



**SERVICIO NACIONAL DE
METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA**

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN
Y ASUNTOS AMBIENTALES



REPÚBLICA DEL PERÚ



MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
DIRECCIÓN EJECUTIVA DE PROYECTOS

PROYECTO PER/98/G31: ELECTRIFICACIÓN RURAL A BASE DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL PERÚ

ATLAS DE ENERGÍA SOLAR DEL PERÚ

DR. AURELIO LORET DE MOLA BÖHME
Ministro de Defensa

JAIME QUIJANDRÍA SALMÓN
Ministro de Energía y Minas

MAG.FAP WILAR GAMARRA MOLINA
Jefe del SENAMHI

JOSÉ ESLAVA ARNAO
Director Ejecutivo de Proyectos
del Ministerio de Energía y Minas

COR.FAP RAFAEL CAMPOS CRUZADO
Director Técnico del SENAMHI

FERNANDO MARCA CHAMOCHUMBI
Director de Promoción y Transferencia
de la DEP/MEM

LIMA - PERÚ
JUNIO 2003

“El Proyecto PER/98/G31 “Electrificación Rural a Base de Energía Fotovoltaica en el Perú” tiene como objetivo promover la aplicación sostenible de energía fotovoltaica en zonas rurales del país, como una alternativa limpia, libre de la emisión de gases de efecto invernadero. Su ejecución está a cargo de la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas (DEP-MEM) y es co financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

El Atlas de Energía Solar, servirá para diseñar adecuadamente sistemas fotovoltaicos de acuerdo a la ubicación geográfica de la localidad donde deban ser instalados. A este esfuerzo se añaden las actividades para garantizar la calidad de los sistemas fotovoltaicos, mediante la elaboración de especificaciones técnicas rigurosas y la capacitación de laboratorios que certifiquen el cumplimiento de las mismas. Las actividades mencionadas se complementan con la capacitación de usuarios, administradores y técnicos locales así como en el desarrollo de modelos de gestión, que aseguren la operación, mantenimiento y reparación de las instalaciones.

El Atlas de Energía Solar desarrollado con singular éxito por el SENAMHI mediante contrato suscrito con el Proyecto y financiado con fondos GEF, permitirá diseñar sistemas fotovoltaicos para viviendas, locales comunales, postas médicas, o escuelas rurales. Los inversionistas nacionales y extranjeros podrán igualmente usar la información para determinar la rentabilidad de sus proyectos de electrificación en general, calentamiento de agua, deshidratación de alimentos, agricultura, ganadería, diseño bioclimático de edificaciones u otros usos que empleen la irradiación solar como una de sus fuentes de energía.”



**SERVICIO NACIONAL DE
METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA**

DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN
Y ASUNTOS AMBIENTALES



REPÚBLICA DEL PERÚ



MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
DIRECCIÓN EJECUTIVA DE PROYECTOS

PROYECTO PER/98/G31: ELECTRIFICACIÓN RURAL A BASE DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL PERÚ

“ATLAS DE ENERGÍA SOLAR DEL PERÚ”

RESPONSABLES

COORDINADORA DEL PROYECTO SENAMHI - MEM:

MSc. IRENE TREBEJO VARILLAS
Directora General de Investigación y Asuntos Ambientales

ASESOR CIENTÍFICO:

PhD Candidato GUILLERMO A. BAIGORRIA PAZ
Centro Internacional de la Papa

EQUIPO PROFESIONAL RESPONSABLE:

ING. ESEQUIEL B. VILLEGAS PAREDES
ING. JOSÉ F. CARLOS CANALES

EQUIPO PROFESIONAL DE APOYO:

COM. FAP. JOSÉ DE LA FUENTE JARAMILLO
ING. EVER CASTILLO OSORIO
JORGE DE LA CRUZ PEBE
ING. ORLANDO CCORA TUYA
BACH. JANETH PIZARRO RAMOS
BACH. ZARELA MONTOYA CABRERA
BACH. MAGDALENA NORABUENA ESPINOZA
JONATHAN CARDENAS SOTERO

EQUIPO TÉCNICO DE APOYO:

BETSY QUITO HOYOS

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

JUAN G. ULLOA NINAHUAMÁN

LIMA - PERÚ

JUNIO 2003

AGRADECIMIENTOS

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) manifiesta un agradecimiento muy especial:

- A la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas (DEP/MEM), por el financiamiento del Estudio, como parte del Proyecto PER/98/G31.
- Al Ingeniero Emilio Mayorga Navarro, Coordinador del Proyecto PER/98/G31, por su valioso apoyo logístico en las diferentes etapas del estudio.
- Al Centro Internacional de la Papa (CIP) y a la Universidad de Wageningen - Holanda (WU) por facilitar las herramientas desarrolladas en esta área de investigación.
- Al Dr. Humberto Rodríguez Murcia por compartir sus valiosas experiencias en el campo de la irradiación solar con el equipo de trabajo.

A todos los colegas que directa e indirectamente participaron y contribuyeron en la elaboración del presente Estudio.



El Modelo de Interpolación Climática basado en procesos utilizado en el presente “Atlas de Energía Solar del Perú” fue desarrollado en el Departamento de Sistemas de Producción y Manejo de Recursos Naturales del Centro Internacional de la Papa (CIP).

