutglar, 2004). Cuando la radiación solar ingresa a la atmósfera terrestre, una parte de la energía incidente es eliminada por dispersión y otra por absorción. Ambos influyen en el espectro de radiación solar cambiando considerablemente el espectro de energía solar que pasa a través de la atmósfera, generando el flujo de energía correspondiente a la radiación solar global; a nivel terrestre se generan dos flujos de energía distintos los cuales se clasifican como las respectivas componentes de la radiación solar global denominadas radiación solar directa y radiación solar difusa (Jutglar, 2004).

La componente directa corresponde a la radiación solar global que no ha sido interferida por la atmósfera terrestre y que tiene una dirección perfectamente definida mediante la cual recorre una línea recta directamente

desde el disco solar hasta incidir sobre el nivel del suelo de la superficie terrestre. En cambio, la componente difusa representa a la radiación solar global que ha sufrido procesos de dispersión por los componentes de la atmósfera y proviene de todos los puntos de la bóveda celeste. Una parte de la radiación solar difusa vuelve al espacio y otra parte incide sobre el suelo de la superficie terrestre (Castro Diez Y. 1986).

La conducta de la radiación solar, sobre la superficie terrestre está determinado a través de la siguiente expresión matemática (Ec. 26).

$$R_g = R_{dir} + R_{dif} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde  $R_g$  es la radiación solar global,  $R_{dir}$  representa a la radiación solar directa y  $R_{dif}$  es la radiación solar difusa. Si bien, esta relación 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 (Jutglar, 2004).

### **3) Métodos directos de estimación de radiación solar**

Para ciertas condiciones astronómicas dadas, la variabilidad del estado atmosférico a lo largo de un determinado día es tan amplia que la radiación solar global puede estimarse procesando la información disponible sólo en términos estadísticos. De esta manera, se manejan valores medios

observados de la radiación solar para la localización de interés. Sin embargo, para entender el cálculo de la radiación solar global es conveniente introducir algunos conceptos básicos que ayudarán a simplificar y comprender la nomenclatura utilizada y su significado físico. En este sentido es necesario considerar dos términos denominados, irradiancia solar global e irradiación solar global, que por lo general suelen ser confundidos, a pesar de que sus respectivos significados son estrictamente distintos (Jutglar, 2004).

**La irradiancia solar global  $R_g$**  es definida como la energía incidente sobre la unidad de superficie terrestre en la unidad de tiempo, cuya unidad normalmente empleada es el  $[W m^{-2}]$ . Por otro lado, la irradiación solar global es la energía recibida por la unidad de superficie terrestre durante un período de tiempo determinado y se obtiene promediando el valor de la irradiancia solar global a lo largo de dicho período de tiempo (Atlas Energía Solar del Perú, 2003).

Si el período de tiempo corresponde a una hora, la irradiación solar global se representa por la letra  $I_g$ , donde la unidad habitualmente utilizada es el  $[W m^{-2} h^{-1}]$ . En tanto que, si dicho período corresponde a un día, la irradiación solar global se representa por la letra  $H_g$ , en cuyo caso la unidad aplicada comúnmente es el  $[W m^{-2} día^{-1}]$ .

Cabe señalar que, los datos de irradiación horaria y diaria son normalmente utilizados en aquellos procesos de simulación de disponibilidad del recurso solar, en los cuales se requiere de un estudio exhaustivo para evaluar el comportamiento esperado. Estas simulaciones recurren principalmente a los

valores medios de irradiación horaria y diaria, sin embargo, aunque los resultados pueden llegar a ser fiables, no se justifica normalmente el enorme caudal de información que es necesario manejar.

Sin embargo, generalmente se habla de la irradiación solar diaria para un mes determinado, lo cual debe entenderse como el valor de la radiación solar global calculado como el valor medio de los valores diarios de la radiación global durante dicho mes y durante varios años. En este sentido, existe una fórmula matemática sencilla desarrollada para determinar la irradiación solar global sobre una superficie horizontal durante un período de tiempo de un mes, obteniendo valores promediados del espectro de radiación electromagnética sobre todas las longitudes de onda. Por lo tanto, la irradiación solar global media mensual diaria multianual disponible en una determinada localidad se caracteriza por 12 promedios mensuales de radiación solar global diaria durante varios años (Jutglar, 2004).

La metodología para la evaluación de la radiación solar global depende del tipo de información disponible, por lo tanto, lo mejor es instalar un grupo de instrumentos capaces de medir la radiación solar global durante varios años. El pirheliómetro y el piranómetro son aparatos comúnmente empleados en la medición de la radiación solar sobre la superficie terrestre. Los pirheliómetros son instrumentos empleados para medir la intensidad e incidencia normal de la radiación solar directa emitida por el disco solar. En cambio, los piranómetros son instrumentos empleados para medir la cantidad de la radiación solar global considerando tanto la componente directa como difusa (Atlas Energía Solar del Perú, 2003).

#### 4) Métodos empíricos de estimación de la radiación solar

A inicios del siglo XX se establecieron fórmulas simples, que permitieron estimar la radiación solar global que incide sobre la superficie, a partir de la radiación solar extraterrestre y el estado de la atmósfera. Uno de los modelos más antiguos es de Angstrom (1924, citado por Atlas Solar del Perú, 2003) que estima la densidad de flujo diario de radiación global a partir de la siguiente regresión lineal simple (Ec. 27).

$$\frac{H_g}{H_e} = a + b \cdot \left( \frac{n}{N} \right) \quad \text{Ec. 27}$$

Donde  $H_g$  representa la radiación solar global,  $H_e$  es la radiación solar extraterrestre,  $n$  las horas de sol real y  $N$  es la duración teórica del día. Además, los coeficientes "a" y "b" están asociados al tipo de nubes y a las condiciones que determinan la turbidez de la atmósfera. Angstrom, después de haber analizado estos coeficientes, sugirió los valores de 0,2 para el coeficiente "a" y de 0,5 para el coeficiente "b" (Atlas Solar del Perú, 2003). Los coeficientes  $a+b$  representan el valor máximo de la transmisibilidad de la atmósfera ( $t$ ) mientras que el coeficiente  $a$  representa el mínimo valor de  $t$  (Atlas Energía Solar del Perú, 2003). El Atlas Solar utilizó la información a nivel diario de las estaciones de base con instrumentación piranométrica y actinométrica. Se calcularon los valores de  $H_0$  y  $N$  y se procedió a estimar los coeficientes empíricos por estación, se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2**

Valores de los coeficientes del modelo Angstrom – Prescott por estación.

<b>ESTACIÓN METEOROLÓGICA</b>	<b>a</b>	<b>B</b>	<b>Número de datos</b>	<b>Error (%)</b>
<b>COSTA</b>				
Miraflores	0.355	0.392	3681	-2.4
A, Von Humboldt	0.211	0.467	12186	12.9
San Camilo	0.321	0.468	2241	-0.4
La Joya	0.593	0.181	7534	2.8
<b>SIERRA</b>				
Bambamarca	0.322	0.336	2697	6.6
Weberbauer	0.231	0.521	1859	-2.7
Cosmos	0.32	0.384	929	7.4
Huayao	0.397	0.379	6285	2.2
Granja Kcayra	0.376	0.364	2199	3.4
Chuquibambilla	0.395	0.384	1892	-2.1
Puno	0.378	0.438	2805	9.2
Characato – La Pampilla	0.367	0.396	1220	10.7
<b>SELVA</b>				
San Ramón	0.301	0.377	2742	6.6
El Porvenir	0.278	0.32	1613	7
Bellavista	0.355	0.341	714	5.9

**Fuente.** Atlas Energía Solar del Perú, 2003

Así también, para estimar la radiación solar a través de un modelo estadístico, algunos han considerado el efecto que producen los rayos solares sobre la amplitud térmica. 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 se pierde en el espacio como radiación en onda larga, bajando así la temperatura del aire hasta su valor mínimo, valor que se alcanza antes del amanecer. Esta explicación física justifica el hecho del uso de modelos para estimar la irradiación solar en función de la

temperatura, pero con la ventaja de una gran red de estaciones que realizan este tipo de mediciones (Atlas Energía Solar del Perú, 2003).

Dada esta descripción, Bristow – Campbell, 1984, (Atlas Energía Solar del Perú, 2003) desarrollaron un modelo (Ec. 28) para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas. Dentro de los modelos existentes, Baigorria *et al.* (2004) se llegó a la conclusión que el modelo Bristow – Campbell era el que mejor se adecuaba a las condiciones meteorológicas del Perú.

Este modelo sugiere la estimación de la transmisividad o irradiación solar relativa ( $H/H_0$ ) en función de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínimas ( $\Delta T$ , °C):

$$\frac{H_g}{H_e} = a \cdot \left( 1 - e^{-b \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^c} \right) \quad \text{Ec. 28}$$

Donde  $H_g$  representa la radiación solar global,  $H_e$  es la radiación solar extraterrestre,  $T_{m\acute{a}x}$  corresponde a la temperatura máxima y  $T_{m\acute{i}n}$  es la temperatura mínima. Además, los valores descritos para cada coeficiente son de 0,7 para el coeficiente "a", entre 0,004 y 0,010 para el coeficiente "b" y 2,4 para el coeficiente "c". En este caso, los valores empíricos ( $a_B$ ,  $b_B$  y  $c_B$ ) tienen también un significado físico;  $a_B$  representa el máximo valor de  $t$  que es característico de cada área de estudio y además depende de la contaminación atmosférica y de la altitud;  $b_B$  (°C<sup>-1</sup>) y  $c_B$  determinan el efecto del incremento de  $\Delta T$  sobre la máxima  $t$  de la atmósfera (Mesa y Varas, 2000; citado por Atlas Energía Solar del Perú, 2003).

La tabla 3, da los valores de los coeficientes del modelo Bristow – Campbell determinados para cada una de las estaciones evaluadas en este estudio, así como su error promedio. Es necesario recalcar que el valor del coeficiente **ab** corresponde a la sumatoria de los coeficientes **a** y **b** encontrados para el modelo Ångström – Prescott mostrados en la Tabla 3 debido a que tienen exactamente el mismo significado físico.

**Tabla 3**

Valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación, número de datos y error promedio (Baigorria *et. al.*, 2004)

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	<b>ab</b>	<b>b<sub>B</sub></b> °C <sup>-1</sup>	<b>cb</b>	Número de datos	Error (%)
<b>COSTA</b>					
Miraflores	0.75	0.04	1.49	3597	3.8
A, Von Humboldt	0.68	0.06	1.42	13712	14.1
San Camilo	0.79	0.09	1.05	2244	3.9
<b>SIERRA</b>					
Bambamarca	0.66	0.23	0.8	2033	12.6
Weberbauer	0.75	0.04	1.28	1607	3.2
Cosmos	0.7	0.03	1.62	773	8.5
Huayao	0.78	0.11	0.97	5387	4.6
Granja Kcayra	0.74	0.11	0.92	1961	11.6
Chuquibambilla	0.78	0.19	0.76	1476	3.6
Puno	0.82	0.2	0.87	2156	7.2
Characato – La Pampilla	0.76	0.16	0.91	3134	7.5
<b>SELVA</b>					
San Ramón	0.68	0.02	1.86	2864	7.5
El Porvenir	0.6	0.06	1.21	2346	4.1
Bellavista	0.7	0.08	1.22	1038	2.3

**Fuente.** Atlas Solar del Perú, 2003

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciadas por la topografía, latitud ( $\phi$ ) y altitud, entre otros factores (Baigorria *et al.*, 2004), los coeficientes **b<sub>B</sub>** y **cb** 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 con las Ec. 29 y Ec. 30 (Baigorria *et. al.*, 2 004; citado por el Atlas Solar del Perú, 2003).

$$C_B = 2.116 - 0.072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57.574 e^{\phi} \quad \text{Ec. 29}$$

$$b_B = 0.107 C_B^{-2.6485} \quad \text{Ec. 30}$$

**i) Instrumental de medición de la irradiación solar**

La radiación solar expuesta en la superficie terrestre abarca un espectro visible con longitudes de onda entre 0,4 y 0,7  $\mu\text{m}$ , una parte del ultravioleta entre 0,3 y 0,4  $\mu\text{m}$ , y también el infrarrojo entre 0,7 y 5  $\mu\text{m}$ . Esta irradiación solar llega a la superficie terrestre en dos formas, como irradiación solar directa e irradiación solar difusa, y estos dos tipos de irradiación constituyen la irradiación solar global (Muñoz, 2005).

Las longitudes de onda de la irradiación solar están expuestas a ser medidas con fines meteorológicos, las cuales son utilizadas en forma más general, estos son los siguientes (Muñoz, 2005):

- Irradiación solar directa medida a incidencia normal.
- Irradiación solar global recibida sobre una superficie horizontal.
- Irradiación solar difusa.
- Irradiación solar (directa, global y difusa) medidas en porciones

La clasificación de los instrumentos meteorológicos, algunos se basan a criterios de estandarización, otros lo clasifican de acuerdo a su grado de calidad y duración ya que estas están expuestas a diferentes ambientes climáticos.



**Figura 8.** Instrumentos de medición de diferentes tipos de Radiación solar- Global, Directa y Ultra Violeta. Muñoz, 2005.

#### **j) Instrumentos utilizados para las mediciones solares**

- **Piranómetro.** Instrumento que mide la irradiación solar global (directa y difusa) en el plano horizontal. El elemento receptor debe estar horizontal y expuesto al hemisferio celeste, pero debe estar protegido de la irradiación que regresa del suelo y los alrededores.

Los piranómetros usan sensores termoeléctricos, fotoeléctricos, piroeléctricos. Tales instrumentos son usados para medir irradiación a escala diaria, horaria o menor, lo que va a depender más de la programación del instrumento de adquisición de datos. Las propiedades de los piranómetros en relación a su grado de precisión y confiabilidad son: sensibilidad, estabilidad, tiempo de respuesta, linealidad, respuesta de temperatura y respuesta espectral (Muñoz, 2005).



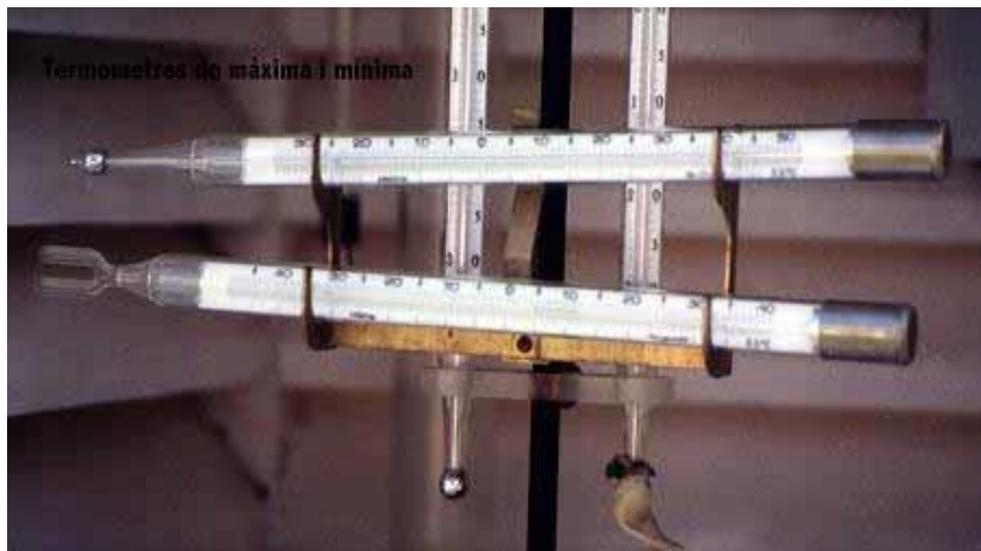
**Figura 9.** Piranómetro Kipp & Zonen. Atlas Energía Solar del Perú, 2003

La medición de la Irradiación solar difusa se realiza con el piranómetro sobre un plano horizontal y dando al instrumento una serie de recursos móviles o fijos para evitar que la irradiación directa alcance al receptor. El tipo movable consiste de un pequeño disco impulsado por un montaje ecuatorial que va haciendo una sombra bien definida sobre el receptor. El tipo fijo consiste de un anillo o armadura que sombrea al receptor, éste le confiere estabilidad, pero deben introducirse correcciones por la pérdida de irradiación difusa debido a los bordes del anillo (Muñoz. 2005).

**k) Instrumental de temperaturas extremas**

Para la medición de la temperatura es el termómetro. Existen varios tipos de termómetros que se diferencian en el elemento sensible y por ende en el grado de precisión. Dentro de los diferentes tipos de termómetros encontramos los termómetros de máximas y mínimas que están destinados a registrar las temperaturas máximas y mínimas en el día.

- **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.
- **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.



**Figura 10.** Termómetro de máxima (superior) y termómetro de mínima (inferior). Atlas Energía Solar del Perú, 2003.

#### 1) **Uso de la energía solar en el Perú**

El uso de los datos de energía solar, hoy en día es muy importante estos datos para el diseño de muchos equipos y modelos matemáticos. En la actualidad a nivel nacional y mundial, este recurso energético es tema de investigación de

muchos investigadores con el fin de que sirva de base para la aplicación de tecnologías que utilizan la energía solar como fuente de energía. El planeamiento comprende la estimación del rendimiento futuro del equipo solar, lo cual comúnmente se conoce como evaluación del recurso. En su forma más simple, ello comprendería la estimación de la radiación solar global anual y mensual sobre una región particular y decidir, por ejemplo, si sobre esa base es viable el servicio de calentamiento de agua doméstica (Horn M. 2006).

El planeamiento de utilización de la energía solar tenderá en un futuro próximo a la formulación de políticas nacionales sobre qué métodos, si los hay, deberían ser seguidos para hacer una simple selección del mejor equipo para un propósito particular, cuando y donde instalarlo (Horn M. 2006).

**m) Red de medición e información utilizada**

Una red de radiación solar mide la radiación solar global, que es la irradiancia que incide en forma horizontal en la superficie terrestre. Pero, como los componentes de la radiación solar no son independientes se pueden realizar otras mediciones y así obtener una componente requerida. Estas radiaciones se miden por radiómetros, piranómetros, pirheliómetros, pirgeómetros, y pirradiómetros. Ellos también son mediciones de satélites y de observaciones meteorológicas (Horn M. 2006).

El Perú tiene una red de medición de irradiación solar mediante el SENAMHI, dado en el Atlas de Energía Solar del Perú, está compuesta de estaciones con piranómetros, equipo de precisión que registra directamente la irradiación solar; actinógrafos, equipo registrador no tan precisos pero que brindan un valor aproximado de irradiación solar; y, con heliógrafos, instrumentos con los

que se estima de forma indirecta la irradiación solar a través de las horas de duración del brillo solar.

Se cuenta también con estaciones meteorológicas automáticas, que son parte del programa de mediciones de irradiación solar cuyos datos están siendo utilizados para la validación de los datos históricos existentes, así como para el levantamiento de datos en lugares críticos sin información.

La mayoría de las estaciones climatológicas utilizadas cuentan con datos de heliofanía (brillo solar), pero sobre todo con un buen período de registro de datos de temperaturas extremas y precipitación, lo que ha permitido extender información de irradiación solar.

El período seleccionado para la elaboración de los mapas del Atlas de Energía Solar del Perú fue de 1975 a 1990, período que se tomó como base para la cuantificación y tabulación de los datos meteorológicos de las estaciones utilizadas (Atlas Energía Solar de Perú, 2003).

#### **n) Estimación de la irradiación solar en el Perú**

Por la poca disponibilidad de los datos de radiación solar, los investigadores han optado por desarrollar modelos y ecuaciones que permitan estimar esta variable a partir de otras, como son temperatura, humedad relativa, nubosidad, pluviosidad y horas de sol (Silva. 2012).

En el Atlas de Energía Solar del Perú se han utilizado principalmente los modelos de Ångström – Prescott y Bristow – Campbell. De estos, el modelo Bristow – Campbell es el que mejor se adecuaba a las condiciones del Perú (Baigorria *et al.*, 2004). Este modelo sugiere estimar la irradiación solar

relativa ( $H/H_0$ ) en función de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínimas ( $\Delta T$ , °C).

El modelo de procesos para interpolar temperaturas máximas y mínimas (Baigorria y Bowen, 2004) fue elaborado para territorios complejos de montaña donde las variaciones micro climáticas son muy grandes y donde los métodos tradicionales de interpolación geo estadística tienen muchos problemas debido a la escasa densidad de información, siendo incapaces de representar las variaciones reales existentes en esta región (Baigorria *et al.*, 2004).

**o) Distribución espacial y temporal de la energía solar en el Perú**

En el Perú, las condiciones orográficas, climáticas y oceanográficas, entre otras, determinan la existencia de tres grandes regiones naturales: Costa, Sierra y Selva. La Costa es la región limitada por el Océano Pacífico y las laderas andinas por debajo de los 2000 msnm. La Sierra es la región de la Cordillera de los Andes, caracterizada por la presencia de cumbres y montañas con alturas de hasta 6000 msnm. La selva es la región formada por dos zonas, el bosque tropical amazónico o selva baja y las pendientes y valles al este de los Andes bajo los 2000 msnm conocidos como selva alta (Atlas solar del Perú. 2003).

**p) Distribución anual de energía solar**

La distribución de energía solar al año, determina qué, la zona de mayor potencial de energía solar del Perú se encuentra principalmente en la costa sur ( $16^\circ$  a  $18^\circ$  S), donde se dispone de 6,0 a 6,5 kWh/m<sup>2</sup>. Otras zonas que registran alta disponibilidad de energía solar diaria, entre 5,5 a 6,0 kWh/m<sup>2</sup> son la costa norte ( $3^\circ$  a  $8^\circ$  S) y gran parte de la sierra sobre los 2500 msnm, siendo en orden

de importancia en cuanto a su extensión superficial: la sierra sur, la sierra central y la sierra norte.

La zona de bajos valores de energía solar en el territorio es la selva, donde se registran valores de 4,5 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup> con una zona de mínimos valores en el extremo norte cerca del ecuador (0° a 2° S). Es importante acotar que la mayor variación anual (desviación estándar) de los valores de energía solar recibida en la superficie está en la costa sur, seguido en orden de magnitud por la costa central, selva norte, costa norte y sierra sur. Las zonas de menor variación anual son la selva central y sur, la sierra central y parte de la sierra norte (Atlas Solar del Perú, 2003).

**q) Distribución estacional del sol**

Durante el verano austral (diciembre a marzo) el sol se encuentra irradiando el hemisferio sur con mayor intensidad, sin embargo, este hecho no se traduce en los mapas, especialmente en la parte norte y central de la sierra, y selva (0 a 10° S y 70 a 79° W), las mismas que presentan valores relativamente bajos de energía solar, no obstante la considerable altitud de las zonas montañosas que determinan una menor absorción de la radiación al atravesar un menor espesor atmosférico; esto se debe a la interacción de los principales controladores climáticos que determinan la llegada y/o formación en el territorio peruano de sistemas nubosos que originan las lluvias en esta época (época lluviosa), lo que genera una sustancial disminución de la transmisividad atmosférica sobre toda esta región. Durante el invierno, la energía solar recibida disminuye en general en todo el territorio debido a que el sol, se encuentra irradiando más intensamente el hemisferio norte (solsticio de invierno). (Barros, V. 2005).

En primavera, el sol inicia su retorno en su marcha aparente hacia el hemisferio sur, determinando disminución de la humedad atmosférica en este hemisferio debido a la ausencia de nubosidad y de lluvias (condiciones de estiaje o estación seca) en la sierra, por lo que la transmisividad de la atmósfera alcanza sus máximos valores, registrándose consecuentemente los más altos valores (máximos) de energía solar diaria recibida en la región en el mes de noviembre. Asimismo, la región de selva alcanza también sus mayores valores en este mes, especialmente la selva norte. La sierra sur y parte de la central, dan altos valores de energía solar, presentándose los máximos a fines de primavera y durante el verano, esto se debe a que se encuentra menos influenciada por los controladores climáticos que generan los sistemas nubosos. (Barros, V. 2005).

**Tabla 4**

Radiación Solar de algunos departamentos del Perú

<b>Departamento</b>	<b>Radiación promedio anual [kWh/m<sup>2</sup>-año] según OLADE</b>	<b>Intervalo de radiación promedio anual [kWh/m<sup>2</sup>-año] según SENAMHI</b>
Amazonas	4,5	4,88 – 5,38
Ancash	5,1	5,13 – 5,63
Apurímac	4,8	5,38 – 5,88
Arequipa	5,3	5,63 – 6,13
Ayacucho	4,8	5,38 – 5,88
Cajamarca	4,5	5,0 – 5,5
Cusco	4,4	5,13 – 5,63
Huancavelica	4,5	5,38 – 5,75
Huánuco	4,3	4,75 – 5,25
Ica	4,6	5,5 – 6,0
Junín	4,7	5,13 – 5,63
La Libertad	4,8	5,13 – 5,63
Lambayeque	5,0	5,5 – 6,0
Lima	3,9	5,13 – 5,63
Loreto	3,9	4,63 – 5,13
Madre de Dios	3,9	4,75 – 5,25
Moquegua	5,3	5,75 – 6,25
Pasco	4,1	4,88 – 5,38
Piura	4,4	5,63 – 6,73
Puno	5,1	5,38 – 5,88
San Martín	4,0	4,63 – 5,13
Tacna	5,3	5,75 – 6,25
Tumbes	4,4	5,75 – 6,25
Ucayali	3,3	4,63 – 5,13
<b>Promedio</b>	<b>4,5</b>	<b>4,76 - 5,72</b>

**Fuente:** OLADE, 1992; SENAMHI, 2003. citado por CENERGIA, 2004

**r) Energía y medio ambiente**

El aprovechamiento de la energía solar, como fuente de energía útil tiene un doble objetivo: por un lado, ahorrar las energías no renovables, sobre todo la energía fósil y la energía nuclear, y por otro lado amortiguar el impacto ambiental generado por ellas (Jutglar, 2004).

Córdova, E. (2009), nos da a conocer la problemática de la energía y el medio ambiente de la siguiente manera: El problema fundamental a resolver es el de las exigencias crecientes en materias medio ambientales, que están formuladas a los procesos energéticos que no se transformen en una dificultad adicional infranqueable frente al abastecimiento energético el crecimiento económico.

Por lo que se refiere a la polución atmosférica, las dos cuestiones más relevantes son la lluvia acida y el efecto invernadero. La polución térmica, como impacto local, es menos importante. Según los expertos del Grupo Internacional para el cambio climático IPCC, los medios técnicos para reducir las emisiones del efecto invernadero se encuentran en:

- La sustitución de combustibles que generan un alto nivel de emisión de óxido de carbono, fuelóleo y carbón, sobre todo, por gas natural, cuyo nivel de emisiones es sensiblemente menor, del orden de la mitad de CO<sub>2</sub> por unidad de energías desprendida.
- La reducción del consumo de combustible fósiles mediante el recurso a fuentes de energía tales como la nuclear y las energías renovables (sistemas sin combustión).
- La incorporación, en la proporción necesaria, de estas soluciones tecnológicas tendrán que estar estimuladas por medidas de carácter

económico y político. Ello supondrá la necesidad de acuerdos marco internacional y transferencia de tecnologías a los países menos desarrollados.

Por otra parte, hay otras cuestiones complementarias que deben ser objetos de meditación en este campo:

- Las energías renovables, de las que no cabe esperar una aportación masiva, tampoco están exentas de problemas, entre que acabe destacar el impacto de la contaminación visual y acústica, así como la exigencia de considerables extensiones territoriales para su desarrollo.

El gas natural presenta un gran atractivo desde un punto de vista medio ambiental pero no resuelve la totalidad de problemas que plantea la emisión de dióxido de carbono.

### **2.3. Definición de términos básicos**

#### **a) Radiación solar**

Energía radiante producida en el Sol, resultado de reacciones nucleares de fusión que llegan a la Tierra a través del espacio en paquetes de energía llamados fotones (luz), que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. (Iqbal, M. 1983).

#### **b) Energía solar**

El Sol es una gran esfera de gases incandescentes, está formada por diversas capas alrededor de su núcleo, se trata de un cuerpo completamente gaseoso, el hidrógeno constituye aproximadamente las tres cuartas partes del Sol, y el helio una cuarta parte, con otros elementos en pequeñas proporciones. La cantidad total de materia solar es pequeña comparada con la cantidad de espacio que

ocupa, esto significa que la densidad global del Sol es baja, no obstante, en el núcleo la materia es tan densa que un objeto del tamaño de una nuez podría pesar más que una sandía (Iqbal, 1983).

El calor y la luz que produce el Sol provienen de la fusión nuclear, un proceso que une los núcleos de los átomos más ligeros para convertirlos en otros más pesados. Las reacciones de fusión convierten también la masa en energía. Bajo una presión que es de 200 000 millones superior a la de la superficie terrestre, en el núcleo del Sol el hidrógeno se transforma en helio mediante el proceso de fusión, convirtiendo cada segundo de tres a cuatro millones de toneladas métricas de masa en energía. El resultado neto de este proceso es que cuatro núcleos de hidrógeno se combinan para formar un núcleo de helio, y la energía surge en forma de radiaciones. (Iqbal. 1983)

**c) Radiación electromagnética**

La radiación es la transmisión de ondas o partículas en el espacio. Las ondas y las partículas tienen muchas características comunes, la radiación suele producirse en una de estas dos formas, por eso se encuentran otros tipos de radiación dependiendo de su comportamiento en el espacio. Una es la radiación electromagnética que son ondas dadas por una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, perpendiculares entre sí y a la vez perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, los cuales se propagan en el espacio emanando energía de un lugar a otro. (Levich, 1995).

**d) Constante solar**

La radiación emitida por el Sol y las relaciones espaciales con la Tierra conducen a una intensidad de radiación en el límite exterior de la atmósfera

terrestre prácticamente constante, que es lo que se conoce como constante solar **Isc**. Esta variable describe la intensidad máxima de energía solar en todas las longitudes de onda que por unidad de tiempo 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, 1976).

**e) Declinación solar**

El movimiento de rotación que produce el día y la noche lo realiza la Tierra sobre si misma alrededor de un eje conocido como eje polar, el cual está inclinado aproximadamente  $23.5^\circ$  con respecto a la normal al plano eclíptico. A lo largo del año el ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico permanece sin variación, lo mismo es válido para el ángulo entre el plano ecuatorial terrestre y el plano eclíptico. Pero, el ángulo que existe entre el plano ecuatorial terrestre y la línea que une los centros del Sol y la Tierra cambia cada día. Este ángulo se explica por la letra **d** se denomina declinación solar y es la inclinación que presenta el eje en torno al cual gira la Tierra (Iqbal, 1983).

**f) Luz solar**

No hay ningún aspecto del mundo en el que vivimos que no esté influenciado por el sol. Desde la fotosíntesis hasta nuestro estado de ánimo, están condicionados por dicho astro. No es de extrañar, el papel central que juega la radiación solar en nuestra vida diaria. A pesar de ello, no todos los aspectos de

dicha radiación son positivos; ya que, existen unos efectos etéreos causados por la naturaleza intrínseca de la radiación solar.

El sol emite diversos tipos de radiaciones: rayos X, radiaciones ionizantes, radiación ultravioleta (RUV), luz visible, radiaciones infrarrojas y otras.

Desde el punto de vista fotobiológico el espectro solar en la superficie terrestre (nivel del mar) está formado por radiaciones con longitudes de onda de energía electromagnética comprendida entre 290 y 3000 nm. Y debido a esta gran diversidad, desde el punto de vista de la práctica clínica se considera que el espectro solar está formado por: radiación ultravioleta (290-400 nm), luz visible (400-760 nm) y radiaciones infrarrojas (>1800 nm). (Iqbal. 1983).

La proporción de cada una de las radiaciones es la siguiente: 40% luz visible, 50% radiación infrarroja, 10% radiación ultravioleta.

#### **g) Radiación ultravioleta**

La radiación ultravioleta (UV) es la componente de la radiación solar cuya longitud de onda es inferior a 400 nm. Si se analiza el espectro global de la radiación incidente (Figura 13), se observa que la contribución de esta componente es, en términos relativos, bastante pequeña. Concretamente, representa sólo un 8.3 % del espectro solar extraterrestre (Iqbal. 1983) y un 5% de la radiación que llega a la superficie de la Tierra. Sin embargo, aunque la cantidad de energía aportada resulte escasa en comparación con la contribución solar en general, de acuerdo con la ley de Planck  $\Delta E = hv$ , los fotones asociados a la radiación ultravioleta resultan ser los más energéticos, lo que determina que sus efectos sean más intensos y específicos.

Generalmente, la componente ultravioleta se considera subdividida normalmente en tres bandas específicas cuya anchura y denominación dependen del campo de interés. Desde el punto de vista de los efectos biológicos y sabiendo que cuanto más corta es la longitud de onda de cada una de estas subregiones, mayor energía tendrá la radiación, se pueden distinguir 3 bandas, cuyos límites aproximados son:

**UV-A:  $320 (315) < \lambda < 400 \text{ nm}$** , denominada luz negra o ultravioleta larga. Es la continuación de la región visible y es la menos energética; sin embargo, debido a su gran intensidad (es la que llega en mayor cantidad a la Tierra puesto que casi todos los rayos UV-A atraviesan la capa de ozono), ejerce una gran influencia en la Tierra.

**UV-B:  $280 < \lambda < (320) 315 \text{ nm}$** , radiación ultravioleta media. Llega a la Tierra muy atenuada por la capa de ozono y es muy sensible a las condiciones meteorológicas y cambios en la concentración de ozono. Puede resultar muy nociva para la vida en general por lo que, el actual deterioro de la capa de ozono que absorbe la mayor parte de los rayos UV-B provenientes del Sol, aumenta la amenaza de este tipo de radiación.

**UV-C:  $200 < \lambda < 280 \text{ nm}$** , radiación ultravioleta corta o germicida. Es la más peligrosa para el hombre por su gran energía. Afortunadamente, el oxígeno y el ozono de la estratosfera absorben todos estos rayos UV-C (Iqbal, 1993).

#### **h) Medidas de radiación**

Los radiómetros solares son los instrumentos utilizados para medir la radiación solar, y tienen como objetivo medir la energía asociada a la radiación incidente sobre un plano con una orientación dada, así como dar información acerca de

la distribución espectral y espacial de dicha energía. Estos instrumentos suelen convertir la energía de la radiación incidente en otra forma de energía que se pueda medir convenientemente mediante el empleo de sensores.

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar una magnitud física en una señal eléctrica o digital, de más fácil lectura y almacenamiento. Los sensores más utilizados en los instrumentos de medida de la radiación solar son los termoeléctricos y los fotoeléctricos. Un sensor termoeléctrico consiste en la unión por sus extremos de dos metales diferentes (termopar). Una de las uniones está conectada térmicamente a una superficie metálica pintada de negro y la otra unión se mantiene en contacto con una superficie metálica protegida de la radiación. (Iqbal. 1983).

**i) Efecto fotovoltaico**

El efecto fotovoltaico se produce cuando el material de la celda solar (silicio u otro material semiconductor) absorbe parte de los fotones del sol. El fotón absorbido libera a un electrón que se encuentra en el interior de la celda. Ambos lados de la celda están conectados por un cable eléctrico, así que se genera una corriente eléctrica. (Castro. 2008).

**j) Energía solar térmica**

Energía solar térmica, resulta de la conversión de la radiación solar para aplicaciones térmicas, es decir con procesos de diferencias de temperatura. Una instalación solar térmica se define como aquella que está constituida por un conjunto de componentes encargados de realizar las funciones de captar la radiación solar, transformarla directamente en energía térmica cediéndola a un fluido de trabajo y, por último, almacenar dicha energía térmica de forma

eficiente, bien en el mismo fluido de trabajo de los captadores, o bien transferirla a otro, para poder utilizarla después en los puntos de consumo. (Castro, 2008).

**k) Terma solar**

Una terma solar consta de uno o más colectores, así como de un tanque de almacenamiento aislado; está diseñada para ser utilizada en casas, hospitales, lavanderías, etc. El mecanismo de operación de una terma solar es el siguiente: La luz solar es absorbida por una superficie de color negro cubierta por láminas de vidrio, que por ende se calientan. A su vez, si aire o agua recorren o pasan a través de esta superficie caliente, éstos también se calentarán. Así, el calor podrá ser transportado a donde sea necesario. Este es, en resumen, el principio de una terma solar. (CER-UNI, 2013).

**l) Colector solar**

Un captador solar, también llamado colector solar, es cualquier dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica. Los colectores se dividen en dos grandes grupos: los captadores de baja temperatura, utilizados fundamentalmente en sistemas domésticos de calefacción y ACS, y los colectores de alta temperatura, conformados mediante espejos, y utilizados generalmente para producir vapor que mueve una turbina que generará energía eléctrica. (CER-UNI, 2013)

**m) Potencia del sol**

La potencia solar que recibe la Tierra (fuera de la atmósfera) es de  $173 \times 10^{12}$  kW o una energía de  $15 \times 10^{17}$  kWh/año. Al cruzar la atmósfera, cerca del 53% de esta radiación es reflejada y absorbida por el nitrógeno, oxígeno, ozono,

dióxido de carbono, vapor de agua, polvo y las nubes; por ello al pasar esta radiación por una distancia de 150 millones de km, se reduce esta cantidad y al final el planeta recibe energía promedio a  $3 \times 10^{17}$  kWh/año, equivalente a 4000 veces el consumo del mundo entero en un año ( $7 \times 10^{13}$  kWh/año), lo cual nos indica la enorme potencia del Sol. (Iqbal. 1983).

**n) Temperatura**

Es el nivel de energía calorífica de un cuerpo. Para el suelo, esta energía influye en numerosos procesos físicos, químicos y biológicos que se producen y que condicionan el desarrollo del biotopo y la biocenosis del ecosistema suelo (Centro Español de metrología. 1990). Por ejemplo, la nitrificación no se produce con temperaturas inferiores a 4,5 °C, la germinación raramente se produce por debajo de 5 °C (Rondón, F. 1986) y las bajas temperaturas en el suelo inhiben la modulación en leguminosas. La temperatura influye en la disponibilidad de agua para las plantas, la descomposición de la materia orgánica (menor a bajas temperaturas), la intensidad de biodegradación de pesticidas o la meteorización física, influida por los procesos de hielo-deshielo (Rondón, F. 1986). Es un factor esencial para muchos modelos aplicados a ecosistemas agrarios, y su predicción o conocimiento permite estimar el crecimiento de las plantas, la respiración de microorganismos, o la mineralización de nutrientes en un suelo determinado (Rondón, F. 1986).

## **2.4. Formulación de la hipótesis**

### **2.4.1. Hipótesis general**

El modelo de Bristow – Campbell mediante las temperaturas extremas, influye en la estimación de la radiación solar global diaria media mensual en la región Pasco.

### **2.4.2. Hipótesis específicas**

- El desarrollo adecuado del modelo Bristow – Campbell mediante las temperaturas extremas, es funcionable en la Región Pasco.
- El modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual es adaptable a la Región Pasco.
- La aplicación adecuada del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar por estaciones en la región Pasco, es a través de analogías con la región Junín.

## **2.5. Identificación de las variables**

- **Variable Dependiente**

$Y =$  Radiación solar global

- **Variables independientes**

Temperaturas extremas:  $x_1, x_2$

$X_1 =$  Temperaturas máximas

$X_2 =$  Temperaturas mínimas

- **Variables intervinientes**

- ✓ Altitud de la localidad

- ✓ Latitud de la localidad

- ✓ Coeficientes

## 2.6. Definición operacional de variables e indicadores

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGIA
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b></p> <p>¿Cuál es la estimación de la radiación solar global media mensual mediante el modelo Bristow – Campbell en la región Pasco?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b></p> <p>¿Cuál es funcionalidad adecuada del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual adaptable a la Región Pasco?</p> <p>¿Cuál es la adaptación adecuada del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual en la Región Pasco?</p> <p>¿Cuál es la aplicabilidad de la radiación solar global media mensual, obtenida mediante el modelo Bristow – Campbell por estaciones en la región Pasco?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Estimar la radiación solar global diaria media mensual mediante el modelo de Bristow-Campbell en la Región Pasco.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</b></p> <p>Comprobar la funcionalidad del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global media mensual adaptable a la Región Pasco.</p> <p>Demstrar la adaptación del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global media mensual en la Región Pasco.</p> <p>Aplicar el modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual adaptable a la Región Pasco.</p>	<p><b>GENERAL:</b></p> <p>El modelo de Bristow – Campbell, influye en la estimación de la radiación solar global diaria media mensual, en la Región Pasco.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS:</b></p> <p>El desarrollo adecuado del modelo Bristow – Campbell mediante las temperaturas extremas, es funcional en la Región Pasco.</p> <p>El modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual es adaptable a la Región Pasco.</p> <p>La aplicación adecuada del modelo Bristow – Campbell para estimar la radiación solar por estaciones en la región Pasco, es a través de analogías con la región Junín.</p>	<p><b>DEPENDIENTE</b></p> <p>Variable Dependiente: Y = Radiación solar global</p> <p><b>INDEPENDIENTE</b></p> <p>Variable Independiente: X = Temperaturas extremas</p> <p><b>INTERVINIENTES</b></p> <p>Altitud Latitud Coeficientes</p>	<p><b>Indicadores de la Variable Independiente:</b></p> <p>X<sub>1</sub> = Temperatura máxima. X<sub>2</sub> = Temperatura mínima.</p> <p><b>Indicadores de la Variable Dependiente:</b></p> <p>Y<sub>1</sub> = Radiación solar global media mensual</p>	<p><b>TPO DE INVESTIGACIÓN:</b></p> <p>Básica</p> <p><b>NIVEL DE INVESTIGACIÓN:</b></p> <p>Descriptiva - explicativa</p> <p><b>Población</b></p> <p>Las estaciones meteorológicas de la región Pasco.</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>Para evaluar y validar el modelo se tomó las estaciones: Pozuzo Oxapampa Yanahuana Chaupimarca</p> <p><b>Método:</b></p> <p>Modelaje</p> <p><b>Diseño de Investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelaje</li> <li>• Descriptivo comparativo:</li> </ul> <p>M<sub>1</sub>.....O<sub>1</sub> M<sub>2</sub>.....O<sub>2</sub></p> <p><b>Técnicas de recolección de datos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Documentaria</li> </ul> <p><b>-De procesamiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*EXCEL</li> <li>*SPSS 23, Minitab 17</li> </ul> <p>Activar Windows</p>

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de investigación

Tipo de Investigación es **básica**, porque busca el progreso científico, acrecienta los conocimientos teóricos, persigue la generalización de sus resultados con la perspectiva de desarrollar una teoría o modelo teórico científico basado en principios y leyes. (Hernández. 2010).