PRESENTACIÓN

El Perú es un país de topografía muy variada, de gran diversidad climática y condiciones excepcionales que le confieren un elevado potencial de energías renovables. Sin embargo, para hacer posible el diseño de políticas y medidas para incentivar el mayor uso de estas energías limpias que promuevan el desarrollo especialmente en zonas rurales, es necesario e indispensable cuantificar esta disponibilidad así como conocer su distribución temporal en el territorio.

En ese sentido, la necesidad de contar con un documento técnico que cumpla con esta exigencia a fin de impulsar el uso masivo de la energía solar como fuente energética es lo que ha motivado al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Dirección ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas (DEP-MEM) a suscribir un Convenio dentro del marco del proyecto PER/98/G31, a fin de que el SENAMHI elabore el “Atlas de energía solar del Perú”, documento que deberá consolidar los datos históricos y también recientes sobre la irradiación solar en nuestro país y a su vez plasme la utilización de sofisticadas y actuales técnicas de evaluación y análisis de este recurso.

En este contexto, el Atlas de Energía Solar del Perú representa el esfuerzo conjunto de un gran grupo de personas, desde el personal de campo que hace la observación cotidiana de los datos por muchos años, hasta el profesional que utiliza la ciencia y tecnología para finalmente poner a disposición de las Instituciones públicas y privadas, la comunidad científica y público en general este valioso documento, el mismo que incluye mapas tanto nacionales como departamentales de la energía solar diaria recibida en superficie a nivel mensual y anual, así como gráficos de la variación mensual de la irradiación solar incidente y de la heliofanía relativa para las estaciones consideradas como base para el estudio.

Esta información permitirá captar la atención de los inversionistas y público en general hacia las fuentes renovables de energía y al desarrollo de las tecnologías necesarias para obtener calor y electricidad para diversas aplicaciones, mediante colectores térmicos y módulos fotovoltaicos, respectivamente. El calor recogido en los colectores se puede destinar a satisfacer numerosas necesidades del hogar; la colectividad y la industria, como calefacción, refrigeración, hornos, etc.; para fines agrícolas podemos obtener secadores, plantas de purificación o desalinización de agua, etc. En tanto que los paneles solares se perfilan como la solución a la electrificación rural, que puede usarse de manera directa o bien ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas. La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales.

Es así que el SENAMHI, con legítimo orgullo, presenta el ATLAS DE ENERGIA SOLAR DEL PERU, con lo que esperamos estar contribuyendo con el desarrollo económico y social del país, así como también con el perfeccionamiento y desarrollo de mejores y nuevas técnicas en este campo.

Mayor General FAP
WILAR GAMARRA MOLINA
Jefe del SENAMHI

“ATLAS DE ENERGÍA SOLAR DEL PERÚ”

INDICE

	Página
1. Introducción -----	11
2. Antecedentes -----	11
3. Irradiación solar -----	11
3.1 Definiciones -----	11
3.2 Instrumental de irradiación solar -----	12
3.2.1 Principios de las mediciones solarimétricas -----	12
3.2.2 Instrumentos solarimétricos -----	12
3.2.3 Estandarización de instrumentos solarimétricos -----	15
3.2.4 Instrumental de temperaturas extremas -----	15
4. Información meteorológica y cartográfica utilizada -----	16
4.1 Red de medición de la irradiación solar -----	16
4.2 Red de estaciones meteorológicas -----	16
4.3 Sistema de información geográfica -----	16
5. Procesamiento y control de calidad de la información -----	16
5.1 Recopilación, digitación y control de calidad de los datos -----	16
5.1.1 Digitación y control de calidad de los datos -----	16
5.1.2 Análisis de consistencia de datos de irradiación solar -----	17
5.2 Modelo digital de elevación (DEM) -----	17
6. Modelos de estimación de la irradiación solar -----	17
6.1 Modelo Ångström-Prescott -----	17
6.2 Modelo Bristow-Campbell -----	17
6.3 Modelo de interpolación -----	18
6.3.1 Insumos del modelo -----	18
6.3.2 Fundamento teórico -----	19
6.3.3 Modelo digital de elevación (DEM) -----	19
6.3.4 Simulación -----	19
7. Distribución espacial y temporal de la energía solar incidente diaria en el Perú -----	20
7.1 Distribución anual -----	20
7.2 Distribución estacional -----	20
REFERENCIAS -----	21

ANEXOS

Página

1. Hora de salida del sol (HS), hora de puesta del sol (HP) y duración astronómica del día (N) para diferentes latitudes -----	25
2. Cuadro de conversión de unidades utilizadas en solarimetría. -----	25
3. Relación de estaciones meteorológicas utilizadas. -----	26
4. Promedios climáticos de temperaturas extremas (máxima y mínima) de las estaciones meteorológicas utilizadas. -----	27
5. Promedios climáticos de heliofanía de las estaciones meteorológicas utilizadas. -----	28
6. Variación mensual de la transmisividad (H/Ho) y heliofanía relativa (n/N) de las estaciones base -----	29
7. Irradiación solar extraterrestre – Hemisferio sur. -----	31

TABLAS

Tabla 1: Ubicación geográfica, récord histórico y tipo de instrumento de medición de irradiación solar en las estaciones base	16
Tabla 2: Valores de las principales variables climáticas de las estaciones base. -----	16
Tabla 3: Valores de los coeficientes del modelo Ångström-Prescott por estación, número de datos utilizado y error promedio	17
Tabla 4: Valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación, número de datos y error promedio. -----	18
Tabla 5: Coordenadas de las zonas de simulación establecidas. -----	19