#### **Nivel de la Investigación:**

Es **descriptivo** porque tiene por objeto central la medición precisa de una o más variables dependientes en una muestra definida y **explicativo** porque además de medir variables, pretenden estudiar las relaciones de influencias entre ellas, para conocer la estructura y los factores que intervienen en los fenómenos educativos y su dinámica. (Hernández. 2010).

#### 3.2. Métodos de investigación

El método empleado para estimar y desarrollar el modelo Bristow – Campbell es el **modelaje** que estima la radiación solar global diaria media mensual.

La metodología que se utilizó, se orientó principalmente, en las áreas del análisis estadístico, clasificando y evaluando las variables relevantes planteadas para absolver los objetivos planteados.

La presente investigación cuantitativa está tipificada como descriptiva debido a que considera al fenómeno estudiado y sus componentes; y explicativa porque determina las causas de los fenómenos (Hernández. 2010).

El Método utilizado es la **observacional**, ya que registra los datos meteorológicos como temperaturas máximas y mínimas diarias, promedios mensuales y promedios anuales y otros de características meteorológicas y datos registrados de radiación solar para identificar la relación de las características meteorológicas (temperaturas) con las actinométricas (radiación solar global) que puedan permitir el desarrollo de modelos propuestos de estimación de radiación solar donde existan información meteorológica.

### **3.3. Diseño de investigación**

Se aplicó el diseño del modelo empírico de Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual correspondiente a localidades ubicadas en la zona de sierra y selva de la Región Pasco (Yanahuanca, Chaupimarca, Pozuzo y Huancabamba).

En la investigación se consideraron los factores que modifican la radiación solar a lo largo de su recorrido por el espacio, tales como las variables de temperaturas máximas y mínimas, los valores de la constante **a<sub>B</sub>** propuestos de acuerdo al clima, latitud y altitud de la zona, a través de la utilización de diversas expresiones matemáticas que se mencionan tanto en el marco teórico como en los resultados y discusión, se logró representar y estimar la radiación solar global en la región Pasco. Cada una de las expresiones matemáticas utilizadas en el modelo de estimación de la radiación solar global diaria media mensual sobre una superficie horizontal fueron evaluadas y calibradas a través de los programas estadísticos de cálculo que contiene el programa Excel y el SPSS 23.

Se sigue una metodología hasta la elaboración de una base de datos de radiación solar global estimada con el modelo Bristow-Campbell:

- **Creación de la base de datos**

Se recopiló información disponible a través de los registros elaborados de temperaturas máximas y mínimas de 04 estaciones meteorológicas a cargo de SENAMHI Junín de los años 2010 al 2014. Sin embargo, con respecto a ciertas variables como la radiación solar sobre una superficie horizontal la información disponible fue muy escasa, por eso se tomaron los datos de temperaturas extremas de las estaciones de Yanahuanca, Chaupimarca, Pozuzo y Huancabamba.

- **Diseño del modelo Bristow - Campbell en hoja de cálculo de Excel**

Para el diseño del modelo propuesto en el programa Excel se señalan en la secuencia de ecuaciones explicadas en las bases teóricas que se resumen en el trabajo de tesis.

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

La zona de estudio de la investigación fue la Región Pasco:

- Las estaciones meteorológicas registradas por el SENAMHI, distribuidas en la Región Pasco.
- Las zonas pertenecientes a estas estaciones meteorológicas: sierra y selva.

#### **3.4.2. Muestra**

La muestra para adaptar y estimar el modelo empírico Bristow – Campbell, fueron las cuatro estaciones que cuentan con datos de temperaturas máximas y mínimas (Yanahuanca, Chaupimarca, Pozuzo y Huancabamba) pertenecientes a la Región Pasco.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para la creación y estimación de la base de datos de las zonas de estudio se utilizó la técnica documental.

Para aplicar el modelo de Bristow – Campbell (1984) que estima la radiación solar global diaria media mensual se desarrolló la técnica del modelaje.

Para la creación de la base de datos de estimación de la radiación solar global diaria media mensual se aplicó el modelo de Bristow - Campbell (1984) adaptado en base al software Excel 2013.

Los instrumentos o equipos que se utilizaron para la generación de los resultados, fueron computadoras (Laptop) con el uso de los programas Excel y SPSS 23.

### **3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

Se tuvieron en cuenta los siguientes procedimientos:

- **Temperaturas extremas**

Los datos de temperaturas extremas máximas y mínimas, se obtuvieron de los años 2010 al 2014, datos diarios y media mensuales de las estaciones de medición registradas en SENAMHI - Junín, para el estudio se tomaron datos de la Región Pasco. Para ello se utilizó la técnica descriptiva en la obtención de los datos de temperaturas extremas (máximas y mínimas diarias) medias mensuales y anuales de las estaciones para la ejecución del modelo Bristow – Campbell.

- **Radiación solar global diaria media mensual estimada mediante el modelo Bristow – Campbell**

Para obtener los valores de la Radiación Solar Global se utilizó el modelo empírico de Bristow – Campbell adaptado a la hoja de cálculo Excel, para

luego obtener los resultados de las radiaciones solares globales mediante las temperaturas extremas mensuales promedio de las estaciones estudiadas.

### **3.7. Tratamiento estadístico**

Los programas estadísticos empleados en las computadoras, necesarios a utilizar para desarrollar diversos análisis estadísticos, fueron el software de Microsoft Excel y SPSS 23.

Se utilizó la estadística predictiva para predecir temperaturas máximas y mínimas mensuales para los años 2015 y 2016.

Se obtuvieron los gráficos de series de tiempo pronosticados y comparándolos con los años 2010 al 2014.

### **3.8. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación**

#### **a) Selección y estimación del coeficiente empírico $a_B$ para el modelo específico de cada estación**

Se seleccionaron 4 estaciones para la obtención de los datos de temperaturas máximas y mínimas diarias, para su posterior predicción, de las estaciones de Pozuzo (590 msnm), Yanahuanca (3900 msnm), Chaupimarca (3850 msnm) y Huancabamba (600 msnm). Los valores del coeficiente  $a_B$  para las estaciones en estudio, se seleccionaron por comparación de datos de tipo de clima similares a otras regiones del país, como el de Junín.

#### **b) Base de datos estimados de radiación solar global en la Región Pasco**

Tomando en cuenta el modelo de Bristow – Campbell, en base a las temperaturas máximas y mínimas diarias registradas durante los años 2010 al 2014 (SENAMHI, 2014) se estimó la radiación solar global para las 04

estaciones meteorológicas existentes y activas en la Región Pasco y se elaboró una base de datos de la radiación solar global obtenida, los cuales fueron procesados y facilitados para esta investigación, para luego obtener la serie de tiempos pronosticados al año 2016.

### **3.9. Orientación ética**

La investigación se basa en obtener la radiación solar global de las localidades de la Región Pasco, y para la obtención de los datos reales de temperaturas máximas y mínimas, se recurrió al SENAMHI – Junín de la ciudad de Huancayo, estos datos obtenidos se procesaron luego con el software estadístico Excel.

Como investigador soy consciente de realizar una investigación científica y profesional, empleando datos reales para así también obtener resultados reales, con esto demuestro una responsabilidad personal como investigador y asumiendo las consecuencias de la realización y la difusión de la investigación.

La tesis tiene una orientación ética con el medio ambiente, ya que se utilizan datos reales de temperaturas máximas y mínimas para la obtención de la radiación solar global con la aplicación de un modelo matemático sin dañar el medio ambiente con una responsabilidad social y desarrollo sostenible.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Descripción del trabajo de campo

El trabajo de campo realizado fue bastante limitado para la obtención de la información de las temperaturas máximas y mínimas, ya que las diferentes estaciones en estudio se encuentran muy alejadas y no se cuenta con el equipamiento adecuado para medir la radiación solar global en forma directa; es por eso que mediante averiguaciones, se logró contactar con el SENAMHI que se encuentra en la ciudad de Huancayo, siendo posible de esta manera obtener la información deseada de las temperaturas máximas y mínimas de las 4 estaciones que están activas en la actualidad (Yanahuanca, Chaupimarca, Pozuzo y Huancabamba).

Luego de obtener los valores diarios, mensuales y anuales de las temperaturas extremas, se aplicó el modelo de Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global disponible sobre la superficie terrestre de una localidad en el tiempo, la cual, se ha ido transformando cada vez más en una necesidad para ciertas aplicaciones de la energía solar.

Las estaciones de monitoreo disponibles a lo largo y ancho del territorio peruano, donde se miden estas variables, son escasas, suelen estar vinculadas a los núcleos de población y están situadas preferentemente en el fondo de los valles y a alta o baja altitud; la estimación de la radiación solar a través de ciertos modelos que se basan en la simulación de los procesos físicos que ocurren durante la trayectoria de la radiación solar es una de las soluciones que se plantea frente a este problema.

Para desarrollar el modelo de Bristow – Campbell (1984) que estima la radiación solar global diaria media mensual se tomó la técnica del modelaje propuesto por Espinoza (2010). Para lo cual, se propone el modelo empírico de Bristow – Campbell para estimar la radiación solar global diaria media mensual correspondiente a distintas localidades ubicadas en la Región Pasco, considerando los factores o variables que modifiquen la radiación solar a lo largo de su recorrido por el espacio tales como: las variables de temperaturas máximas y mínimas, además de los valores de la constante  $a_B$  propuestos de acuerdo al clima y altitud. A través de la utilización de ecuaciones matemáticas que se mencionan, se logró representar y estimar la radiación solar global para las localidades estudiadas. Las expresiones matemáticas utilizadas en el modelo de estimación de la radiación solar global diaria media mensual sobre una superficie horizontal fueron evaluadas a través de las herramientas de cálculo mediante el programa Excel.

En la investigación se elabora una base de datos de radiación solar global estimada con el modelo Bristow – Campbell.

Para la generación de la base de datos de las radiaciones solares globales de las zonas en estudio, se utilizó la técnica documental propuesta por Espinoza (2010) así obtener una base de datos reales que es necesario para recopilar la mayor cantidad de datos disponibles como las temperaturas máximas y mínimas de los registros de las localidades de Pasco ubicadas dentro de la zona de estudio.

Para la aplicación del modelo Bristow - Campbell utilizando el programa Excel, se ha tenido en cuenta la secuencia de ecuaciones elaboradas para generar los valores medios mensuales diarios de la radiación solar global terrestre de las localidades estudiadas, que son las siguientes:

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

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left[0,4 \cdot \text{sen}\left(\frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365}\right)\right] \quad (2)$$

$$\omega_h = \pm \cos^{-1} \cdot (-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad (3)$$

$$H_{eh} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[ \frac{\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi \cdot \omega_h \cdot \frac{\pi}{180} +}{\cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \text{sen}\omega_h} \right] \quad (4)$$

$$\frac{H_{gh}}{H_{eh}} = a_B \cdot \left(1 - e^{-b_B \cdot (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{c_B}}\right) \quad (5)$$

$$c_B = 2.116 - 0.072(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 57.574 e^\phi \quad (6)$$

$$b_B = 0.107 c_B^{-2.6485} \quad (7)$$

Donde:

- $E_0$  = factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre;
- $d_n$  = día juliano del año;
- $\delta$  = declinación solar, [grados],
- $\phi$  = Latitud geográfica del lugar, [grados];

- $\omega_h$  = ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal, [grados];
- $I_{sc}$  = constante solar, [ $W/m^2$ ];
- $H_{eh}$  = irradiación extraterrestre sobre un plano horizontal, [ $Wh/m^2$ ];
- $H_{gh}$  = irradiación terrestre sobre un plano horizontal, [ $Wh/m^2$ ].

#### 4.2. Presentación, análisis e interpretación de los resultados

##### a) Registro de altitudes de las estaciones activas meteorológicas en estudio de la región Pasco

La Tabla 6, nos muestra el promedio de las altitudes de las estaciones meteorológicas en estudio, que es de 2361.2 msnm, información que sirve para alimentar al modelo Bristow – Campbell y determinar la radiación solar global de la Región Pasco. (SENAMHI, 2014).

**Tabla 6**

Estaciones meteorológicas activas a cargo de SENAMHI en la Región Pasco

ESTACIÓN	PROVINCIA	DISTRITO	LONGITUD	LATITUD	ALTITUD
			W	S	Msnm
Yanahuanca	Daniel A. Carrión	Yanahuanca	76°30'29"	10°29'29"	<b>3190</b>
Cerro de Pasco	Pasco	Chaupimarca	76°15'15"	10°41'40"	<b>4260</b>
Pozuzo	Oxapampa	Pozuzo	75°33'33"	10°3'3"	<b>1000</b>
Oxapampa	Oxapampa	Huancabamba	75°23'23"	10°35'34"	<b>1850</b>
Villa Rica	Oxapampa	Villa Rica	75°21'3.8"	10°15'20.5"	<b>1506</b>
<b>Promedio</b>					<b>2361.2</b>

**Fuente.** SENAMHI – Oficina de Estadística, 2014.

**b) Resultados de las temperaturas promedio diario mensuales de las estaciones**

Los resultados de las temperaturas promedios máximos y mínimos por meses de cada estación, se obtuvo promediando los datos diarios de los años 2010 al 2014, registrados por SENAMHI. Estas estaciones se encuentran situadas en zonas de sierra y selva de la Región Pasco. Los resultados de las temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales, sirvieron para ingresar al modelo Bristow – Campbell del programa Excel y obtener la Radiación Solar Global para cada estación.

**Tabla 7**

Estadísticos descriptivos de las Temperaturas máximas y mínimas reales y pronosticadas

Variables	N	Desviación		Asimetría	Curtosis		
		Media	estándar		Error	Error	
	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	estándar	Estadístico	estándar
Temperatura Máxima	60	10,8919	,88343	,234	,309	-,173	,608
Temperatura Mínima	60	,3512	1,56325	-,634	,309	-,744	,608
Valor pronosticado de TemMax-Modelo_1	84	10,9833	,69666	,521	,263	,049	,520
Valor pronosticado de TemMin-Modelo_2	84	,4183	1,52552	-,607	,263	-,880	,520
N válido (por lista)	60						

En la tabla 7, se detallan los valores de las temperaturas máximas y mínimas promedio reales y pronosticados al año 2016, observando que no existen muchas diferencias en la temperatura promedio máxima real (10.8919 °C)

con la temperatura máxima pronosticada (10.9833 °C), así como también, la mínima diferencia entre las temperaturas promedio mínimas reales (0,3512 °C) y pronosticadas (0,4183 °C). Valores procesados con el programa SPSS 23.

**Tabla 8**

Temperaturas máximas y mínimas promedio, de las estaciones de Chaupimarca, Pozuzo, Huancabamba y Yanahuanca – Año 2010

ESTACIÓN DE MONITOREO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	10.3	2.39	11.13	2.69	11.37	2.77	11.67	1.7	12.48	0.81	11.8	-1.04
POZUZO	27.34	20.37	28.59	20.39	29.63	20.55	28.52	20.34	28.57	19.9	28.53	18.42
HUANCABAMBA	20.85	14.09	21.54	14.03	21.37	13.92	22.53	13.24	22.37	13.14	21.87	12.25
YANAHUANCA	19.18	7.27	19.12	7.02	18.88	7.69	19.91	7.59	21.24	6.87	22.19	6.31

ESTACIÓN DE MONITOREO	JULIO		AGOS		SETIEM		OCTUB		NOVIEM		DICIEM	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	13.23	-2.13	12.68	-3.1	12.05	-0.75	11.91	0.1	11.08	1.1	10.13	1.69
POZUZO	28.04	17.86	20.21	17.45	30.39	17.93	29.48	18.85	28.38	18.93	28.28	19.82
HUANCABAMBA	21.64	12	23.21	11.3	22.99	11.02	22.76	13.29	23.71	13.47	22.25	13.36
YANAHUANCA	22.74	5.70	23.2	4.11	20.98	6.72	20.16	7.31	20.32	8.13	19.52	8.42

En la tabla 8, se puede observar en las estaciones de Chaupimarca y Yanahuanca que, en los meses de junio, julio agosto y setiembre, existe una baja considerable de las temperaturas mínimas. También se puede observar que hay alzas considerables de las temperaturas extremas que sobrepasan los 13.22 °C para el caso de la estación de Yanahuanca. Otro factor importante para la baja de

temperatura, es que los Distritos de Chaupimarca y Yanahuanca se encuentran en una altitud de 4260 y 3190 msnm respectivamente.

También se observa que para las estaciones de Pozuzo y Huancabamba, las temperaturas extremas llegan a un máximo de 30 °C y 22 °C respectivamente y no existiendo bajas considerables en las temperaturas mínimas.

**Tabla 9**

Temperaturas máximas y mínimas promedio, de las estaciones de Chaupimarca, Pozuzo, Huancabamba y Yanahuanca – Año 2011

ESTACIÓN DE MONITOREO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	9.29	1.64	9.08	1.35	9.7	1.72	9.96	0.92	11.4	-0.25	11.64	-1.4
POZUZO	26.77	20.22	26.21	19.22	27.32	19.14	28.09	19.05	28.17	19.09	27.84	17.7
HUANCABAMBA	21.46	14.11	18.18	14.82	18.26	14.46	18.45	13.56	22.65	12.82	22.36	14.19
YANAHUANCA	17.27	7.72	18.31	7.78	18.45	7.68	18.79	7.55	22.22	6.67	21.39	6.35

ESTACIÓN DE MONITOREO	JULIO		AGOS		SETIEM		OCTUB		NOVIEM		DICIEM	
	Tmax	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax
CHAUPIMARCA	9.29	10.78	-2.34	12.31	-1.48	10.75	0.41	11.19	0.68	12.08	0.96	9.73
POZUZO	26.77	28.11	18.27	29.04	17.27	29.66	17.81	28.38	19.23	29.27	19.68	27.77
HUANCABAMBA	21.46	21.64	12	23.21	11.5	23.03	10.35	23.61	13.39	23.17	13.83	21.42
YANAHUANCA	17.27	20.32	6.09	20.75	5.75	19.88	7.51	19.06	7.61	20.28	7.78	18.16

En la tabla 9, se observa en las estaciones de Chaupimarca y Yanahuanca, que en la mayoría de los meses existen bajas considerables en las temperaturas mínimas siendo en algunos meses negativas. También se puede observar que no hay alzas considerables de las temperaturas extremas que sobrepasan los 22 °C para el caso de la estación de Yanahuanca. También se observa que para las estaciones de

Pozuzo y Huancabamba, las temperaturas extremas llegan a un máximo de 29 °C y 22 °C respectivamente y no existiendo bajas considerables en las temperaturas mínimas.

**Tabla 10**

Temperaturas máximas y mínimas promedio, de las estaciones de Chaupimarca, Pozuzo, Huancabamba y Yanahuanca – Año 2012.

ESTACIÓN DE MONITOREO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	10.67	1.21	10.11	1.51	9.83	1.54	10.22	1.37	11.03	-0.39	10.33	-1.66
POZUZO	28.17	19.83	26.42	19.35	28.03	19.29	28.36	19.25	28.47	19.45	28.25	18.14
HUANCABAMBA	22.69	14.06	21.55	14.28	22.25	14.66	22.89	13.03	21.9	13.29	21.37	13.14
YANAHUANCA	19.42	7.38	17.85	7.47	19.73	7.82	17.92	7.33	20.56	7.28	20.1	5.73

ESTACIÓN DE MONITOREO	JULIO		AGOS		SETIEM		OCTUB		NOVIEM		DICIEM	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	11.29	-2.86	11.35	-2.55	10.51	-2.08	11.72	0.58	11.21	1.34	9.96	1.89
POZUZO	28.22	15.97	30.03	16.94	29.96	16.61	29.98	18.86	29.26	20.12	27.25	19.94
HUANCABAMBA	21.89	11.88	24.6	15.14	23.03	10.69	23.68	13.09	23.22	13.87	23.05	14.64
YANAHUANCA	20.95	5.36	21.8	5.2	20.51	6.24	21.31	6.02	20.49	5.59	19.55	5.79

En la tabla 10, se observa que en las estaciones de Chaupimarca y Yanahuanca, en la mayoría de los meses existen bajas considerables en las temperaturas mínimas siendo en algunos meses negativas. También se observa que no hay alzas considerables de las temperaturas extremas que sobrepasen los 21 °C para el caso de la estación de Yanahuanca.

Para las estaciones de Pozuzo y Huancabamba, las temperaturas extremas llegan a un máximo de 30 °C y 23 °C respectivamente y no existiendo bajas considerables en las temperaturas mínimas.

**Tabla 11**

Temperaturas máximas y mínimas promedio, de las estaciones de Chaupimarca, Pozuzo, Huancabamba y Yanahuanca – Año 2013

ESTACIÓN DE MONITOREO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	10.97	2.10	10.52	2.38	10.17	2.2	11.38	0.88	11.5	0.9	9.72	0.17
POZUZO	28.87	19.82	27.59	19.75	27.41	19.72	28.78	19.27	28.25	18.99	20.05	18.82
HUANCABAMBA	22.0	14.24	22.38	14.64	22.48	14.38	22.76	13.51	22.65	13.77	22.67	13.04
YANAHUANCA	20.91	5.32	20.17	6.15	19.97	6.31	21.02	6.92	20.63	6.06	20.49	6.36

ESTACIÓN DE MONITOREO	JULIO		AGOS		SETIEM		OCTUB		NOVIEM		DICIEM	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	9.22	-2.1	10.64	-1.59	11.62	-0.83	10.49	0.78	11.64	0.72	10.76	1.7
POZUZO	27.78	16.92	28.35	18.07	30.23	17.81	29.48	19.95	28.51	19.33	28.73	20.26
HUANCABAMBA	22.14	11.84	22.73	10.09	23.27	12.17	22.56	11.9	23.31	13.4	22.49	14.78
YANAHUANCA	20.94	6.19	21.00	6.54	21.52	6.17	20.27	6.23	20.75	6.78	19.78	6.41

En la tabla 11, se puede observar en las estaciones de Chaupimarca y Yanahuanca, que en la mayoría de los meses existen bajas considerables en las temperaturas mínimas siendo en algunos meses negativas. También se observa que no hay alzas considerables de las temperaturas extremas que sobrepasen los 21 °C para el caso de la estación de Yanahuanca.

Para las estaciones de Pozuzo y Huancabamba, las temperaturas extremas llegan a un máximo de 30 °C y 23 °C respectivamente y no existiendo bajas considerables en las temperaturas mínimas.

**Tabla 12**

Temperaturas máximas y mínimas promedio, de las estaciones de Chaupimarca, Pozuzo, Huancabamba y Yanahuanca – Año 2014

ESTACIÓN DE MONITOREO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	10.37	1.28	9.96	1.65	10.3	1.47	10.32	1.28	11.02	0.86	11.68	-1.25
POZUZO	27.39	20.03	26.84	20.06	27.8	19.63	28.55	19.58	28.18	19.44	28.4	18.77
HUANCABAMBA	21.94	14.35	22.14	14.24	22.63	14.15	22.39	13.37	21.65	14.03	22.33	13
YANAHUANCA	19.83	6.59	21.13	6.43	21.02	6.65	21.47	6.72	22.39	6.5	23.24	6.00

ESTACIÓN DE MONITOREO	JULIO		AGOS		SETIEM		OCTUB		NOVIEM		DICIEM	
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin
CHAUPIMARCA	10.71	-1.97	10.67	-2.14	10.49	-0.07	10.32	0.52	12.05	1.09	11.05	1.89
POZUZO	27.86	17.82	29.39	17.96	29.88	18.21	29.38	18.06	29.1	19.28	28.11	20.52
HUANCABAMBA	22.36	12.23	21.79	12.58	23.28	12.56	23.47	12.99	22.21	14.46	22.829	15.57419
YANAHUANCA	21.57	6.16	22.83	5.46	21.90	5.91	20.78	6.39	22.2	6.19	20.99	6.13

En la tabla 12, también se puede observar en las estaciones de Chaupimarca y Yanahuanca, que en la mayoría de los meses existen bajas considerables en las temperaturas mínimas siendo en algunos meses negativas. También se puede observar que no hay alzas considerables de las temperaturas máximas que sobrepasen los 23 °C para el caso de la estación de Yanahuanca.

También se observa que para las estaciones de Pozuzo y Huancabamba, las temperaturas extremas llegan a un máximo de 29 °C y 23 °C respectivamente y no existiendo bajas considerables en las temperaturas mínimas.

**c) Resultados de las Radiaciones Solares diarias media mensuales de las localidades de la Región Pasco**

**Desarrollo del modelo matemático BRISTOW – CAMPBELL**

La Tabla 13 muestra que la radiación Solar global media mensual estimada para la Región Pasco es de 4,74817395 kWh/m<sup>2</sup>/día anual.

La Estación de Yanahuanca que tuvo en el mes de diciembre la mayor radiación con 6,9827 kWh/m<sup>2</sup>/día, perteneciente a la sierra y la Estación de Huancabamba en el mes de febrero con menor radiación solar con 3,0157 kWh/m<sup>2</sup>/día, perteneciente a la selva.

**Tabla 13**

Radiación Solar Global media mensual estimada de las 4 estaciones de la Región Pasco.

<b>LOCALIDAD</b>	<b>ZONA</b>	<b>RADIACIÓN</b>
<b>Pasco</b>		<b>SOLAR</b>
		<b>kWh/m<sup>2</sup>/día</b>
Yanahuanca	Sierra	6.4110812
Chaupimarca	Sierra	5.4580962
Pozuzo	Selva	3.6345931
	alta	
Huancabamba	Selva	3.4889253
	alta	
<b>Promedio</b>		<b>4.74817395</b>

**Fuente.** Propia del investigador

Los datos de Temperaturas extremas obtenidas del SENAMHI Junín sirvieron para validar el modelo Bristow – Campbell, estos datos se utilizaron para determinar las radiaciones solares de las estaciones en estudio.

Los resultados de las radiaciones solares globales estimados, se presentan en una tabla de datos mensuales por estación como sigue:

**Estación Yanahuanca:**

En la tabla 14 se muestran los resultados de Radiación Solar Global obtenidas en base a las temperaturas extremas estimadas y pertenecientes a los años 2015 y 2016 pronosticados es el siguiente: 6.4110812 kWh/m<sup>2</sup>/día, que corresponde a la radiación solar promedio.

Se observa que la mayor radiación solar obtenida fue en el mes de diciembre que corresponde a un valor de 6.9827 kWh/m<sup>2</sup>/día y la menor radiación solar al mes de junio con un valor de 5.3606963 kWh/m<sup>2</sup>/día.

**Tabla 14**

Radiación Solar Global diarias medias mensuales estimadas: Estación Yanahuanca de los años 2015 y 2016 pronosticados.

Mes	Dias	Dia Juliano dn	Datos de entrada		RADIACION									
			Tmax	Tmin	Latitud	Eo	$\delta$	Ws	Heh	N	C <sub>B</sub>	b <sub>B</sub>	Hs	Hs
			°C	°C	rad	-	rad	rad	MJm-2dia-1	horas/dia	-	-	MJm-2dia-1	KWm-2dia-1
ene	31	15	20.48	6.13	-0.18884507	1.03190597	-0.37021571	1.64504131	39.7504139	12.5671605	1.08395122	0.0864292	25.0579963	6.9605350
feb	28	46	20.47	6.25	-0.18884507	1.02318336	-0.23031208	1.61562431	39.4018875	12.3424317	1.09331122	0.08448329	24.7573788	6.8770304
mar	31	74	20.77	6.51	-0.18884507	1.00965572	-0.04739688	1.57986185	37.7640511	12.0692273	1.09043122	0.08507554	23.7522429	6.5978268
abr	30	105	20.98	6.5	-0.18884507	0.99226165	0.16583834	1.53880164	34.3325003	11.7555511	1.07459122	0.08843739	21.7122851	6.0311734
may	31	135	22.57	5.95	-0.18884507	0.97743053	0.32881933	1.50553785	30.7256179	11.5014351	0.92051122	0.13324556	20.3984706	5.6662260
jun	30	166	22.64	5.43	-0.18884507	0.96832216	0.40682264	1.48835618	28.6953181	11.3701771	0.87803122	0.1510072	19.2985606	5.3606963
jul	31	196	22.46	5.18	-0.18884507	0.96788715	0.37457945	1.49558738	29.4235742	11.4254193	0.87299122	0.15332717	19.8189271	5.5052421
ago	31	227	23.08	4.69	-0.18884507	0.97621819	0.23895927	1.5242194	32.4927226	11.6441512	0.79307122	0.1977222	22.4426143	6.2340421
set	30	258	22.12	5.79	-0.18884507	0.99116246	0.03688947	1.56374266	36.1623328	11.946086	0.94139122	0.12556065	23.8561293	6.6266840
oct	31	288	21.48	5.99	-0.18884507	1.00801441	-0.16905283	1.60342326	38.5823123	12.2492228	1.00187122	0.10647152	24.9836648	6.9398875
nov	30	319	21.97	6.17	-0.18884507	1.02318371	-0.33499117	1.63737738	39.4810983	12.5086125	0.97955122	0.11301819	25.7434123	7.1509278
dic	31	349	20.76	6.15	-0.18884507	1.03175633	-0.40717061	1.6533156	39.6234097	12.6303713	1.06523122	0.09051043	25.1378002	6.9827027

**Estación Chaupimarca:**

En la tabla 15, se muestran las radiaciones solares obtenidas en base a las temperaturas extremas correspondientes a los años 2015 y 2016 pronosticados. El resultado obtenido de la Radiación Solar Promedio es el siguiente: 5.4580962 kWh/m<sup>2</sup>/día. Se observa que la mayor radiación solar obtenida fue en el mes de noviembre que corresponde a un valor de 6.2522 kWh/m<sup>2</sup>/día y la menor radiación solar al mes de marzo con un valor de 5.1040 kWh/m<sup>2</sup>/día.

**Tabla 15**

Radiación Solar Global diarias medias mensuales estimadas: Estación Chaupimarca de los años 2015 y 2016 pronosticados.

Mes	Dias	Dia Juliano dn	Datos de entrada		RADIACION									
			Tmax °C	Tmin °C	Latitud rad	Eo -	$\delta$ rad	Ws rad	Heh MJm-2dia-1	N horas/dia	C <sub>B</sub> -	b <sub>B</sub> -	Hs MJm-2dia-1	Hs kWm-2dia-1
ene	31	15	10.62	1.91	-0.19473557	1.03190597	-0.37021571	1.64742045	39.8435163	12.5853358	1.48970146	0.03723321	19.8580899	5.5161207
feb	28	46	10.46	2.11	-0.19473557	1.02318336	-0.23031208	1.61705904	39.4419439	12.3533922	1.51562146	0.03557044	19.0234396	5.2842740
mar	31	74	10.58	2.13	-0.19473557	1.00965572	-0.04739688	1.5801518	37.7379178	12.0714423	1.50842146	0.03602188	18.3745629	5.1040310
abr	30	105	11.01	1.42	-0.19473557	0.99226165	0.16583834	1.537778	34.2364565	11.7477311	1.42634146	0.04177561	18.2531542	5.0703064
may	31	135	11.79	0.58	-0.19473557	0.97743053	0.32881933	1.50344759	30.5834544	11.4854667	1.30970146	0.05236642	17.8273712	4.9520337
jun	30	166	11.34	-0.84	-0.19473557	0.96832216	0.40682264	1.48571324	28.5340854	11.3499865	1.23986146	0.06054593	17.2908062	4.8029883
jul	31	196	11.35	-2.07	-0.19473557	0.96788715	0.37457945	1.49317723	29.2706519	11.4070071	1.15058146	0.07379792	18.4514549	5.1253898
ago	31	227	11.83	-1.98	-0.19473557	0.97621819	0.23895927	1.52272861	32.3762316	11.6327625	1.12250146	0.07878866	20.6296780	5.7304501
set	30	258	11.39	-0.46	-0.19473557	0.99116246	0.03688947	1.56351706	36.10811	11.9443626	1.26362146	0.05757728	21.6137001	6.0037888
oct	31	288	11.43	0.69	-0.19473557	1.00801441	-0.16905283	1.60446715	38.599523	12.2571974	1.34354146	0.04894528	22.0056504	6.1126635
nov	30	319	11.92	1.22	-0.19473557	1.02318371	-0.33499117	1.63951013	39.5601967	12.5249055	1.34642146	0.04866849	22.5079939	6.2522030
dic	31	349	10.63	1.83	-0.19473557	1.03175633	-0.40717061	1.6559611	39.7305038	12.6505813	1.48322146	0.03766558	19.9545147	5.5429052

**Estación Pozuzo:**

En la tabla 16, se muestran las radiaciones solares obtenidas en base a las temperaturas extremas correspondientes a los años 2015 y 2016 pronosticados. El resultado de la Radiación Solar Promedio es el siguiente: 3.6345931 kWh/m<sup>2</sup>/día.

Se observa que la mayor radiación solar obtenida fue en el mes de setiembre que corresponde a un valor de 4.4513588 kWh/m<sup>2</sup>/día y la menor radiación solar al mes de junio con un valor de 3.1338140 kWh/m<sup>2</sup>/día.

**Tabla 16**

Radiación Solar Global diarias medias mensuales estimadas: Estación Pozuzo de los años 2015 y 2016 pronosticados.

Mes	Dias	Dia Juliano dn	Datos de entrada		RADIACION									
			Tmax	Tmin	Latitud	Eo	$\delta$	Ws	Heh	N	C <sub>B</sub>	b <sub>B</sub>	Hs	Hs
			°C	°C	rad	-	rad	rad	MJm-2dia-1	horas/dia	-	-	MJm-2dia-1	kWm-2dia-1
ene	31	15	27.54	20.17	-0.17601687	1.03190597	-0.37021571	1.63987976	39.5435804	12.5277293	1.58776086	0.03144883	12.5162732	3.4767328
feb	28	46	26.96	19.87	-0.17601687	1.02318336	-0.23031208	1.61251112	39.3101855	12.3186487	1.60792086	0.03041528	11.9826546	3.3285058
mar	31	74	27.87	19.79	-0.17601687	1.00965572	-0.04739688	1.57923263	37.8164391	12.0644204	1.53664086	0.03429627	12.9955458	3.6098637
abr	30	105	28.29	19.62	-0.17601687	0.99226165	0.16583834	1.54102294	34.5376662	11.7725205	1.49416086	0.03693962	12.5562413	3.4878350
may	31	135	28.16	19.49	-0.17601687	0.97743053	0.32881933	1.51007295	31.0320361	11.5360806	1.49416086	0.03693962	11.2817621	3.1338140
jun	30	166	28.05	18.49	-0.17601687	0.96832216	0.40682264	1.49408967	29.0437819	11.4139776	1.43008086	0.04148692	11.3112923	3.1420168
jul	31	196	27.84	17.49	-0.17601687	0.96788715	0.37457945	1.50081617	29.753729	11.4653642	1.37320086	0.04619501	12.1638375	3.3788343
ago	31	227	27.24	17.66	-0.17601687	0.97621819	0.23895927	1.5274542	32.7427755	11.6688633	1.42864086	0.04159777	12.7692366	3.5470002
set	30	258	29.86	17.79	-0.17601687	0.99116246	0.03688947	1.56423223	36.2760804	11.9498261	1.24936086	0.05933431	16.0249364	4.4513588
oct	31	288	29.17	19.11	-0.17601687	1.00801441	-0.16905283	1.60115804	38.5403377	12.2319178	1.39408086	0.04438509	15.4959498	4.3044184
nov	30	319	28.74	19.59	-0.17601687	1.02318371	-0.33499117	1.63275013	39.3046611	12.473263	1.45960086	0.03930156	14.8612410	4.1281109
dic	31	349	27.86	20.11	-0.17601687	1.03175633	-0.40717061	1.64757659	39.3862714	12.5865286	1.56040086	0.03293046	13.0558894	3.6266258

**Estación Huancabamba:**

En la tabla 17, se muestran las radiaciones solares obtenidas en base a las temperaturas extremas estimadas correspondientes a los años 2015 y 2016 pronosticados. El resultado obtenido de Radiación Solar es el siguiente: 3.4889253 kWh/m<sup>2</sup>/día, que corresponde a la radiación solar promedio.

Se observa que la mayor radiación solar obtenida fue en el mes de setiembre que corresponde a un valor de 4.3225040 kWh/m<sup>2</sup>/día y la menor radiación solar al mes de junio con un valor de 2.8887600 kWh/m<sup>2</sup>/día.

**Tabla 17**

Radiación Solar Global diarias medias mensuales estimadas: Estación Huancabamba de los años 2015 y 2016 pronosticados.

Mes	Dias	Dia Juliano dn	Datos de entrada		RADIACION									
			Tmax	Tmin	Latitud	Eo	$\delta$	Ws	Heh	N	C <sub>B</sub>	b <sub>B</sub>	Hs	Hs
			°C	°C	rad	-	rad	rad	MJm-2dia-1	horas/dia	-	-	MJm-2dia-1	kWm-2dia-1
ene	31	15	21.74	14.44	-0.19178304	1.03190597	-0.37021571	1.64622721	39.7969977	12.5762201	1.59137287	0.03126013	12.4783501	3.4661986
feb	28	46	21.11	14.67	-0.19178304	1.02318336	-0.23031208	1.61633948	39.4220278	12.3478952	1.65329287	0.02825429	10.8568920	3.0157949
mar	31	74	21.35	14.59	-0.19178304	1.00965572	-0.04739688	1.58000638	37.7511801	12.0703314	1.63025287	0.02932422	10.9562151	3.0433846
abr	30	105	21.76	13.84	-0.19178304	0.99226165	0.16583834	1.53829138	34.2847409	11.751653	1.54673287	0.03370678	11.5791252	3.2164147
may	31	135	22.2	13.69	-0.19178304	0.97743053	0.32881933	1.50449594	30.654826	11.4934754	1.50425287	0.03628687	10.9824426	3.0506700
jun	30	166	22.07	13.4	-0.19178304	0.96832216	0.40682264	1.4870388	28.6149963	11.3601131	1.49273287	0.03703328	10.3995653	2.8887600
jul	31	196	21.89	12.27	-0.19178304	0.96788715	0.37457945	1.49438603	29.3474051	11.4162416	1.42433287	0.04193182	11.4722501	3.1867272
ago	31	227	23.06	12.4	-0.19178304	0.97621819	0.23895927	1.52347628	32.4347519	11.6384743	1.34945287	0.04837946	13.4758913	3.7432926
set	30	258	23.07	11.64	-0.19178304	0.99116246	0.03688947	1.56363021	36.1354448	11.9452269	1.29401287	0.05406478	15.5610581	4.3225040
oct	31	288	23.17	13.21	-0.19178304	1.00801441	-0.16905283	1.60394361	38.5910588	12.2531979	1.39985287	0.04390203	15.4179966	4.2827648
nov	30	319	23.08	14.08	-0.19178304	1.02318371	-0.33499117	1.63844047	39.520701	12.5167339	1.46897287	0.03864095	14.7642516	4.1011695
dic	31	349	22.36	14.85	-0.19178304	1.03175633	-0.40717061	1.65463425	39.6769662	12.640445	1.57625287	0.0320606	12.7779569	3.5494225

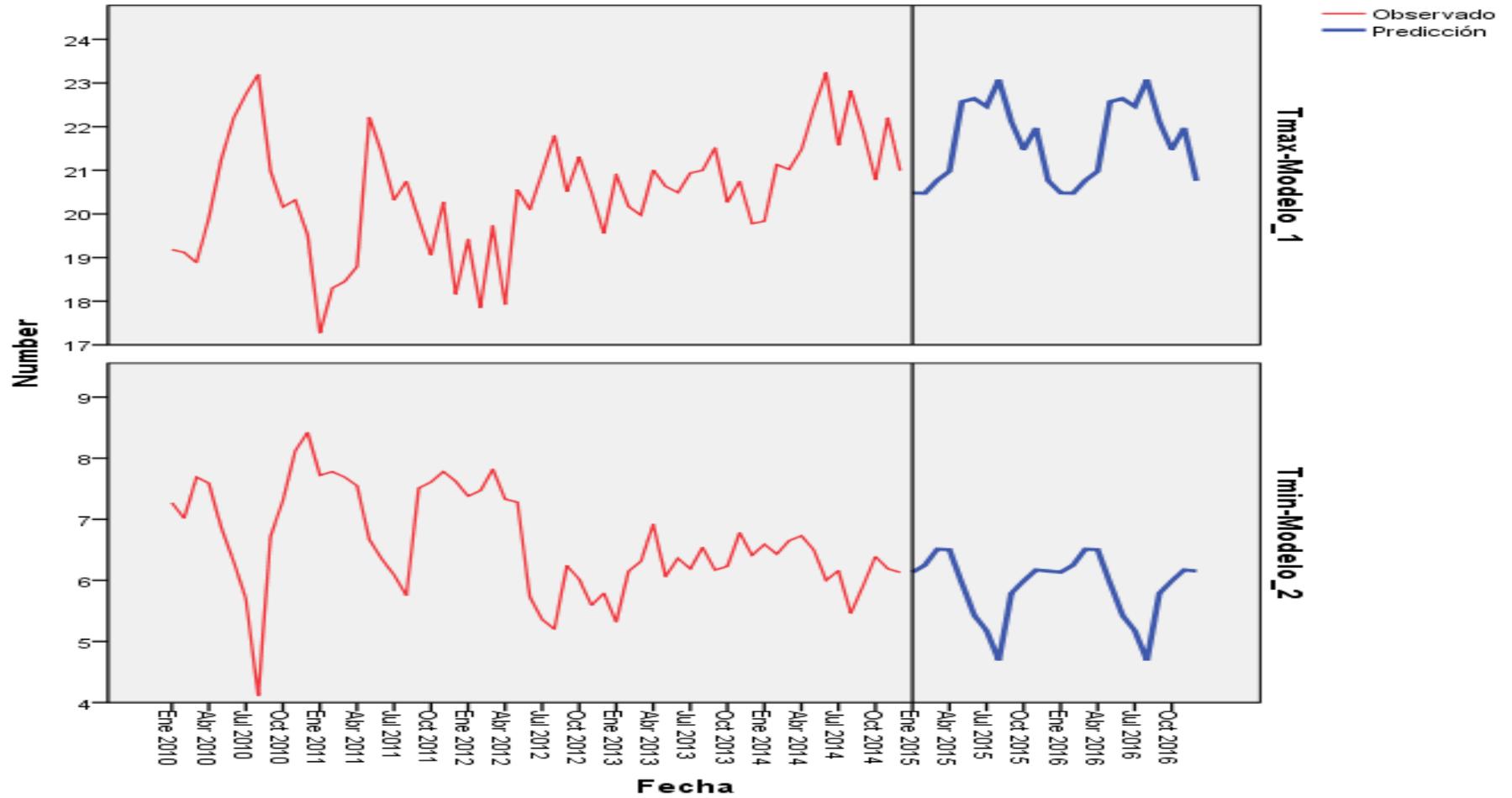
**d) Resultados de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticados mediante la modelización con las series temporales para cada estación de las localidades de la Región Pasco.**