FIGURAS

Figura 1: Pirheliómetro de compensación Ångström -----	13
Figura 2: Piranómetro Kipp & Zonnen -----	14
Figura 3: Piranómetro de Bellani -----	14
Figura 4: Actinógrafo o piranógrafo bimetalico de Robitzch -----	14
Figura 5: Heliógrafo Campbell-Stokes -----	15
Figura 6: Termómetros de máxima y mínima -----	15
Figura 7: Relaciones entre valores observados y estimados para los coeficientes b_b y c_b del modelo Bristow-Campbell y la relación entre ambos coeficientes -----	18
Figura 8: Zonas de simulación -----	19

MAPAS

Mapas geográficos:

- Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas
- Mapa de altitudes
- Mapa de pendientes
- Mapa de aspecto

Mapas de energía solar

Nivel país

- Mapa de energía solar incidente diaria: promedio anual
- Mapa de desviación estándar de la energía solar
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de enero
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de febrero
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de marzo
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de abril
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de mayo
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de junio
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de julio
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de agosto
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de setiembre
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de octubre
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de noviembre
- Mapa de energía solar incidente diaria: mes de diciembre

Nivel departamental: Meses de febrero, mayo, agosto y noviembre

- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Amazonas
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Ancash
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Apurímac
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Arequipa
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Ayacucho
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Cajamarca
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Cuzco
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Huancavelica
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Huánuco
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Ica
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Junín
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de La Libertad
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Lambayeque
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Lima
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Loreto
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Madre de Dios
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Moquegua
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Pasco
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Piura
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Puno
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de San Martín
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Tacna.
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Tumbes
- Mapas de energía solar incidente diaria. Departamento de Ucayali

1. INTRODUCCIÓN

La irradiación solar es una de las variables más importantes, por ser la fuente de energía utilizada en la gran mayoría de los procesos en nuestro planeta. No obstante la importancia de esta variable, su medición es escasa debido a los altos costos del instrumental de precisión requerido así como de su mantenimiento, por lo que la red de medición en el Perú, como en muchos otros países, es limitada. De otro lado, la gran variabilidad topográfica y climática del territorio peruano obligan a tener que considerar redes más densas y bien distribuidas a nivel nacional para una evaluación más precisa y detallada de este recurso.

En este contexto se hace necesario utilizar herramientas para la generación de datos de irradiación solar en zonas que no disponen de éstos, recurriendo a diferentes métodos que permitan estimar esta variable en función de otras variables o parámetros conocidos o de más fácil medición, como son la heliofanía y temperaturas, las cuales son regularmente medidas en las estaciones meteorológicas más comunes.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), consciente de la necesidad de conocer la distribución y la variación de la irradiación solar en el territorio peruano, ha orientado sus actividades a la evaluación de este recurso, en convenio con la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas. Para ello ha contado con una base de datos de irradiación solar proveniente de estaciones convencionales y automáticas instaladas a nivel nacional, lo cual ha permitido preparar el Atlas de Energía Solar del Perú. El Atlas está comprendido por mapas promedio de energía solar incidente diaria a nivel mensual y anual para el período 1975-1990, los cuales se han obtenido utilizando las técnicas más refinadas de estimación e interpolación fundamentados en procesos físicos, desarrollados con el Centro Internacional de la Papa (CIP).

El presente Atlas de Energía Solar permite conocer las zonas potenciales para el aprovechamiento energético en el Perú, a partir del cual se optimizará el dimensionamiento y diseño de los equipos que utilizan esta fuente de energía. Así también, se posibilitan otras aplicaciones en los diferentes sectores siendo uno de ellos el agrícola, por la creciente utilización de la variable solar en los modelos de simulación de cultivos, por ejemplo.

Esta información constituye un valioso aporte para los sectores productivos público y privado en el Perú con la finalidad de promover la inversión e investigación en el uso de la energía solar como fuente alternativa renovable y no contaminante.

2. ANTECEDENTES

Con la finalidad de elaborar el Atlas de Energía Solar del Perú, la Dirección Ejecutiva de Proyectos del Ministerio de Energía y Minas (DEP/MEM) y el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), suscriben el 08 de marzo del 2000 el Contrato de prestación de servicios N° 012-00-EM/DEP para que el SENAMHI ejecute la Componente 1: Desarrollo de la información y de una base de datos sobre energía renovable, dentro del Proyecto PER/98/G31: Electrificación rural a base de energía fotovoltaica en el Perú.

3. IRRADIACIÓN SOLAR

3.1 Definiciones

Albedo:

Cociente entre el valor de la irradiación reflejada por una superficie y la irradiación incidente sobre ella (OMM, 1992).

Balance de energía:

Ecuación que expresa la relación conservadora entre las distintas formas de energía en un determinado emplazamiento o en un sistema atmosférico en estado estacionario (OMM, 1992).

Balance de radiación:

Distribución de los diferentes componentes de la radiación atmosférica que son absorbidos, reflejados, transmitidos o emitidos por la atmósfera (OMM, 1992).

Coefficiente de extinción:

Medición de la cantidad de energía radiante incidente absorbida por unidad de longitud o por unidad de masa de un medio absorbente (OMM, 1992).

Duración astronómica del día o Fotoperíodo (N):

Es el período de iluminación solar comprendido desde la salida hasta la puesta del sol. (García, 1994). También se le conoce como duración del día solar o duración máxima del día. Ver **anexo 1**.