Se aplicaron las técnicas del modelaje mediante las series temporales para ver el comportamiento que desarrollan las temperaturas máximas y mínimas observadas en comparación con las temperaturas máximas y mínimas pronosticadas para cada estación en estudio. Se aplicó el programa estadístico SPSS 22 como se muestran seguidamente para cada localidad:

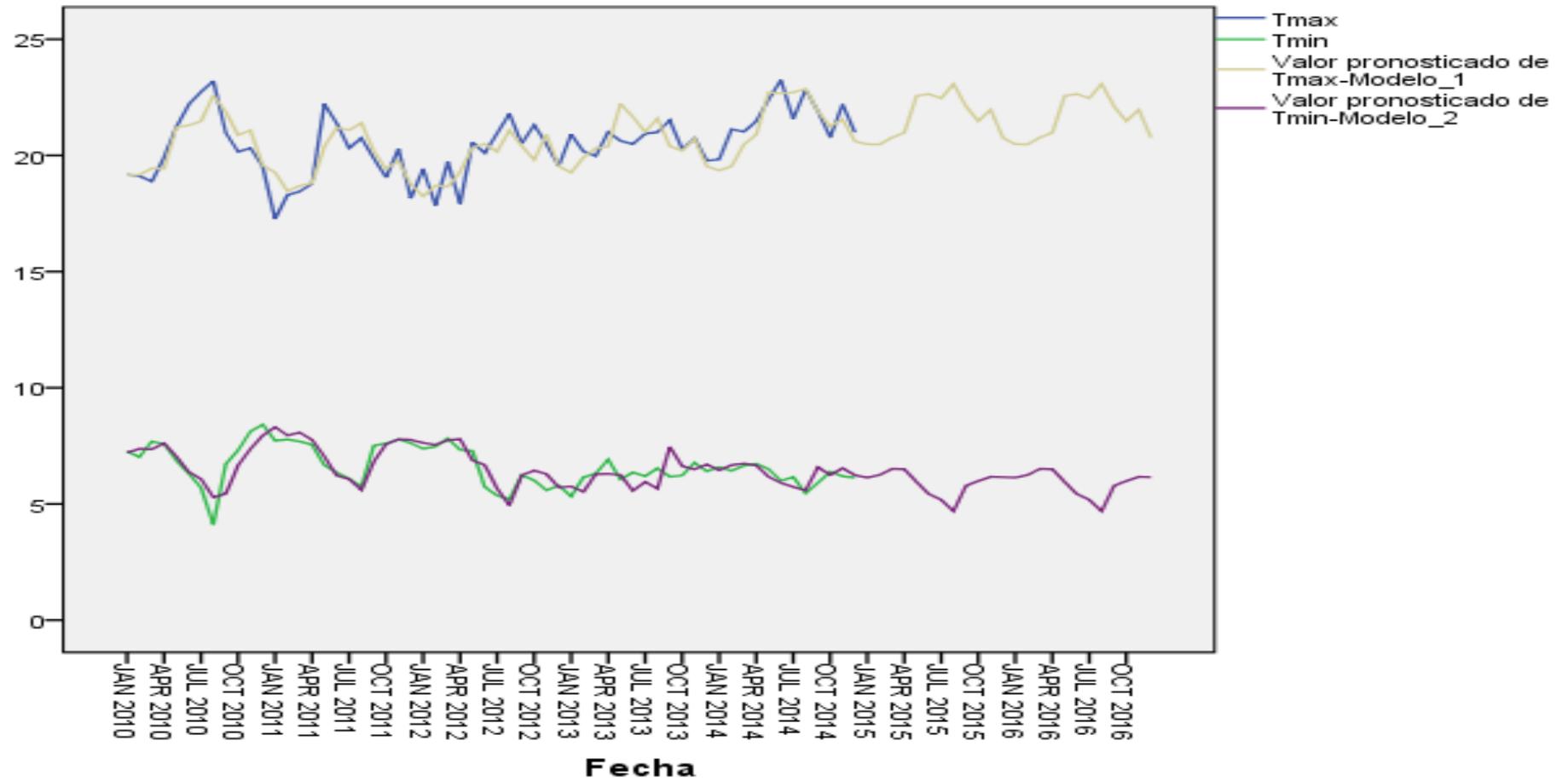
**ESTACIÓN YANAHUANCA**

En la figura 11, se puede observar el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas mediante las series temporales, desde el año 2010 al año 2016, en las cuales se observa que no existe mucha variación en el comportamiento de las temperaturas máximas a partir de los años 2014, 2015 y 2016, más si existiendo bajas considerables para los mismos años en las temperaturas mínimas.

**Figura 11.** Comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas desde el año 2010 al 2016. Estación Yanahuanca.



**Figura 12.** Comparación de las temperaturas máximas y mínimas observadas y predecidas desde el año 2010 al 2016. Estación Yanahuanca.

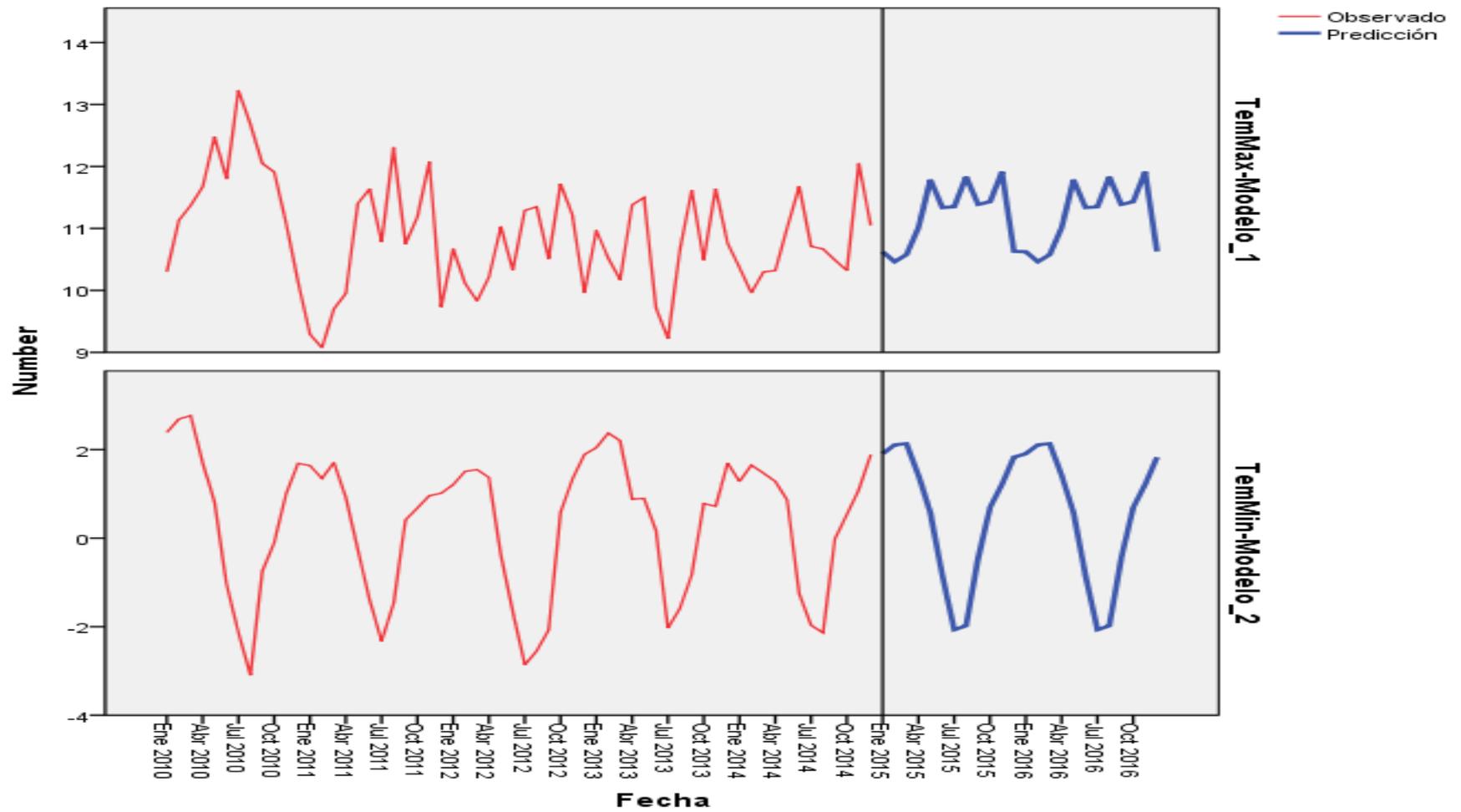


En la figura 12, se puede observar la comparación mediante los trazos de secuencia del comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y con los pronosticados de acuerdo al modelo mediante las series temporales, desde el año 2010 al año 2016, en las cuales se observa que no existe mucha variación en el comportamiento de dichas temperaturas a través del tiempo.

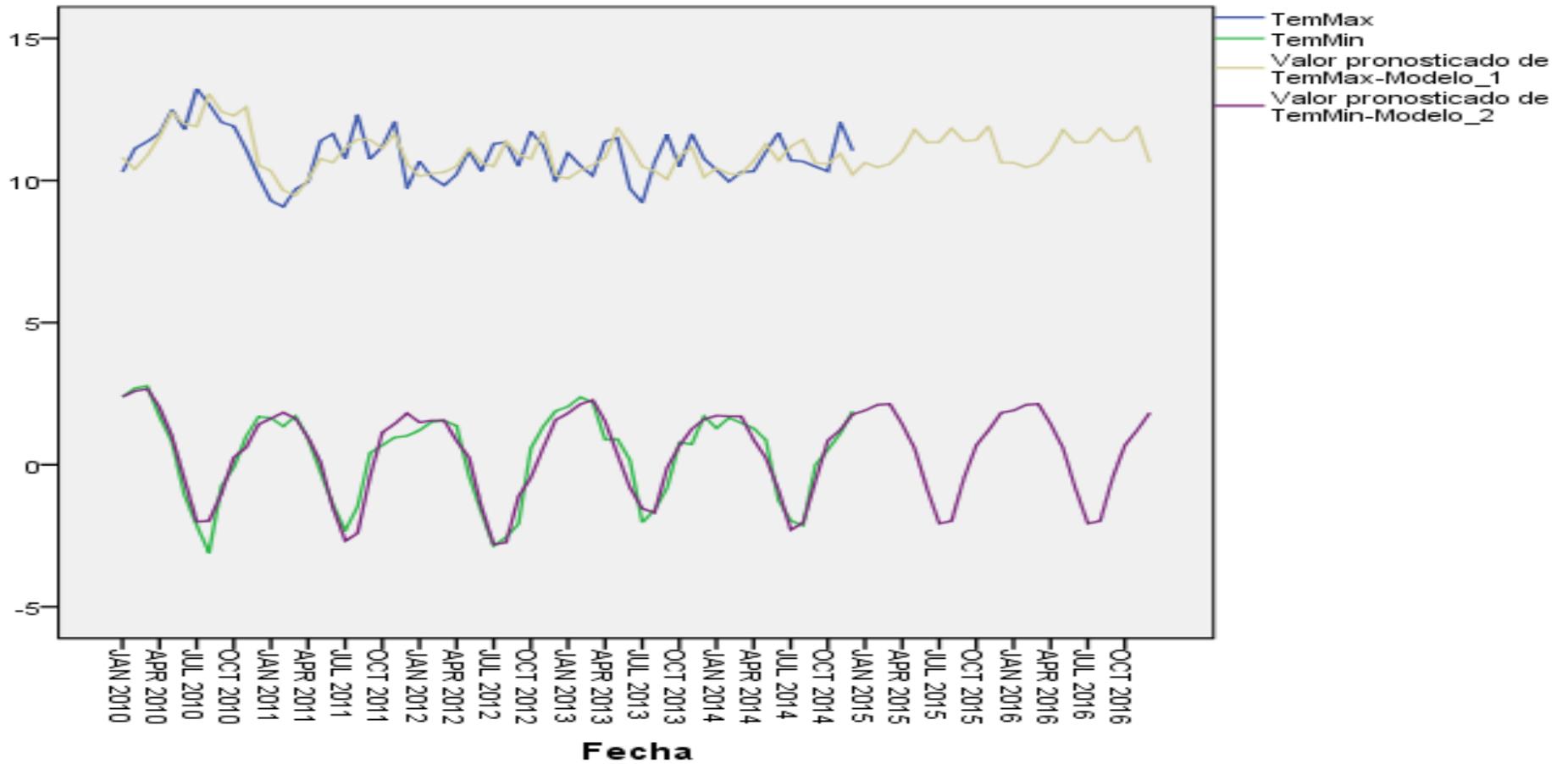
### **ESTACIÓN CHAUPIMARCA**

En la figura 13, se puede observar el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y predecidas desde el año 2010 al año 2016, en el cual se observa que no existe mucha variación en el comportamiento de las temperaturas máximas a partir de los años 2014, 2015 y 2016, más no existiendo bajas considerables para los mismos años en las temperaturas mínimas.

**Figura 13.** Comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y predecidas desde el año 2010 al 2016. Estación Chaupimarca.



**Figura 14.** Comparación de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas desde el año 2010 al 2016. Estación Chaupimarca.

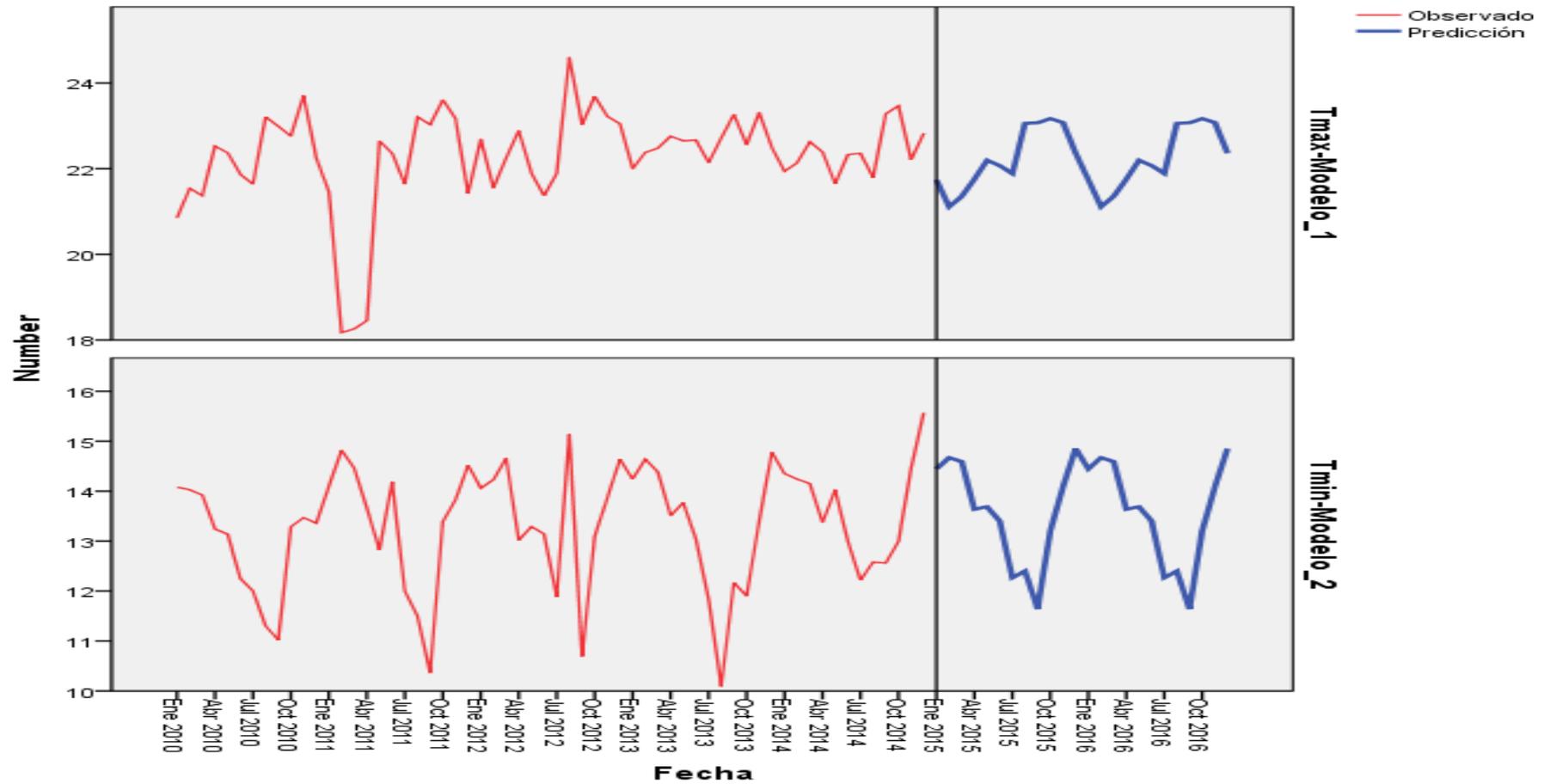


En la figura 14, se puede observar la comparación mediante los trazos de secuencia del comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y con los pronosticados de acuerdo al modelo mediante las series temporales, desde el año 2010 al año 2016, en las cuales se observa que existe mínima variación en el comportamiento de las temperaturas máximas, más no sucediendo así con las temperaturas mínimas a través del tiempo.

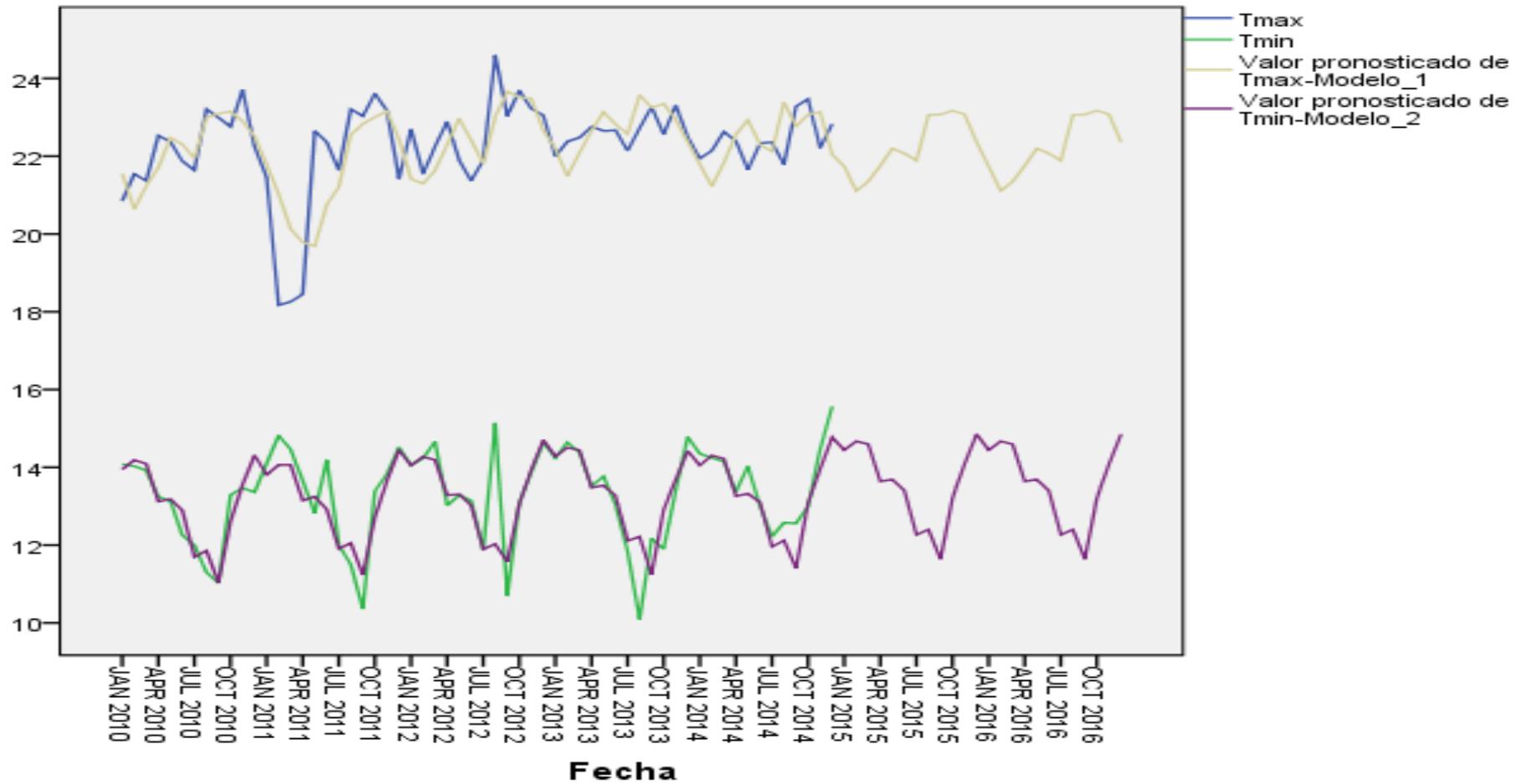
### **ESTACIÓN HUANCABAMBA**

En la figura 15, se puede observar el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y predecidas desde el año 2010 al año 2016, en el cual se observa que no existe mucha variación en el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas en los años 2014, 2015 y 2016 de acuerdo al modelo desarrollado.