Heliofanía (n):

Es el tiempo, en horas, durante el cual el sol tiene un brillo solar efectivo en el que la energía solar directa alcanza o excede un valor umbral variable entre 120 y 210 W/m², que depende de su localización geográfica, del equipo, del clima y del tipo de banda utilizada para el registro (WMO, 1992). También se le suele denominar “brillo solar” ó “insolación”.

Irradiancia:

Potencia solar incidente en una superficie por unidad de área (RISOL, 1999). Sus unidades son W/m².

Radiación solar:

Es la energía electromagnética (del sol) emitida, transferida o recibida (RISOL, 1999).

El término radiación se aplica al cuerpo que radia, mientras que el término irradiación al objeto expuesto a la radiación. Estrictamente, la superficie terrestre es irradiada y los mapas y tablas son de irradiación solar, sin embargo, aún hoy en día suele usarse el término radiación para referirse a la irradiación (Rodríguez y Gonzáles, 1992).

Las cantidades de radiación se expresan generalmente en términos de irradiancia o irradiación (exposición radiante). En el **anexo 2** se presenta una tabla de conversión de unidades de irradiación.

Irradiación solar circunglobal:

Es la irradiación solar directa y difusa más la irradiación reflejada del entorno, interceptada por una superficie esférica (Robinson, 1966).

Es aquella que incide sobre un cuerpo libremente expuesto, es decir, está conformada por la radiación incidente procedente del sol (directa y difusa) y por aquella radiación solar que es reflejada por la superficie terrestre y otros cuerpos aledaños, sin modificar su longitud de onda (García, 1984).

Irradiación solar o irradiación solar global (H):

Energía solar incidente en una superficie por unidad de área. Es el resultado de integrar la irradiancia en un período de tiempo (RISOL, 1999). Sus unidades son J/m² o kw h/m².

Es aquella radiación procedente del sol que incide sobre la superficie terrestre (directa y difusa) (García, 1984).

Irradiación solar directa:

Es la radiación que llega a la superficie de la tierra en forma de rayos provenientes del sol sin cambios de dirección (Sánchez *et al.*, 1993).

Irradiación solar difusa:

Radiación que proviene de otras direcciones (distintas a las del disco solar) debido a la reflexión y dispersión que producen en la radiación solar, la atmósfera y las nubes (Hernández *et al.*, 1 991).

Radiación solar procedente de toda la bóveda celeste. Está originada por la dispersión de la radiación en la atmósfera (RISOL, 1 999).

Irradiación solar reflejada:

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

Irradiación solar extraterrestre (H_0):

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

Temperaturas extremas: máxima y mínima

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

Transmisividad atmosférica (τ , H/H_0):

También conocida como coeficiente de transmisión de la atmósfera. Es la medida de la tasa de transferencia de la energía solar que no es absorbida después que el haz atraviesa la unidad de espesor del medio atmosférico (EUROMET, 2 002).

3.2 Instrumental de medición de la irradiación solar

Las mediciones solarimétricas en la superficie terrestre son de la mayor importancia e interés para aplicaciones de energía solar y otros estudios como aquellos relacionados a la variabilidad y cambio climático.

3.2.1 Principios de las mediciones solarimétricas

Los instrumentos, en general, convierten la energía de la radiación incidente en otra forma de energía que puede ser medida más convenientemente (Robinson, 1 966). Dependiendo del principio en el cual están basados, los instrumentos pueden ser clasificados como termales, termoeléctricos, fotoeléctricos, entre otros.

Según Tiba *et al.* (2 000), habitualmente son utilizados instrumentos cuyo sensor es una termopila que mide la diferencia de temperatura entre dos superficies normalmente pintadas de negro y blanco e igualmente iluminadas. Una ventaja principal de la termopila es su respuesta uniforme a las longitudes de onda. Por ejemplo, el piranómetro Eppley modelo 8-48 presenta esa característica en un intervalo de 0,3 a 3 μ m.

Sensores basados en la expansión diferencial de un par bimetálico, provocada por una diferencia de temperatura entre dos superficies de color negro y blanco, son también utilizados en instrumentos solarimétricos (actinógrafo tipo Robitzch-Fuess). La expansión del sensor moviliza una pluma que registra un valor instantáneo de irradiación solar.

Actualmente, para mediciones piranométricas son utilizadas fotocélulas de silicio monocristalino cuyo costo es de 10 a 20 % del costo de los instrumentos que usan termopilas. Su mayor limitación es la no uniformidad de respuesta espectral en una región relativamente limitada de longitudes de onda en la cual la fotocélula es sensible (0,4 a 1,1 μ m con un máximo alrededor de los 0,9 μ m). Cerca del 99 % del espectro solar se extiende entre 0,27 a 4,7 μ m, por tanto el intervalo de sensibilidad de las fotocélulas comprende el 66 % de la radiación.

Las fotocélulas y las termopilas realizan mediciones esencialmente diferentes. La fotocélula cuenta el número de fotones con energía mayor que la diferencia existente entre dos bandas de energía del material con las cuales esos fotones interactúan (banda de energía prohibida del sili-

cio). La energía en exceso de los fotones es simplemente disipada en forma de calor. Una termopila mide potencia por lo tanto, el momento de primer orden de la distribución espectral. Esta diferencia da origen a características espectrales cualitativamente diferentes que complican el análisis de interrelación entre ambos tipos de sensores.

Si el espectro solar tuviese siempre la misma distribución, bastaría la calibración de estos sensores, debido a que no serían afectados por su respuesta espectral. Sin embargo, la distribución espectral se modifica con la masa de aire y cobertura de nubes. Ese cambio es muy importante para la componente directa normal de irradiación y extremadamente grande para la irradiación difusa al punto que la medición puede ser afectada por errores del orden de 40 %.

3.2.2 Instrumentos solarimétricos

Son dos los propósitos fundamentales en el uso de un instrumento: el primero de ellos es la medición de la cantidad de energía asociada con la irradiación solar sobre un plano de orientación determinada. Mientras que el segundo, provee información acerca de la distribución espectral y espacial de esta energía (Robinson, 1 966).

La radiación solar que llega a la superficie comprende el espectro visible con longitudes de onda entre 0,4 y 0,7 μ m, una parte del ultravioleta entre 0,3 y 0,4 μ m, y también el infrarrojo entre 0,7 y 5 μ m. Esta irradiación solar llega al suelo en dos formas, como irradiación solar directa e irradiación solar difusa, y ambos tipos de irradiación constituyen la irradiación solar global (WMO, 1 981).

Los componentes de la irradiación solar que están sujetos a mediciones para fines meteorológicos, y que son de uso más general, son los siguientes (OMM, 1 996):

- 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 restringidas del espectro.

La clasificación de los instrumentos está basada en diferentes criterios. Algunos se ciñen a criterios de estandarización, otros lo asocian a su grado de calidad.

3.2.2.1 Pirheliómetros

Son instrumentos que miden la irradiación directa del sol en una superficie perpendicular al rayo solar (WMO, 1 996). En estos instrumentos, el receptor se encuentra protegido de la irradiación indirecta y está usualmente ubicado en el fondo de un tubo, por ello las diferentes formas del receptor y del tubo derivan en diferentes tipos de pirheliómetros.

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los pirheliómetros pueden clasificarse en “patrones primarios”, “patrones secundarios” y “pirheliómetros de campo”.

Un pirheliómetro patrón primario o pirheliómetro absoluto puede definir la escala de irradiancia total sin recurrir a fuentes o radiadores de referencia. Estos instrumentos son de una gran precisión y suelen ser bastante complicados y demasiado costosos para su uso frecuente, por lo que sólo pueden ser mantenidos y operados por laboratorios especializados. Todos los pirheliómetros absolutos de diseño moderno usan receptores de cavidad y como sensores, medidores diferenciales de flujo calorífico calibrados eléctricamente. Esta combinación provee la más alta precisión para los niveles de radiación encontrados en las mediciones de irradiación solar (hasta 1 kW /m²) (WMO, 1 996).

Un pirheliómetro patrón secundario es un pirheliómetro absoluto que no cumple todas las especificaciones o que no está plenamente caracterizado y puede usarse como Patrón secundario si es calibrado por comparación con el Grupo de Normalización Mundial (World Standard

Group). Pueden a su vez calibrar a otros en unidades absolutas, por ello son de gran fiabilidad por su precisión y recomendables por su portabilidad para los diferentes propósitos. Uno de los más conocidos es el "Pirheliómetro de compensación Ångström" (Figura 1), usado para calibrar tanto pirheliómetros como piranómetros, y que consiste de dos láminas de manganina platinada, oscurecidas con una capa de negro de humo o con pintura negra mate óptica. Detrás de cada lámina se acopla un termopar de cobre-constantán para que la diferencia de temperatura entre las láminas pueda indicarse en un galvanómetro sensible o un micro voltímetro eléctrico (WMO, 1 996).

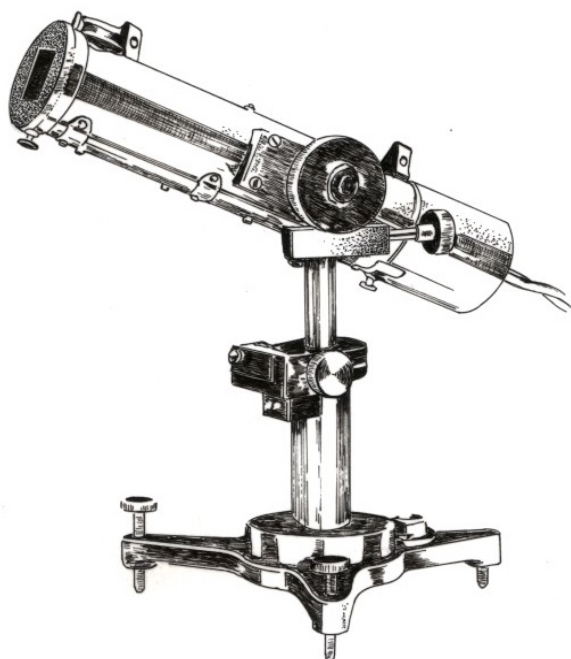


Figura 1. Pirheliómetro de compensación Ångström

Los pirheliómetros de campo son usados para registro continuo de la irradiación solar y con frecuencia se montan sobre un sistema de seguimiento automático. Pueden ser también empleados para la calibración de los instrumentos de una red (OMM, 1 990). Generalmente hacen uso de una termopila como detector y tienen un ángulo óptico que varía desde 2,5° a 5,5° de semiángulo de apertura y entre 1° a 2° de ángulo de inclinación; éstas características de su diseño le permiten seguir el desplazamiento del sol.

El tipo de uso del pirheliómetro puede dictar la selección de un tipo particular de instrumento. Algunos modelos, como el Actinómetro Linke Fuessner, son usados principalmente para mediciones puntuales, mientras que otros como los de tipo Eppley, Kipp & Zonen o EKO son diseñados específicamente para monitoreos de largo plazo de la irradiancia directa (WMO, 1 996).