**Figura 15.** Comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas desde el año 2010 al 2016. Estación Huancabamba.



**Figura 16.** Comparación de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas desde el año 2010 al 2016. Estación Huancabamba.

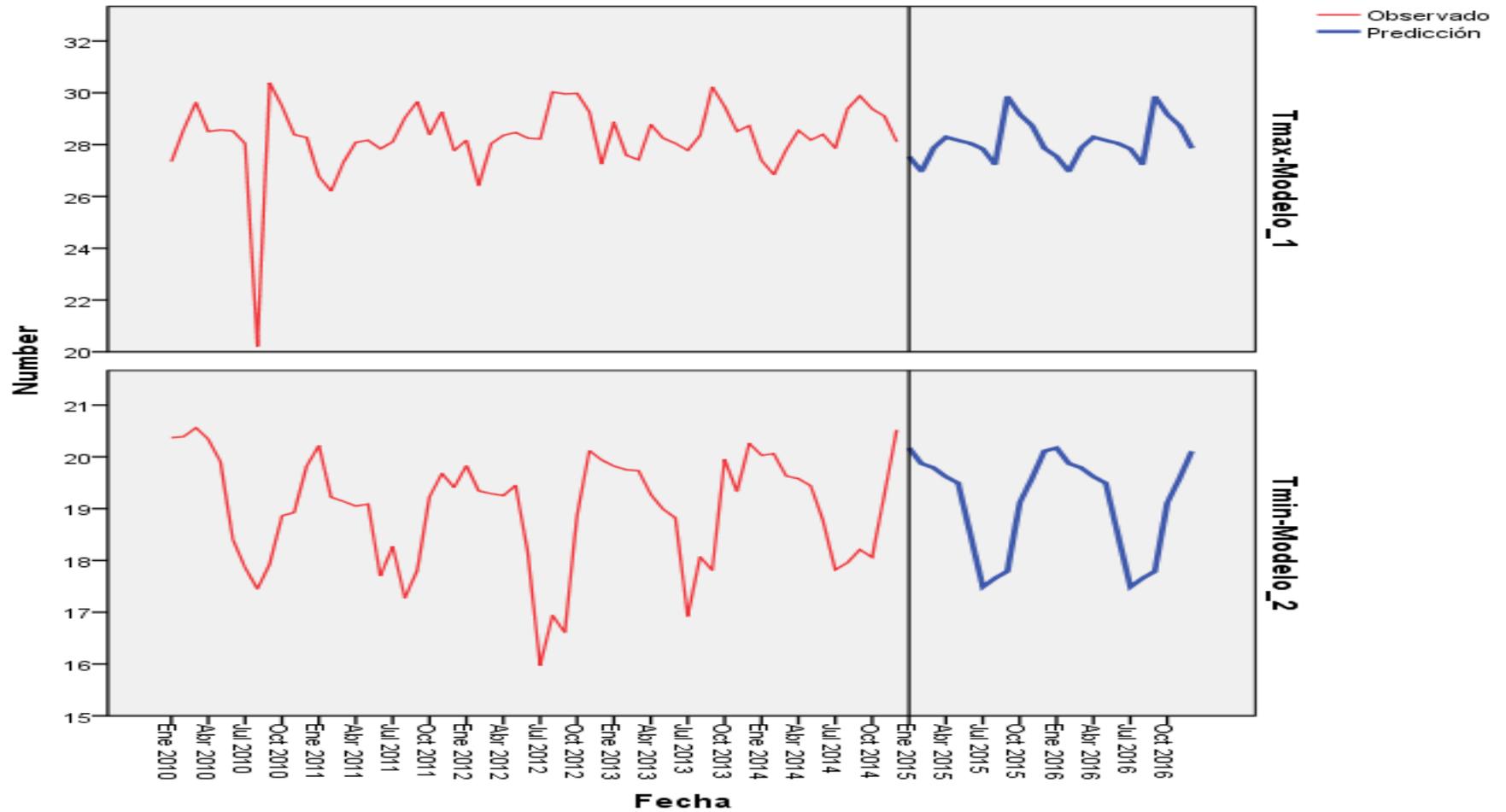


En la figura 16, se puede observar la comparación mediante el gráfico de trazos de secuencia, del comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas con las pronosticadas de acuerdo al modelo mediante las series temporales, desde el año 2010 al año 2016, en las cuales se observa que existen pequeñas variaciones en el comportamiento de las temperaturas máximas a través del tiempo.

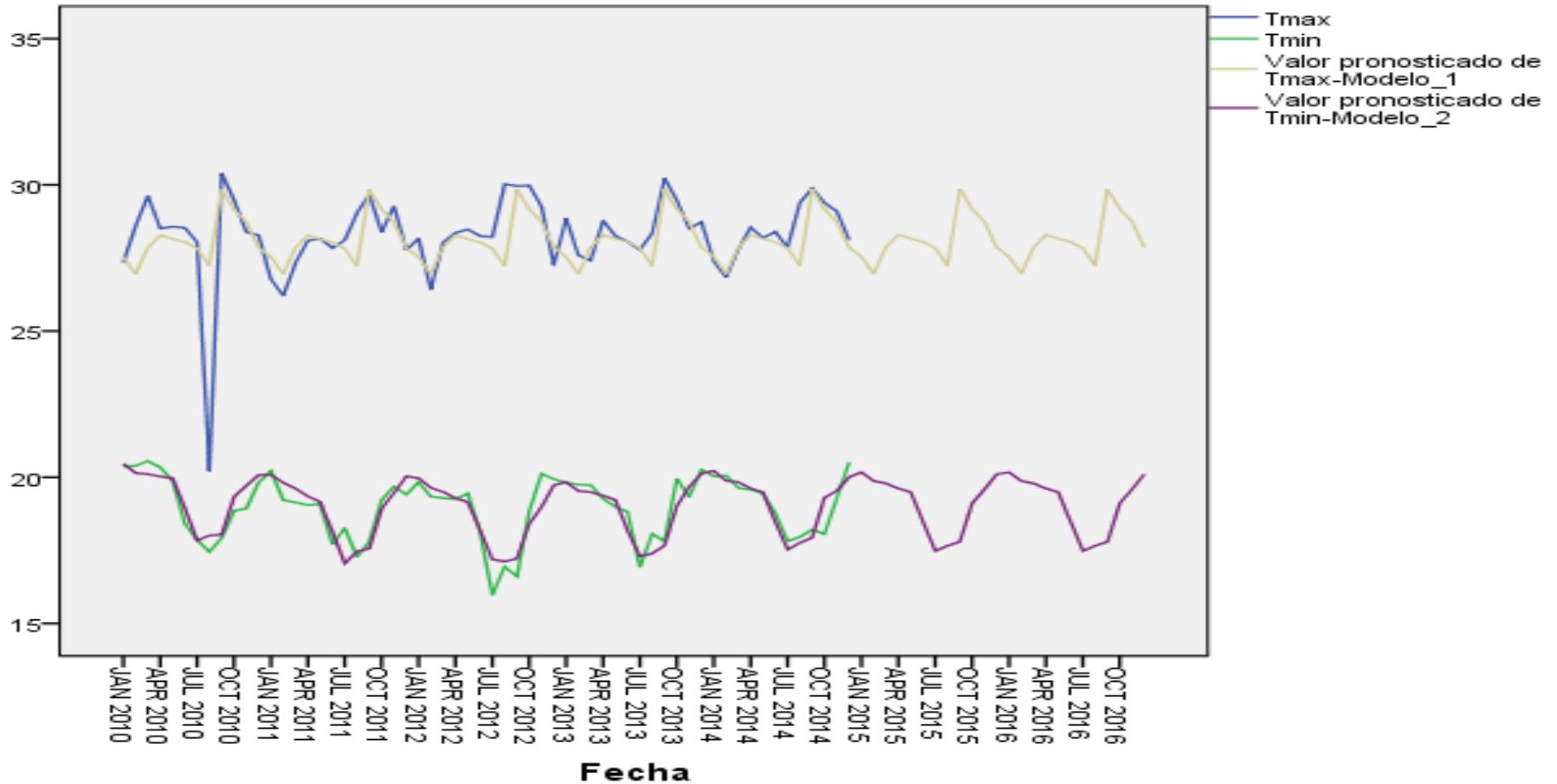
### **ESTACIÓN POZUZO**

En la figura 17, se puede observar el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y predecidas desde el año 2010 al año 2016, en el cual se observa que no existe mucha variación en el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas en los años 2014, 2015 y 2016 de acuerdo al modelo desarrollado sigue la serie en el tiempo.

**Figura 17.** Comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas desde el año 2010 al 2016. Estación Pozuzo.



**Figura 18.** Comparación de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticadas según modelo, desde el año 2010 al 2016. Estación Pozuzo.



En la figura 18, se observa la comparación mediante el gráfico de trazos de secuencia del comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas observadas con las pronosticadas de acuerdo al modelo mediante las series temporales, del año 2010 al 2016, donde se observan pequeñas variaciones en el comportamiento de las temperaturas máximas a través del tiempo.

### 4.3. Prueba de Hipótesis

#### a) Comprobación de la hipótesis de investigación

##### Hipótesis General:

El modelo de Bristow – Campbell, influye en la estimación de la radiación solar global diaria media mensual en la Región Pasco.

**Ho:** No existe diferencia significativa entre los valores estimados de radiación solar global diaria media mensual con el modelo Bristow - Campbell y las temperaturas extremas.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

**HA:** Existe diferencia significativa entre los valores estimados de radiación solar global diaria media mensual con el modelo Bristow – Campbell y las temperaturas extremas.

$$H_A: \mu \neq \mu \neq \mu \neq \mu$$

**Tabla 18**

Análisis de varianza para las cuatro estaciones

ANOVA					
Radiación Evaluada					
	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	84,885	45	1,886	20,767	,047
Dentro de grupos	,182	2	,091		
Total	85,067	47			

**Fuente.** Propia del investigador

En la tabla 18, se muestran los resultados del análisis de varianza para las 4 estaciones, en la cual se observa un  $\alpha = 0,047$  que es menor al  $\alpha = 0.05$  planteado para este análisis, se infiere que existen diferencias significativas a un nivel de significancia del 5%; que quiere decir, que las radiaciones obtenidas para cada estación son diferentes.

**b) El modelo estimador Bristow - Campbell de la radiación solar global diaria media mensual es adaptable a la Región Pasco.**

Esta hipótesis se refiere si los valores estimados de radiación solar global diaria media mensual obtenida a través del modelo de Bristow – Campbell, guardan relación significativa con los valores registrados de temperaturas extremas en las estaciones en estudio y si hay diferencia significativa entre las medias mensuales de estos valores.

$$H_0: \beta = 0$$

$$H_A: \beta < 0$$

Las hipótesis estadísticas nula  $H_0$  y alternativa  $H_a$  para la relación entre los valores estimados de la radiación solar global diaria mensual con el modelo Bristow - Campbell y las temperaturas extremas son:

**$H_0$ :** Los valores estimados de radiación solar global diaria media mensual con el modelo Bristow - Campbell no guardan relación significativa con las temperaturas extremas.

**Ha:** Los valores de radiación solar global diaria media mensual estimada a través del modelo Bristow – Campbell guardan relación significativa con las temperaturas extremas.

**c) Contrastación de las hipótesis:**

Con los resultados de la Tabla 18, sobre la validación del modelo empírico de Bristow - Campbell sobre la aceptación o no de la hipótesis nula referente a la radiación solar global de las 4 estaciones, el programa estadístico SPSS reporta valores de p con un  $\alpha = 0.038 <$  que el  $\alpha = 0.05$ , por lo que se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_a$ ). Por lo que se infiere que las radiaciones solares globales son diferentes para las 4 estaciones en estudio.

#### **4.4. Discusión de resultados**

##### **4.4.1. Referido a las altitudes de las estaciones meteorológicas activas en estudio de la Región Pasco.**

La Tabla 6, nos muestra las altitudes y latitudes para cada estación meteorológica en estudio, la estación de Yanahuanca presenta una latitud de  $10^{\circ}29'29''$  y una altitud de 3190 msnm, la estación de Chaupimarca una latitud de  $10^{\circ}41'40''$  y una altitud de 4260 msnm, la estación de Pozuzo una latitud de  $10^{\circ}3'3''$  y una altitud de 1000 msnm y la estación de Huancabamba (Oxapampa) una latitud de  $10^{\circ}35'34''$  y una altitud de 1850 msnm, información que sirve para alimentar al modelo Bristow – Campbell y determinar la radiación solar global de las estaciones en estudio. (Baigorria et al. 2003).

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciadas por la topografía, latitud y altitud, entre otros factores (Baigorria et al., 2003), 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).

En este caso, los valores empíricos ( $a_B$ ,  $b_B$  y  $c_B$ ) tienen también un significado físico;  $a_B$  representa el máximo valor de  $\tau$  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  $\Delta T$  sobre la máxima  $\tau$  de la atmósfera (Mesa y Varas, 2 000).

En el proceso de validación del modelo de Bristow - Campbell se hallaron altos valores de radiación solar global para las localidades en estudio que son representativos en la producción de una ecuación de aplicación general.

#### **4.4.2. Referido a las temperaturas máximas y mínimas diario mensuales de las estaciones en estudio**

Si se examina la serie de temperaturas medias anuales de los 5 años, se observa una tendencia lineal negativa y positiva, es decir, las temperaturas estarían variando hacia un enfriamiento y un calentamiento. Sin embargo, dentro del periodo analizado se observan épocas de calentamiento alternadas con épocas de enfriamiento (Zamora & Santana 1979).

Para el presente estudio se encontraron temperaturas máximas y mínimas para cada estación en estudio teniendo una máxima de 16 °C el 03 de agosto del 2011 y una mínima de -7.7 °C el 19 de julio del 2012 para la estación de Chaupimarca, así como también, una temperatura máxima de 26.2 °C el 02 de mayo del 2014 y una temperatura mínima de 2.8 °C el 08 de agosto del 2012 para la estación de Yanahuanca, estas temperaturas extremas halladas se deben a que estas estaciones se encuentran en una zona de sierra (suni o puna) a una altitud de 4260 msnm y 3190 msnm respectivamente, en donde existe poca nubosidad y mínima humedad relativa, llegándose a obtener una época de frío excesivo.

También, las temperaturas máximas y mínimas para las otras estaciones, teniendo como temperatura máxima de 36,6 °C el 23 de agosto del 2010 y una temperatura mínima de 11.6 °C el 24 de julio del 2012 para la estación de Pozuzo que se encuentra a una altitud de 1000 msnm y también una temperatura máxima de 27.8 °C el 07 de octubre del 2010 y una temperatura mínima de 4.4 °C el 15 de julio del 2014, estas temperaturas extremas se deben a que estas estaciones se encuentran en una zona de selva alta (Región yunga) en donde existe mucha nubosidad y mayor humedad relativa, llegándose a épocas de excesivo calor.

De los resultados obtenidos y desde la perspectiva de la variación multianual de las temperaturas extremas, las mayores temperaturas se presentan en la zona de selva alta, y las menores temperaturas se registran en las zonas alto andinas, principalmente en Chaupimarca.

Los índices de los extremos climáticos de las temperaturas muestran una disminución de días fríos y aumento de días cálidos, entre 0,2 a 0,6 día/año en la mayoría de las estaciones utilizadas en el presente trabajo, con excepción de la selva, donde esta tendencia es opuesta.

La característica más sobresaliente de la tendencia del índice de número de días con heladas meteorológicas y noches frías, es la presencia de valores negativos (disminución de días con heladas) en las partes altas de Cerro de Pasco, con valores entre 0,4 a 0,8 días/año, mientras en la zona adyacente al centro de la ciudad y laguna, la tendencia es positiva (incrementos del número de días con heladas). Este patrón indica que las regiones más altas están cada vez más cálidas, lo cual representa un problema para las regiones alto andinas, pues aceleraría los deshielos de los nevados permanentes. Este fenómeno causaría en primer momento un incremento de caudales y luego una disminución drástica que afectaría la agricultura y el agua para consumo humano en muchas regiones del Perú, donde la principal fuente de agua son los nevados permanentes.

#### **4.4.3. Referido a la estimación de la potencialidad de radiación solar global en las estaciones de estudio**

**Radiación solar**, son las cantidades de radiación electromagnética emitida por el sol; mientras que **irradiancia** es la magnitud para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

Se muestra el mapa del **Atlas de Energía Solar del Perú** para Cerro de Pasco por mes. Esta indica el promedio diario de la irradiancia solar en

kW.h/m<sup>2</sup>. El término '**irradiancia**' describe la **radiación** que llega a la tierra después de pasar por la atmósfera.

Este mapa permite, evaluar el rendimiento de sistemas solares según el lugar de su instalación. Son parte del Atlas de Energía Solar, que fue elaborado y publicado en el año 2003 por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Dirección General de Electrificación Rural (DGER-MEM) del Ministerio de Energía y Minas (MINEM).

En las tablas 16, 17, 18 y 19, se estimó la radiación solar global media mensual de 4,75 kW.h/m<sup>2</sup>/día anual entre los años 2010 al 2014, valor casi equivalente al estimado por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE, 1992) que presentó 4,70 kW.h/m<sup>2</sup>/día promedio anual siendo un valor bastante apropiado para la región Pasco. En cambio, SENAMHI (2003) da un valor en el intervalo de (5,13 – 5,63) kW.h/m<sup>2</sup>/día, por lo que los valores de radiación solar global estimados mediante el modelo Bristow - Campbell desarrollado y adaptado en esta investigación se encuentra cerca de los valores estimados por SENAMHI.

El modelo de Bristow – Campbell estima las radiaciones solares diarias media mensual en forma puntual de las 04 estaciones meteorológicas en estudio que se encuentran en la Región Pasco, encontrándose con mayor radiación solar global la estación de Yanahuanca con 6,98 kW.h/m<sup>2</sup>/día, Chaupimarca con 6.25 kW.h/m<sup>2</sup>/día que se encuentran en la zona de sierra por su ubicación geográfica (Región suni y puna) al contar con mayor tiempo de exposición al sol y la altitud hace que exista poca nubosidad;

también la estación de Pozuzo con 4.45 kW.h/m<sup>2</sup>/día y Huancabamba con 4.32 kW.h/m<sup>2</sup>/día, estaciones ubicadas en la zona de selva (Región yunga). Las estaciones situadas en la sierra cuentan con la presencia de la Cordillera de los Andes, caracterizada por la presencia de cumbres y montañas de alturas hasta 6 000 msnm y valles de 3 000 msnm que hacen que tengan radiaciones solares similares al de Arequipa (Mesa y Vara, 2000; citado por Atlas de Energía Solar del Perú, 2003).

Las estaciones que cuentan con menor radiación solar global Pozuzo y Huancabamba, ambas estaciones situadas en zona de selva alta, formado por pendientes y valles al este de los Andes bajo los 2000 msnm (Cáceres *et al.* 1984) la radiación es mayor de 4,0 kW.h/m<sup>2</sup>/día, debido a que tiene menor altitud con menor humedad.

Estos resultados corroboran a los obtenidos por SENAMHI mediante el modelo de Angstrom - Prescott (Atlas de Energía Solar del Perú, 2003) y por tanto las estimaciones de radiaciones solares globales diarias media mensual con el modelo Bristow - Campbell validado nos dan valores bastante confiables.