En el pirheliómetro Eppley el receptor está hecho de un metal cuya superficie está parcialmente ennegrecida y parcialmente blanca, aunque en algunos casos puede ser completamente negra. Las partes blancas y negras están aisladas una de la otra, y las termocuplas dispuestas bajo la superficie receptora tal que las uniones en contacto termal con la parte negra del receptor son las uniones calientes, mientras aquellas en contacto termal con la parte blanca de la superficie receptora son las uniones frías. Como las dos partes (negra y blanca) de la superficie receptora tienen diferentes absorptividades, se establecerá una diferencia de temperatura entre ellas cuando estén expuestas a la irradiación (Robinson, 1 966).

Otros de los pirheliómetros de uso bastante extendido es el Kipp & Zonen. Este instrumento cuenta con una termopila de 40 uniones de manganina-constantán en dos grupos circulares de 20 μ m cada una. Uno de esos grupos se encuentra protegido del sol en la intención de compensar las fluctuaciones térmicas en el interior del instrumento. Debido a que no es compensado en las variaciones de la temperatura ambiente, posee un termómetro incorporado que permite a partir de su lectura aplicar un factor de corrección en la constante de calibración del pirheliómetro, el cual es función de dicha temperatura (Tiba *et al.*, 2 000).

3.2.2.2 Piranómetros

Son instrumentos que miden la irradiación solar global (directa y difusa) en un plano horizontal. El elemento receptor debe estar horizontal y libremente expuesto al hemisferio celeste, pero debe estar protegido de la irradiación que regresa del suelo y los alrededores (Robinson, 1 966).

Al encontrarse expuesto a todo tipo de condiciones ambientales, el piranómetro debe ser robusto en su estructura y resistir la corrosión del aire húmedo, además, su elemento receptor debe encontrarse debidamente aislado (herméticamente cerrado) por un domo de vidrio y ser de fácil desmonte para su desecación, por ello se recomienda la revisión diaria del instrumento (WMO, 1 996).

Los piranómetros normalmente usan sensores termoelectrónicos, fotoeléctricos, piroeléctricos o elementos bimetálicos; sus propiedades en relación a su grado de precisión y confiabilidad son: sensibilidad, estabilidad, tiempo de respuesta, respuesta cosenoidal, respuesta azimutal, linealidad, respuesta de temperatura y respuesta espectral (WMO, 1 996).

3.2.2.2.1 Piranómetro fotovoltaico*

Estos solarímetros poseen como elemento sensor una célula fotovoltaica, generalmente de silicio monocristalino. Las fotocélulas tienen la propiedad de producir corriente eléctrica cuando son iluminadas, siendo esta corriente, en condiciones de corto circuito, proporcional a la intensidad de radiación incidente.

Estos piranómetros han recibido diversas críticas, particularmente en cuanto a su comportamiento espectral, debido a su selectividad. Este fenómeno es inherente al sensor y es, en consecuencia, incorregible. La reflectividad de las células fotovoltaicas es dependiente de la respuesta con la temperatura y poseen soluciones plenamente satisfactorias. De cualquier forma, su bajo costo y facilidad de uso los hace particularmente útiles como instrumentos secundarios. Entre tanto, su utilización es recomendada para integraciones diarias de irradiación solar total sobre un plano horizontal o para observar pequeñas fluctuaciones de irradiación debido a su gran sensibilidad y respuesta casi instantánea, cerca de 10 segundos.

Para valores diarios, el error en las mediciones de un piranómetro fotovoltaico está en el orden de 3 %. Ciertos procedimientos, entre tanto, pueden mejorar algo más los resultados a fin de lograr diferencias menores de 1 % en las mediciones de irradiación diaria, cuando son comparados con piranómetros de precisión.

3.2.2.2.2 Piranómetro termoelectrónico*

El elemento sensible de estos solarímetros es en esencia una pila termoelectrónica constituida por pares termoelectrónicos (termopares) en serie. Tales termopares generan una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre sus uniones, las cuales se encuentran en contacto térmico con placas metálicas que se calientan de forma distinta cuando están iluminadas. Por lo tanto, una diferencia de potencial medida en la salida del instrumento puede ser relacionada con el nivel de irradiación.

Dentro de los piranómetros termoelectrónicos existen esencialmente dos tipos en uso, siendo ellos:

- Piranómetros con un detector pintado de blanco y negro, esto es, el receptor presenta alternativamente superficies blancas y negras dispuestas en coronas circulares concéntricas o con otros formatos, tales como estrellas o cuadrículas. En estos instrumentos, las uniones calientes de termopilas están en contacto con superficies negras, altamente absorbentes, y las frías en contacto con superficies blancas, de gran reflectividad.

* Extraído de Tiba *et al.*, 2000

- Piranómetros con superficie receptora totalmente ennegrecida en contacto térmico con las uniones calientes y las frías, asociadas a un bloque de metal de gran conductividad térmica, colocadas en el interior de un instrumento, resguardadas de la irradiación solar y teniendo aproximadamente la temperatura del aire.

Los piranómetros más difundidos dentro del tipo Blanco y Negro son: Eppley 8-48 (Estados Unidos); Cimel CE-180 (Francia); Star o SHENK y el M-80M (Rusia). De éstos, el Eppley 8-48 y el CE-180 poseen compensación por temperatura.