La localidad de Yanahuanca es la que mayor potencial de energía solar global presenta, con un valor promedio de 6,41 kW.h/m<sup>2</sup>/día, y la localidad que menor radiación solar global tiene es la estación de Huancabamba con 3.48 kW.h/m<sup>2</sup>/día promedio anual por contar con un microclima especial con reforestación tupida y situarse como valle y quebrada.

Con respecto a la radiación solar global horaria media mensual en la zona de la sierra se tiene un valor de 5,6 kW.h/m<sup>2</sup>/día porque cuentan con climas

secos y baja nubosidad y la zona selva tiene menor radiación solar global diaria media mensual considerada baja con 4,2 kW.h/m<sup>2</sup>/día debido que tienen bosques húmedos con gran nubosidad, tal como lo indica el Atlas departamental del Perú, tomo 10 (2003).

La explicación de las diferencias de radiación solar está dada por el lugar, varía según la latitud (a mayor distancia de la línea ecuatorial menor radiación), la altura sobre el nivel del mar (a más altura más radiación), la orografía (valles profundos tienen menos horas de sol) y la nubosidad (a mayor nubosidad menos radiación) reportado por Baigorria et. Al., 2001.

La temperatura del aire puede ser estimada por las coordenadas geográficas mediante ecuaciones de regresión lineal múltiple, basándose en el hecho que la distribución de calor del globo terrestre es condicionada por la latitud, que determina la disponibilidad de radiación solar incidente en la superficie terrestre; por la altitud, producto de la variación de presión y del enrarecimiento del aire; y algunas veces por la longitud, que expresa el efecto de la proximidad a los océanos y de la continentalidad (Coelho et al., 1973; Garabatos, 1990; Pereira et al., 2002).

El presente trabajo de investigación, concluye que la aplicación del modelo Bristow - Campbell adaptado, es un instrumento de gran trascendencia y utilidad para generar una base de datos completa de la radiación solar global disponible en la Región Pasco.

#### **4.4.4. Referido a los resultados de las Radiaciones Solares diarias media mensuales mediante el desarrollo del modelo Bristow – Campbell para las estaciones en estudio**

La tabla 15, muestra que la radiación Solar global media mensual estimada para la Región Pasco es de 4,74817395 kW.h/m<sup>2</sup>/días anuales.

La Estación de Yanahuanca que tuvo en el mes de diciembre la mayor radiación con 6,9827 kW.h/m<sup>2</sup>/día, perteneciente a la sierra y la Estación de Huancabamba en el mes de febrero con menor radiación solar con 3,0157 kW.h/m<sup>2</sup>/día, perteneciente a la selva.

Los resultados obtenidos en las tablas 16, 17, 18 y 19 de las radiaciones globales estimados, se debe a diferentes factores climatológicos, entre otros factores, a la cercanía del país a la zona ecuatorial, donde la radiación ultravioleta (UV) cae en forma perpendicular sobre el territorio, según un estudio del neozelandés Richard Mackenzie citado por Ccora en 2006.

El estudio, publicado en 2006, sitúa además a Bolivia como el segundo lugar con mayor radiación solar del mundo, seguido de Argentina y Chile.

En el caso de Perú, la intensa radiación se incrementó también debido a la contaminación ambiental que ocasiona que cada año el país pierda un promedio de un uno por ciento de la capa de ozono, gas que está en la atmósfera y que amortigua el paso directo de los rayos UV. Ccora enfatizó además que a "los peligrosos valores de radiación solar" se sumó ese año.

El Niño, fenómeno climatológico que eleva la temperatura del mar en la costa y produce sequías en las zonas altas.

La falta de lluvias y nubosidad usuales en los meses de enero y febrero en las zonas andinas facilitan el paso de radiación ultravioleta.

**4.4.5. Referido a los resultados de las temperaturas máximas y mínimas observadas y pronosticados mediante la modelización con las series temporales para cada estación de la Región Pasco.**

En los gráficos 3, 5, 7 y 9 se presenta el comportamiento que presentan las temperaturas máximas y mínimas reales (2010 al 2014) y pronosticadas (2015 y 2016), aplicando la técnica del modelaje mediante las series temporales para ver el comportamiento que desarrollan las temperaturas máximas y mínimas observadas en comparación con las temperaturas máximas y mínimas pronosticadas para cada estación en estudio.

En esta parte, se analizan series temporales de temperaturas mensuales - máximas absolutas, mínimas absolutas, medias de máximas y medias de mínimas, de 04 estaciones meteorológicas de la Región Pasco. Se utilizó la metodología de Modelos Expertos para obtener el pronóstico de temperaturas sobre estas series a través de un modelo para cada una de ellas. El enfoque de los modelos expertos va dirigido al objetivo básico de la construcción de modelos estocásticos a partir de una evidencia empírica (Armando, 1994). Una clase de procesos particularmente importante en el análisis de series cronológicas estables es la de los procesos estacionarios (Bras y Rodríguez-Iturbe, 1993; Hamilton, 1994).

Con los datos de las temperaturas diarias y medias mensuales disponibles (más de 5 años) se comienza el análisis con una primera exploración del gráfico de la serie para detectar posibles valores anómalos y otras

características sobre su comportamiento. En el gráfico de temperaturas originales de las cuatro series se observa una fuerte estacionalidad con fluctuaciones periódicas de la variable cada 12 meses. Esto se verifica con el periodograma donde existe una amplitud única destacada sobre las demás, correspondiente a la frecuencia que da el periodo de 12 meses, y en las funciones de autocorrelación típicas de una serie estacional no estacionaria (gráficos 3, 5, 7 y 9).

En cuanto a los gráficos 4, 6, 8 y 10 que representan los trazos de secuencias que se siguen comparando las temperaturas máximas y mínimas reales y pronosticadas a través de los 7 años (2010 al 2016), en ellas se observa que no existe muchas variaciones en cuanto al comportamiento de las temperaturas extremas (máximas y mínimas).

En términos generales, durante los años analizados (2010 - 2016), la temperatura máxima media en las zonas de estudio presenta, en promedio, una tendencia creciente mínima. El crecimiento se estima a razón de  $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/5\text{ años}$ .

Para las estaciones de sierra (Yanahuanca y Chaupimarca) durante los cinco años (2010 al 2014) se presentaron temperaturas máximas reales más bajas en las estaciones de sierra que fueron, en su orden:  $13.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $12.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $11.72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $11.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $12.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectivamente, todas estas correspondiente a la estación de Yanahuanca, así como también presentando las temperaturas mínimas reales más bajas que fueron:  $-3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-2.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-2.86\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-2.03\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-2.14\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la misma estación de Chaupimarca.

Para las estaciones de selva alta (Pozuzo y Huancabamba) durante los cinco años (2010 al 2014) se presentaron temperaturas máximas reales más altas que fueron, en su orden: 30.39 °C, 29.66 °C, 30.03 °C, 30.23 °C y 29.89 °C respectivamente, todas estas correspondiente a la estación de Pozuzo, así como también presentando las temperaturas mínimas reales más bajas que fueron: 11.02 °C, 10.35 °C, 10.69 °C, 10.09 °C y 12.23 °C para la estación de Huancabamba.

## CONCLUSIONES

- Las temperaturas máximas y mínimas permiten el buen desarrollo del modelo estimador de la radiación solar global Bristow – Campbell en las distintas localidades de la región Pasco.
- El modelo físico estimador de la radiación solar global es el Bristow - Campbell; esta radiación solar estimada es aplicable tanto en la sierra y selva además su aplicación contribuiría para la utilización en diferentes equipos tecnológicos y así reducir el CO<sub>2</sub> mejorando la calidad ambiental de la Región Pasco.
- El modelo Bristow - Campbell es adaptable a la región Pasco ya que permite estimar confiablemente la radiación solar global diaria media mensual potencial en base a las latitudes, altitudes y coeficientes de permisividad.
- Los valores máximos de radiación solar global se encuentran en la estación de Yanahuanca y en otras zonas con valores altos de elevación del terreno sobre el nivel del mar, mientras los mínimos aparecen en los sectores más bajos de la selva alta.
- La aplicación del modelo estimador Bristow – Campbell adaptado, resulta un instrumento de gran utilidad para generar una base de datos completa de la radiación solar disponible en la Región Pasco.
- En el estudio se demuestra que los meses de noviembre y diciembre presentan los valores más elevados de radiación global, mientras junio y julio son los meses que registran menor cantidad de radiación global.
- Los datos de temperaturas máximas y temperaturas mínimas se registran en los meses de junio, julio y agosto para las zonas de sierra y selva alta.

## RECOMENDACIONES

- La aplicación de los diferentes modelos matemáticos para estimar la radiación solar global, ya que es bastante simple su diseño y aplicación que permitirá la producción de nuevos equipos tecnológicos y así reducir la contaminación ambiental.
- La validación y desarrollo del modelo físico Bristow – Campbell como un instrumento que permite estimar confiablemente la radiación solar global diaria media mensual potencial en la Región Pasco; con alimentar solo datos de temperaturas máximas y mínimas diarias de las estaciones meteorológicas existentes.
- Implementar y ampliar las diferentes estaciones meteorológicas con instrumentos, como piranómetros y heliógrafos que permitan medir la radiación solar global en forma directa de acuerdo a las altitudes, latitudes, climas, etc., y obtener datos reales y confiables en la Región Pasco.
- A la escasez de información de energía solar y la aplicación del modelo estimador de Bristow - Campbell en la Región Pasco, es necesario realizar investigaciones de radiación solar y sus aplicaciones en las energías solares térmicas y fotovoltaicas; para la implementación de laboratorios en base a estas energías en universidades, institutos e instituciones de investigación y productivas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Hernández, O., & Montaña Peralta, T. 2014. La radiación solar global en la provincia de Loja, evaluación preliminar utilizando el método de Hottel. *Ingenius*, 11, 25–31.
- Armando, J. (1994). Introducción al Tratamiento de Series Temporales. Aplicación a las ciencias de la salud. Madrid. España. Ed. Díaz de Santos.
- 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.
- Barros, V. (2005). *El Cambio Climático Global*. (Libros el Zorzal, Ed.) (2da. edición). Buenos Aires.
- Bengulescu, M., Blanc, P., & Wald, L. (2016). Characterizing temporal variability in measurements of surface solar radiation and its dependence on climate. *Energy Procedia*, 97, 164–171. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.045>.
- Brack A., Yauri E. 2010. Perú: País Maravilloso/Manual de educación ambiental para docentes. Edit. Gama Gráfica SRL. Lima. Perú. 247 p.
- Castro M., Carpio J., Guirado R, Colmenar A.; Dávila, L. 2008. Energía Solar Fotovoltaica. Edit. Artes Gráficas. Gala, España. 68 p.
- Castro M., Colmenar A., Carpio J., Guirado, R. 2006. Energía Solar Térmica de Media y alta Temperatura. Edit. Artes Gráficas. Gala, España. 68 p.
- Castro M., Colmenar, A. 2008. Energía Solar Térmica de Baja Temperatura. Edit. Artes Gráficas. Gala, España. 94 p.
- CENERGIA, 2004. Diagnóstico del uso de la energía solar y eólica en el Perú. MINEM. Lima, Perú. 123 p.
- CER – UNI. 1990. Seminario Internacional: Las energías renovables y el desarrollo de Regiones Rurales. CER. Lima Perú.
- Cochrane, J., Baker, CR. (1985). Annual and Diurnal Variations in Soil Temperatures at Kew, Great Britain». *Agricultural and Forest Meteorology*. Modelos estocásticos para la predicción de temperaturas mensuales en distintas estaciones de la comunidad de Madrid v.34, pp 235-240.

- CONAM, 2013. Herramienta para la estimación de las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> generación eléctrica por energías renovables.
- Córdova, E. 2009. Visión de crisis energética y calentamiento global, consecuencias en América Latina y el Perú, UNI. Lima – Perú. Ponencia: *XIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XVI APES) 2009 – Arequipa.*
- Camayo Lapa, Becquer Frauberth. 2013. Tesis “Energía solar y calidad ambiental en la Región Junín”. Universidad Nacional del Centro del Peru. Huancayo – Perú.
- Cañada, J. (1988). Global solar radiation in Valencia using sunshine hours and meteorological data. *Solar and Wind Technology*, 5(6), 597–599. [https://doi.org/10.1016/0741-983X\(88\)90055-0](https://doi.org/10.1016/0741-983X(88)90055-0).
- Castro Diez, Y. (1986). *Determinación y estudio de las características de la radiación solar una contribución a su predicción climatológica mediante modelos.* Universidad de Granada. Tesis doctoral.
- Centro Español de Metrología (1990). Escala Internacional de Temperatura EIT-90. España: Ministerio de industria, Turismo y Comercio
- Delgado Orellana y Orellana Samaniego. 2015. “Estimación de la radiación solar global diaria en el Cantón Cuenca, mediante la aplicación del modelo Bristow – Campbell”. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca – Ecuador.
- De la Casa A.; Ovando G.; Rodríguez A. 2011. Estimación de la Radiación Solar Global en la Provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *RIA* 32(2): 45-61.
- Espinoza R., Secado de productos agroalimentarios con energía solar; ponencia: *XIX Simposio Peruano de Energía Solar (XVII-SPES)*, 12-17.11.2012. Puno, Perú.
- Foukal P., G. North and T. Wigley\*, 2004. A Stellar View on Solar Variations and Climate. *Science* Vol. 306 no. 5693 pp. 68-69.
- Gueymard C. 2010 Progress in direct irradiance modeling and validation. Proc. ASES Annual Conf. Phoenix, AZ, USA.
- Horn M. 2006. El estado actual del uso de la energía solar en el Perú Publicado en “Perú económico”, Lima, Vol XXIX, Nr.11, nov. 2006: *Los retos energéticos del Perú*, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

- Horn M. 2012. Energía Solar para regiones rurales remotas; Seminario Internacional: Las energías renovables hoy perspectivas de colaboración entre América Latina y Europa, 1 y 2 de marzo de 2012, Lima, Perú.
- Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press. 390 p
- Jenkins, G. M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and Control. 2ªEd. San Francisco.
- Jutglar L. 2004. Energía Solar: Energías Alternativas y Medio Ambiente. Ediciones Ceac. España. 268 p.
- Levich. 1995. “Teoría del campo electromagnético y teoría de la relatividad”. España. Editorial Reverte S. A.
- Liou, K.L. (1976). On the absorption, reflection and transmission of solar radiation in cloudy atmosphere. *Journal of Atmospheric Science*, 33, 798–850.
- Meizoso Lopez, M. 2012. “Distribución de la irradiación solar global directa y difusa, en la ciudad de La Coruña. España.
- Hernández Sampieri. 2010. “Metodología de la Investigación”. 5ta ed. Mc Graw Hill. México,
- Muñoz A., Delfor F. 2005. Tesis: Aplicación de la energía solar para electrificación rural en zonas marginales del país. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú
- Pacco K. 2008. Tesis; Evaluación Energética Comparativa de un Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico (SHEFV) de baja potencia para la electrificación de una vivienda urbana; Tacna-Perú.
- Raichijk C., Taddei, F. 2012. Estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 16, 2012. Argentina.
- Rondon, F. 1986. Estimación de temperatura media mensual y anual para zonas sin información climatológica - aplicación al cálculo de evaporación y evapotranspiración potencial. Oriente Agropecuario.
- Sarmiento, P. 1995. Energía solar: Aplicaciones e ingeniería. Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso. Chile. 250 p
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Ministerio de Energía y Minas (2003). Atlas de Energía Solar del Perú. Lima-Perú. 72 p.

- Silva, V. J. da, Silva, C. R. da, Finzi, R. R., & Dias, N. da S. (2012). Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. *Ciência Rural*, 42(2), 276–282.
- Viorel B. 2008. “Modeling solar radiation at the earth’s Surface: Recent advance”. Springer science and Business media.
- Zanabria P., Sequeiros, E. 2010. Desarrollo de las energías renovables, en zonas rurales del cusco, experiencias del CECADE, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

## ANEXOS

### ANEXO 1. Instrumentos

#### Temperaturas máximas y mínimas –

#### Estación Chaupimarca

FECHA	T MAX	T MIN
ene-10	10.3	2.3967
feb-10	11.12857	2.6928
mar-10	11.3709	2.77419
abr-10	11.66667	1.7
may-10	12.48709	0.80967
jun-10	11.8	-1.0433
jul-10	13.2258	-2.13225
ago-10	12.6806	-3.1
sep-10	12.0533	-0.7533
oct-10	11.90645	0.1
nov-10	11.08333	1.0067
dic-10	10.129	1.6935
ene-11	9.2935	1.63548
feb-11	9.075	1.35357
mar-11	9.703225	1.7129
abr-11	9.9567	0.91667
may-11	11.4032258	-0.254838
jun-11	11.6367	-1.40333
jul-11	10.78064	-2.33548
ago-11	12.30967	-1.48709
sep-11	10.74667	0.41
oct-11	11.1967	0.68387
nov-11	12.08333	0.96333
dic-11	9.732258	1.016129
ene-12	10.67419	1.20645
feb-12	10.10689	1.51379
mar-12	9.83225	1.54516
abr-12	10.21667	1.36667
may-12	11.029	-0.3935

jun-12	10.3333	-1.66333
jul-12	11.2935	-2.86129
ago-12	11.34516	-2.54838
sep-12	10.51	-2.086667
oct-12	11.716129	0.580645
nov-12	11.21	1.343333
dic-12	9.964516	1.893548
ene-13	10.97096	2.04516
feb-13	10.5178	2.375
mar-13	10.17096	2.2
abr-13	11.38333	0.88
may-13	11.5	0.9
jun-13	9.71667	0.17
jul-13	9.216129	-2.029
ago-13	10.63548	-1.593548
sep-13	11.62	-0.82333
oct-13	10.49032	0.78387
nov-13	11.63667	0.71333
dic-13	10.76129	1.7
ene-14	10.3774419	1.280645
feb-14	9.957	1.65357
mar-14	10.3	1.4677
abr-14	10.32333	1.28667
may-14	11.0129	0.8645
jun-14	11.68	-1.25
jul-14	10.70967	-1.9677
ago-14	10.6677	-2.1387
sep-14	10.49333	-0.006777
oct-14	10.3129	0.52258
nov-14	12.05	1.09667
dic-14	11.0516	1.8967

**Temperaturas máximas y mínimas promedio – Estación Yanahuanca**

FECHA	T MAX	T MIN
ene-10	19.1838	7.27419
feb-10	19.1178	7.021428
mar-10	18.880645	7.68709
abr-10	19.91	7.59333
may-10	21.2387	6.8677
jun-10	22.19667	6.31
jul-10	22.7387	5.703258
ago-10	23.2	4.109677
sep-10	20.98	6.71667
oct-10	20.15806	7.30645
nov-10	20.32	8.12333
dic-10	19.516129	8.416129
ene-11	17.277419	7.72258
feb-11	18.30357	7.7821428
mar-11	18.4548	7.68709
abr-11	18.79	7.54667
may-11	22.2129	6.67096
jun-11	21.39	6.35
jul-11	20.3129	6.08709
ago-11	20.74516	5.74838
sep-11	19.88	7.51
oct-11	19.058	7.60645
nov-11	20.28333	7.78333
dic-11	18.1645	7.61935
ene-12	19.42258	7.38738
feb-12	17.85517	7.4724
mar-12	19.729	7.82258
abr-12	17.92	7.32333
may-12	20.558	7.28064

jun-12	20.1	5.73
jul-12	20.9516	5.36129
ago-12	21.8	5.2
sep-12	20.50667	6.23667
oct-12	21.30645	6.016129
nov-12	20.49667	5.59667
dic-12	19.5516	5.79032
ene-13	20.90645	5.316129
feb-13	20.175	6.15
mar-13	19.9774	6.30645
abr-13	21.01333	6.92333
may-13	20.629	6.06129
jun-13	20.49	6.35667
jul-13	20.9387	6.193548
ago-13	21.00645	6.5419
sep-13	21.52	6.17667
oct-13	20.27096	6.232258
nov-13	20.75	6.78333
dic-13	19.78709	6.40645
ene-14	19.8258	6.593548
feb-14	21.132	6.4321
mar-14	21.02258	6.6548
abr-14	21.46667	6.72333
may-14	22.39677	6.5
jun-14	23.24333	6.00333
jul-14	21.5677	6.16129
ago-14	22.829	5.46129
sep-14	21.90333	5.91333
oct-14	20.78709	6.393548
nov-14	22.2	6.19333
dic-14	20.99	6.132258