Dentro de los piranómetros con superficie receptora totalmente negra, los más usados son el Eppley PSP (Estados Unidos) y el Kipp & Zonen** CM-5 y CM-10 (Holanda). Ver Figura 2. Sólo el Eppley PSP es compensado por temperatura, siendo un instrumento de precisión y considerado de primera clase. Todos los demás piranómetros considerados aquí son de segunda clase.

Los piranómetros tienen buena precisión, en un rango de 2 a 5 %, dependiendo del tipo. Tales instrumentos pueden ser 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 asociado.

Los piranómetros en general, poseen buena respuesta espectral, linealidad y uniformidad de respuesta y tiempo de respuesta, mejor que un actinógrafo. Hay una cierta dependencia del factor coseno para grandes ángulos de incidencia, pero este problema es común a los otros citados (actinógrafo y piranómetro fotovoltaico).

La mayor dificultad en el uso del piranómetro termoelectrico es su elevado costo, además de requerir un equipo de adquisición de datos específico.

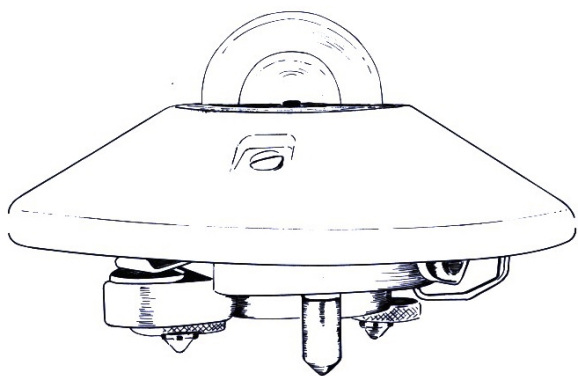


Figura 2. Piranómetro Kipp & Zonen

3.2.2.2.3 Piranómetro de Bellani

El primer instrumento diseñado para la determinación de **irradiación circunglobal** fue inventado por Bellani en 1 836 y fue modificado por Henry en 1 926. Este instrumento opera con el principio de destilación de un líquido como resultado de la absorción de la irradiación incidente (Robinson, 1 966).

Una importante mejora del piranómetro Bellani fue introducida por el Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, Davos-Plaetz, Suiza (Robinson, 1 966). Este piranómetro (modelo suizo) está constituido por dos esferas concéntricas unidas a una bureta vertical graduada hasta 40 cm. La esfera externa es de vidrio y la interna de cobre pintado de color plomo. La bureta está unida con la esfera de cobre mediante un tubo capilar de forma tal que constituyen un reservorio interno para el elemento sensible, que en este caso es alcohol etílico puro. Al incidir la irradiación solar (directa, difusa y reflejada), la esfera de cobre aumenta su temperatura, parte del alcohol se evapora y vuelve a condensarse a lo largo de la bureta que se encuentra a menor temperatura. La cantidad de alcohol acumulada en un tiempo determinado es directamente relacionada con la irradiación total interceptada en onda corta por la esfera de cobre.

Este instrumento no es un piranómetro en el estricto sentido de la definición establecida porque la superficie receptora es esférica y no plana. Ver Figura 3.

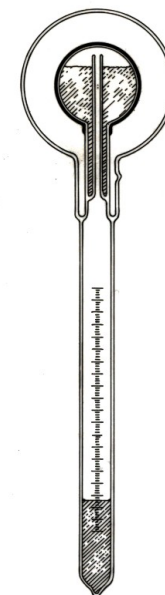


Figura 3. Piranómetro de Bellani

3.2.2.2.4 Medición de la Irradiación solar difusa

Se realiza utilizando el piranómetro sobre un plano horizontal y proveyendo al instrumento de una serie recursos móviles o fijos para evitar que la irradiación directa alcance al receptor. El tipo móvil 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 y no requiere supervisión pero deben introducirse correcciones por la pérdida de irradiación difusa debido a los bordes del anillo, cálculos que no son simples para días claros y son mucho más complicados para días nublados (Robinson, 1 966).

3.2.2.3 Actinógrafo

Conocido también como piranógrafo bimetalico de Robitzch; fue diseñado originalmente por Robitzch en 1 915 y es similar a un termógrafo (Robinson, 1 966). Ver Figura 4. El elemento sensible está constituido por un receptor con tres láminas bimetalicas situadas en un mismo plano horizontal y de las mismas dimensiones (WMO, 1 981). La lámina central (ennegrecida) se expande mucho más que las láminas laterales (blancas) al ser calentadas por la irradiación incidente, siendo proporcional a la energía recibida (Tiba *et al.*, 2 000). Las láminas exteriores están fijadas en un mismo soporte y la lámina central está libre y los movimientos que ella puede efectuar los trasmite por medio de una varilla metálica conectada a un sistema de palancas, capaz de amplificar y graficar en una carta cualquier alteración en longitud del elemento sensible; la banda a su vez, está adosada a un cilindro que gira mediante un mecanismo de relojería. Las bandas pueden ser diarias, semanales y mensuales. El área de la curva de irradiación debe ser cuantificada para evaluar la irradiación total registrada. Este instrumento no es recomendado en lecturas instantáneas ya que tiene un coeficiente de retardo de 10 a 15 minutos para alcanzar una respuesta del orden de 98 % en óptimas condiciones de calibración y operación. Las características del instrumento, incluyendo la cuantificación del área de la curva, llevan a errores de 15 a 20 %. Así mismo, con una calibración mensual, esos errores no son inferiores a los 5 a 10 %, siendo considerado un instrumento de tercera clase (Tiba *et al.*, 2 000; WMO, 1 981). El elemento sensible está protegido de la inclemencia del tiempo por una cúpula de vidrio.