**Temperaturas máximas y mínimas promedio – Estación Pozuzo**

FECHA	T MAX	T MIN
ene-10	27.3419	20.37419
feb-10	28.5928	20.3928
mar-10	29.6225	20.5548
abr-10	28.51333	20.34
may-10	28.57419	19.9
jun-10	28.5333	18.41333
jul-10	28.0387	17.8645
ago-10	20.2096	17.4516
sep-10	30.39333	17.9333
oct-10	29.4838	18.8516
nov-10	28.3867	18.9333
dic-10	28.2838	19.8129
ene-11	26.77319	20.2129
feb-11	26.2072	19.2143
mar-11	27.32258	19.1419
abr-11	28.09333	19.0467
may-11	28.17419	19.0903
jun-11	27.84	17.7
jul-11	28.1032	18.2774
ago-11	29.0387	17.2774
sep-11	29.66	17.8067
oct-11	28.3806	19.23225
nov-11	29.2733	19.6867
dic-11	27.7677	19.40645
ene-12	28.17419	19.8258
feb-12	26.41379	19.3448
mar-12	28.03225	19.29032
abr-12	28.36333	19.2467
may-12	28.4774	19.4516

jun-12	28.2533	18.14
jul-12	28.2193	15.97419
ago-12	30.0322	16.9387
sep-12	29.96	16.6067
oct-12	29.987	18.8645
nov-12	29.26	20.12
dic-12	27.2516	19.93548
ene-13	28.8709	19.81935
feb-13	27.5928	19.75
mar-13	27.40645	19.7225
abr-13	28.7867	19.2733
may-13	28.24516	18.9935
jun-13	28.0467	18.82
jul-13	27.7806	16.9161
ago-13	28.34838	18.07096
sep-13	30.2267	17.8067
oct-13	29.4838	19.9548
nov-13	28.5067	19.3333
dic-13	28.729	20.2645
ene-14	27.3967	20.03225
feb-14	26.8428	20.06428
mar-14	27.8	19.6258
abr-14	28.5533	19.5867
may-14	28.180645	19.4387
jun-14	28.4	18.767
jul-14	27.8645	17.81935
ago-14	29.3935	17.96129
sep-14	29.8867	18.2067
oct-14	29.38709	18.058
nov-14	29.1	19.28
dic-14	28.10322	20.5225

**Temperaturas máximas y mínimas promedio – Estación Huancabamba**

FECHA	T MAX	T MIN
ene-10	20.847	14.087
feb-10	21.5357	14.03214
mar-10	21.3677	13.9129
abr-10	22.5267	13.2367
may-10	22.3677	13.13548
jun-10	21.8767	12.25
jul-10	21.63548	12
ago-10	23.2096	11.3
sep-10	22.99	11.02
oct-10	22.758	13.29
nov-10	23.71	13.47
dic-10	22.2515	13.3645
ene-11	21.46129	14.1032
feb-11	18.175	14.8214
mar-11	18.2645	14.46129
abr-11	18.4533	13.56
may-11	22.6548	12.8161
jun-11	22.3633	14.1933
jul-11	21.63548	12
ago-11	23.21	11.5
sep-11	23.0333	10.3533
oct-11	23.60645	13.39677
nov-11	23.1733	13.8333
dic-11	21.4193	14.5193
ene-12	22.6967	14.06129
feb-12	21.555	14.2827
mar-12	22.2548	14.66129
abr-12	22.8933	13.0233
may-12	21.9032	13.2967

jun-12	21.3733	13.1367
jul-12	21.8967	11.88064
ago-12	24.6	15.13548
sep-12	23.03	10.6933
oct-12	23.687	13.09677
nov-12	23.22	13.8767
dic-12	23.0548	14.6354
ene-13	22.0032	14.23548
feb-13	22.37857	14.6428
mar-13	22.4838	14.3806
abr-13	22.76	13.51
may-13	22.6516	13.7677
jun-13	22.6733	13.0433
jul-13	22.13548	11.8419
ago-13	22.7258	10.09
sep-13	23.2767	12.1767
oct-13	22.5645	11.9
nov-13	23.31	13.4
dic-13	22.4936	14.7871
ene-14	21.9387	14.3548
feb-14	22.1392	14.2357
mar-14	22.629	14.1516
abr-14	22.39	13.3733
may-14	21.6548	14.0258
jun-14	22.3242	13
jul-14	22.3645	12.2258
ago-14	21.79	12.58
sep-14	23.2833	12.5567
oct-14	23.4677	12.9967
nov-14	22.2067	14.4567
Dic-14	22.829	15.57419

## REGISTRO DE DATOS DE TEMPERATURA MÁXIMAS Y MÍNIMAS DIARIAS DE LAS 4 ESTACIONES EN ESTUDIO - CERRO DE PASCO

Estación : CERRO DE PASCO , Tipo Convencional - Meteorológica

Departamento : PASCO      Provincia : PASCO      Distrito : CHAUPIMARCA      Ir : 2010-01 ▼  
 Latitud : 10° 41' 40"      Longitud : 76° 15' 15"      Altitud : 4260

Día/mes/año	Temperatura Max (°c)	Temperatura Min (°c)	Temperatura Bulbo Seco (°c)			Temperatura Bulbo Humedo (°c)			Precipitacion (mm)		Direccion del Viento 13h	Velocidad del Viento 13h (m/s)
			07	13	19	07	13	19	07	19		
01-Ene-2010	12	1	2.6	10	5.4	2	6	4.6	0	0	NE	2
02-Ene-2010	10	.8	2	9	4.4	1.4	5.2	3.6	0	25.7	NE	2
03-Ene-2010	13	2.8	4.6	12	6	4	6.4	5	0	0	NE	2
04-Ene-2010	11.6	3.8	6	6.4	5	5	4.6	4	0	14	NW	2
05-Ene-2010	6.5	3	4.2	5.8	4.6	3.6	4	3.8	2.8	3.3	NE	2
06-Ene-2010	9.5	3	4.2	8.4	4	3.4	5.2	3.2	0	7	NE	4
07-Ene-2010	10	.6	2.6	7	4.2	2	4.6	3.6	0	.7	NE	2
08-Ene-2010	12.5	2	3	12	5	2.4	6.2	4.2	0	3.5	NE	2
09-Ene-2010	11.4	3	4.4	11	4.8	3.6	5.6	4	0	3	C	
10-Ene-2010	8	3.4	4	6	4.8	3.6	4.2	4	10	0	NE	2
11-Ene-2010	9.1	3.6	4.4	8.6	4.6	3.8	5.4	3.8	6.7	2.2	NE	4
12-Ene-2010	9.5	2.4	4	9	5.6	3.2	5.4	4.6	0	0	NW	2
13-Ene-2010	11.5	3	4	11	4.6	3.4	6	3.8	0	3.7	NE	2
14-Ene-2010	9.5	3.6	4.2	7	4.4	3.8	5	3.6	1.8	0	NE	4
15-Ene-2010	9.5	2.8	3.4	9	4.4	3	5.2	3.6	1.5	0	NE	2
16-Ene-2010	10	3.8	4.6	8.2	5	4	5	4.2	1.8	.8	NE	2
17-Ene-2010	10.5	4.2	5	5.8	4.6	4.4	4	3.8	0	0	NE	2
18-Ene-2010	9.5	3.4	4.8	9	5.4	4	5.2	4.6	9.5	0	NE	4
19-Ene-2010	8.6	3.6	4.4	8	5	3.8	5.2	4.2	1.8	0	NE	2
20-Ene-2010	12	.8	3.8	11	6	3	5.6	5	.5	0	NE	4
21-Ene-2010	8.5	3.4	4	8	4.8	3.6	5	4	2	0	NE	2
22-Ene-2010	9	2.6	3.6	7.2	4	3	4.6	3.4	11.7	10	NE	2
23-Ene-2010	11.4	1	4	8.8	5	3.2	5.2	4	5.3	0	SW	4
24-Ene-2010	7.5	3	4.4	7	3.8	3.6	4.6	3	0	0	NE	4
25-Ene-2010	13	-2	.8	9	4	.4	5.2	3.4	22.4	5.7	SW	2
26-Ene-2010	11.5	2.2	4	10	6.4	3.2	6	5.4	0	.4	NE	2
27-Ene-2010	12	3.8	4.6	11.4	6	4	6	5	0	0	NE	2
28-Ene-2010	9.5	2.4	3.2	9	3	2.6	5.4	2.2	0	7	NE	2
29-Ene-2010	11	-1.2	1	5	3.2	.4	3.6	2.6	0	13.2	NE	2
30-Ene-2010	10.2	.6	1.4	10	3.8	1	5.6	3	0	0	NE	4
31-Ene-2010	11.5		2	11	6	1.4	5.6	5	0	0	NE	6

\* Fuente : SENAMHI - Oficina de Estadística  
 \* Información sin Control de Calidad  
 \* El uso de esta Información es bajo su entera Responsabilidad

Estación : YANAHUANCA , Tipo Convencional - Meteorológica

Departamento : PASCO Provincia : DANIEL ALCIDES CARRION Distrito : YANAHUANCA Ir : 2010-01 ▾  
 Latitud : 10° 29' 29" Longitud : 76° 30' 29" Altitud : 3190

Día/mes/año	Temperatura Max (°c)	Temperatura Min (°c)	Temperatura Bulbo Seco (°c)			Temperatura Bulbo Humedo (°c)			Precipitacion (mm)		Direccion del Viento 13h	Velocidad del Viento 13h (m/s)
			07	13	19	07	13	19	07	19		
01-Ene-2010	20.2	7.4	8.4	17.2	12.8	8.2	11.4	10.2	0	0	NE	2
02-Ene-2010	19.9	8	9.2	20.1	13	9	12	11.4	0	0	C	
03-Ene-2010	16	7.2	7.9	15.7	12.9	7.6	11	10.4	5.9	2.8	C	
04-Ene-2010	18	7	9	17.6	12.6	8.7	11	10.4	2.4	0	NE	2
05-Ene-2010	17.2	7.4	8.9	17	13.4	8.5	11	10.2	0	0	NE	2
06-Ene-2010	18.9	8	10	18.4	13	9.6	12.3	11.5	0	0	NE	6
07-Ene-2010	16.4	7	9.9	16	12.8	9.6	12.1	10.4	8.2	0	NE	4
08-Ene-2010	16.9	7.7	8.9	15.9	12.8	8.7	11	10.4	0	7.4	NE	4
09-Ene-2010	20	8.2	9	18.2	12.6	8.7	11	10.4	0	3.8	C	
10-Ene-2010	18.2	8	10	17.9	13.6	9.7	12.4	11.5	5.7	0	NE	6
11-Ene-2010	20.2	7.8	9.6	19.9	14	9.3	12.5	11.7	0	0	NE	4
12-Ene-2010	19.9	7	10	18	12.7	9.6	11	10.3	0	4.8	C	
13-Ene-2010	20.8	6.4	10	20.2	14	9.6	12.6	11.4	0	0	NE	4
14-Ene-2010	18.3	6	8.7	17.4	13.6	8.5	11.6	9.9	0	0	C	
15-Ene-2010	20.5	7.4	8	17.4	13.4	7.7	12	11.6	8.5	0	NE	4
16-Ene-2010	20.9	7.2	9.8	19.7	13.6	9.5	12.4	11	0	0	NE	2
17-Ene-2010	21.2	8.2	10	20.1	13.4	9.8	12.5	11	0	0	NE	4
18-Ene-2010	20.2	6.9	8	19.6	13	7.2	12.6	11.8	3.5	0	C	
19-Ene-2010	19.9	7.2	7.9	19.6	13.4	7.7	12.4	11.4	4.8	4	NE	4
20-Ene-2010	19.2	6.9	8	18.2	14	7.7	11.8	12.5	0	2.2	W	6
21-Ene-2010	17.2	7	7.7	16.9	12.9	7.4	11.4	10.2	0	10.2	C	
22-Ene-2010	16.8	6.4	7	15.6	13.4	6.8	11.5	10.8	0	0	NE	4
23-Ene-2010	17.4	7.2	9.8	17	12.6	9.4	10.9	9.9	0	3.2	NE	4
24-Ene-2010	17.4	7.2	10	17	13.1	9.6	12.4	10.4	0	10	NE	4
25-Ene-2010	20.4	6.4	9.8	18.9	13.4	9.6	12.4	11.2	11	0	NE	4
26-Ene-2010	20.2	6.9	9	19.6	13.4	8.6	12.5	11.4	0	0	C	
27-Ene-2010	20.7	7.5	8.7	19.9	13.5	8.4	12.5	11.6	0	0	C	
28-Ene-2010	19	7.3	8.6	19.6	12.9	8.3	11.4	10.2	0	0	NE	2
29-Ene-2010	20.8	7.2	9.9	18.9	13	8.6	12.2	11.4	5	3	NE	2
30-Ene-2010	20.8	7.8	9.6	20.2	13	9.4	12.3	11.4	0	1.8	NE	2
31-Ene-2010	21.2	7.8	10.2	20.9	14	9.9	12.2	11.3	0	0	NE	2

\* Fuente : SENAMHI - Oficina de Estadística

\* Información sin Control de Calidad

\* El uso de esta Información es bajo su entera Responsabilidad

Estación : OXAPAMPA , Tipo Automtica - Meteorológica 1

Departamento : PASCO

Provincia : OXAPAMPA

Distrito : HUANCABAMBA

Ir : 2010-10 ▾

Latitud : 10° 35' 34"

Longitud : 75° 23' 23"

Altitud : 1850

Día/mes/año	Temperatura (°c)			Humedad (%)	Lluvia (mm)	Presion (mb)	Velocidad del Viento (m/s)	Direccion del Viento
	Prom	Max	Min					
02-Oct-2010	-47.89	25.9	-999	2.33	-999	694.5	-130.29	-999
03-Oct-2010	15.33	20.6	11.1	90.04	0	818.2	3.81	187
04-Oct-2010	16.1	24.7	10.5	82.75	0	818.1	3.47	175
05-Oct-2010	16.68	26.3	9.1	78.21	0	818.58	3.12	8
06-Oct-2010	15.95	25.8	9.2	81.88	0	818.33	1.97	181
07-Oct-2010	17.41	27.8	11.3	82.13	0	818.27	2.39	212
08-Oct-2010	18.35	27.1	12	78.08	0	819.36	2.87	186
09-Oct-2010	16.69	22.9	14	90.92	.2	820.57	1.57	193
10-Oct-2010	15.98	22.3	13.4	94.75	0	820.3	1.84	190
11-Oct-2010	15.45	19.8	13.1	94.92	.1	820.54	.91	14
12-Oct-2010	16.27	23.1	11.7	87.67	0	820.17	1.29	38
13-Oct-2010	16.27	25.1	10	81.83	0	818.91	2.07	85
14-Oct-2010	16.52	25.4	11.2	84.79	0	818.22	2.48	355
15-Oct-2010	16.16	26.3	11.1	85.75	0	818.48	2.39	12
16-Oct-2010	16.51	21.9	12.8	90.63	0	819.26	1.87	44
17-Oct-2010	16.68	26.1	13.3	89.96	0	819.51	1.52	71
18-Oct-2010	15.93	21.3	12	93.58	0	818.5	1.51	
19-Oct-2010	16.46	21	14.6	95.67	.1	818.08	1.4	1
20-Oct-2010	17.38	23.4	14.2	90.04	0	817.88	2.3	179
21-Oct-2010	17.08	24.6	13.6	92.88	0	817.04	2.07	25
22-Oct-2010	17.66	24.8	12.9	87.13	0	816.29	2.33	9
23-Oct-2010	18.3	25.5	13.7	84.75	0	815.45	2.08	26
24-Oct-2010	18.27	23.2	16.1	88.63	0	815.46	2.47	205
25-Oct-2010	19.19	25.2	14.2	82.13	0	815.68	3.13	188
26-Oct-2010	17.6	24.1	13.2	83.71	0	818.06	2.37	206
27-Oct-2010	17.8	24.3	13.3	84.83	0	816.46	2.34	28
28-Oct-2010	18.8	26.6	13.2	81.79	0	814.38	3.03	242
29-Oct-2010	17.45	22.7	14	91.08	0	814.31	1.23	331
30-Oct-2010	18.54	26.2	11.9	81.13	0	814.75	2.69	204
31-Oct-2010	17.82	25.2	15.5	92.54	0	816.91	2.4	109

\* Fuente : SENAMHI - Oficina de Estadística

\* Información sin Control de Calidad

\* El uso de esta Información es bajo su entera Responsabilidad

Estación : POZUZO , Tipo Convencional - Meteorológica

Departamento : PASCO

Provincia : OXAPAMPA

Distrito : POZUZO

Ir: 2010-02 ▼

Latitud : 10° 3' 3"

Longitud : 75° 33' 33"

Altitud : 1000

Día/mes/año	Temperatura Max (°c)	Temperatura Min (°c)	Temperatura Bulbo Seco (°c)			Temperatura Bulbo Humedo (°c)			Precipitación (mm)		Dirección del Viento 13h	Velocidad del Viento 13h (m/s)
			07	13	19	07	13	19	07	19		
01-Feb-2010	30.4	17.8	20.4	28	23	20	23.6	21.8	0	0	C	
02-Feb-2010	31	20	21.6	29.8	23.8	21.2	23.8	22.8	3.3	0	C	
03-Feb-2010	29.4	20.8	21.2	27.8	23.4	21	23.4	22.4	10	0	C	
04-Feb-2010	30.4	21.2	21.4	28.4	23.2	21.2	23.4	22.2	16.6	7.2	SE	2
05-Feb-2010	27.6	21	21.6	25.4	22.4	21.2	23.4	21.6	5	3	C	
06-Feb-2010	23.8	21.8	21.8	22	21.8	21.8	21.4	21.4	8.7	19.3	C	
07-Feb-2010	24.4	19.8	20.2	24	21.4	20	21.8	20.8	1.5	0	C	
08-Feb-2010	30.6	18	18.4	30.2	23.8	18.2	23.4	22.4	0	0	SE	6
09-Feb-2010	29.4	18.2	20.8	27	23.6	20.6	24	22.8	0	2.5	C	
10-Feb-2010	26.2	17.8	21.8	24.8	23.2	21.6	22.8	22.6	0	8.5	C	
11-Feb-2010	29.8	21.6	22.2	27.8	23.8	21.8	24.2	22.8	1.5	0	C	
12-Feb-2010	30	20.6	20.8	29.8	23.4	20.6	23.8	22.4	39.3	0	C	
13-Feb-2010	30.2	20.4	20.6	28.8	24.2	20.4	23.8	23.4	0	6	C	
14-Feb-2010	30.4	20.2	20.2	29.2	23.6	20.2	24.6	22.6	0	0	C	
15-Feb-2010	28	21.8	22.4	27.4	23.8	22	24	22.6	.5	1	SE	8
16-Feb-2010	29.6	21.6	21.8	28	23.8	21.8	23.2	22.8	47.3	1	SE	4
17-Feb-2010	26.2	21.4	21.6	25.6	22.4	21.4	22	21.8	6.7	0	SE	4
18-Feb-2010	30.8	21.4	21.8	30.4	23.8	21.4	24.4	23.4	0	0	C	
19-Feb-2010	30	20.8	21.8	28.8	24.4	20.8	23.6	23.8	0	.5	SE	6
20-Feb-2010	30.2	20	22.4	26.8	23.8	22.2	23.6	22.8	.5	0	SE	6
21-Feb-2010	27.8	21	21.8	27	23.6	21.6	23.2	22.8	28.2	1.7	C	
22-Feb-2010	30.2	20.8	21.4	29	22.8	21.2	24.8	22	7.4	5	C	
23-Feb-2010	26.4	21	21.2	26.2	23.8	21	23.6	23.4	16	0	C	
24-Feb-2010	26	21.2	21.8	24.8	23.4	21.6	22.4	22.2	48.6	12.7	C	
25-Feb-2010	28.2	20.2	20.4	27.2	22	20.4	23.2	21.4	9.4	12.6	SE	4
26-Feb-2010	28.6	20	20.4	26.8	24.4	20.2	23.8	23.4	45.7	.5	C	
27-Feb-2010	29.2	20	20.8	29	23.2	20.4	24.4	22.4	36	11	SE	2
28-Feb-2010	25.8	20.6	20.8	24	23.6	20.6	22.4	22.8	9.5	4.5	C	

\* Fuente : SENAMHI - Oficina de Estadística

\* Información sin Control de Calidad

\* El uso de esta Información es bajo su entera Responsabilidad

## PROCEDIMIENTO DE VALIDEZ Y CONFIABILIDAD

### ANEXO 2

#### ASPECTOS DE LA EVALUCIÓN

<b>Excelente</b>	<b>Criterios</b>	<b>Nunca 10 – 20</b>	<b>Regular 21 – 40</b>	<b>Bueno 41 – 60</b>	<b>Muy bueno 61 – 80</b>	<b>Excelente 81 - 100</b>
Claridad	Esta formulado con un lenguaje apropiado				70	
Objetividad	Esta expresado en capacidad observable			67		
Actualidad	Adecuado a la autoevaluación				74	
Organización	Existe una organización lógica				72	
Suficiente	Los ítems son suficientes y necesarios para evaluar los indicadores precisados			66		
Consistencia	Emplea teorías científicas				73	
Coherencia	Existe correlación entre indicadores y variables			69		
Metodología	La estrategia corresponde al propósito descriptivo				72	

**Puntaje total: 70.375**

<b>Lugar y Fecha</b>	<b>DNI</b>	<b>Firma del experto</b>	<b>Teléfono</b>
Cerro de Pasco, octubre de 2019	19810337		954472735

De acuerdo a los puntajes obtenidos en cada uno de los indicadores de evaluación, estos son muy reveladores, obteniéndose un puntaje promedio de validez por el experto de 70.375 puntos. Esto significa que el instrumento es válido, ya que al investigador le ha permitido medir las variables de estudio.