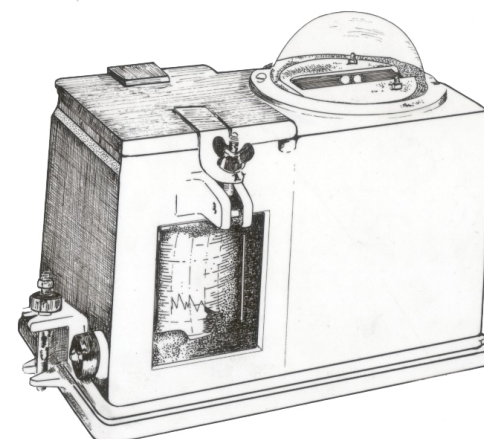


Figura 4. Actinógrafo o piranómetro bimetalico de Robitzch

** Actualmente están disponibles los modelos CM-11 y CM-21

3.2.2.4 Heliógrafo

Este instrumento fue inventado en Inglaterra por Campbell en 1 853 y fue modificado por Stokes en 1 879. Es un instrumento que mide la cantidad de horas de sol (total en horas y décimos) durante el día en un lugar determinado. Ver Figura 5.



Figura 5.
Heliógrafo Campbell-Stokes

Es esencialmente una esfera de vidrio sólido pulido con un eje montado paralelo al de la tierra; es necesario orientar el plano vertical que pasa por el eje, e inclinar un ángulo igual a la latitud del lugar. La esfera actúa como un lente y la imagen focalizada se mueve a lo largo de una banda de papel especialmente preparada que tiene una escala de tiempo (Robinson, 1 966). La quemadura de la banda ocurre cuando la irradiación solar directa supera un límite variable de 120 a 210 W/m² (WMO, 1 992), que depende de la ubicación (turbidez atmosférica, altitud, humedad atmosférica), el clima, el tipo de banda de registro utilizada y los métodos de análisis (WMO, 1 981).

Mediante el uso de correlaciones simples, con coeficientes apropiados, las series históricas de insolación pueden ser utilizadas para estimar irradiación solar diaria, media mensual o anual, con errores mínimos del orden de 10 % (Tiba *et al.*, 2 000).

3.2.3 Estandarización de instrumentos solarimétricos

3.2.3.1 Intercomparación de Pirheliómetros

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1 996), todos los pirheliómetros no absolutos deben ser calibrados por comparación con un pirheliómetro absoluto, usando como fuente el sol. Para esto existe un factor determinado por comparación con el Grupo de Normalización Mundial (World Standard Group). Luego de realizadas las comparaciones, un pirheliómetro puede ser usado como un patrón primario para calibrar, de nuevo por comparación, pirheliómetros patrones secundarios y de campo. A su vez, los pirheliómetros patrones secundarios pueden calibrar a los pirheliómetros de campo. Para la calibración de pirheliómetros patrones primarios y secundarios se suele considerar un período de 5 años, pero para los de campo de 1 a 2 años, variando en función a la frecuencia de uso del instrumento.

3.2.3.2 Calibración de Piranómetros

Consiste en la determinación de su factor de calibración y la dependencia de éste a las condiciones ambientales, tales como: temperatura, nivel de irradiancia, distribución espectral de irradiancia, variación temporal, distribución angular de irradiancia, inclinación del instrumento (WMO, 1 996).

La Organización Meteorológica Mundial refiere que existen varias metodologías para calibrar un piranómetro usando como fuente el sol o los recursos del laboratorio. Estos métodos son:

- 1) Por comparación con un pirheliómetro patrón para la irradiación solar directa y un piranómetro sombreado para la irradiación difusa.

- 2) Por comparación con un pirheliómetro patrón, utilizando el sol como fuente, con un disco de sombreado removible para el piranómetro;
- 3) Por comparación con un piranómetro patrón, utilizando el sol como fuente, o bajo otras condiciones naturales de exposición (por ejemplo, un cielo nublado uniforme);
- 4) En el laboratorio, sobre un banco óptico con una fuente artificial bien con incidencia normal o con cierto azimut y altura especificados, por comparación con un piranómetro similar previamente calibrado al aire libre.
- 5) En el laboratorio, con la ayuda de una cámara de integración que simule la irradiación difusa, por comparación con un tipo similar de piranómetro previamente calibrado al aire libre.

Es necesario especificar bajo qué condiciones ambientales se ha efectuado la prueba de calibración y qué método se ha utilizado.

3.2.4 Instrumental de temperaturas extremas

El instrumental específico 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, así como adaptaciones para fines específicos. Dentro de los diferentes tipos de termómetros encontramos los termómetros de máximas y mínimas que están destinados a registrar las temperaturas máxima y mínima en el día. Ver Figura 6.

3.2.4.1 Termómetro de máxima:

Está construido en forma similar a la de los termómetros corrientes de mercurio y cristal, salvo que existe un estrangulamiento o estrechamiento en la luz del tubo, inmediatamente por encima de la ampolla. Al dilatarse, el mercurio se ve forzado a atravesar ese estrechamiento, pero al contraerse por enfriamiento la delgada columna de mercurio que queda por encima del estrechamiento se separa del mercurio de la ampolla, con lo que queda registrada la temperatura máxima (Fuess, 1 992).

3.2.4.2 Termómetro de mínima:

Está constituido por un tubo lleno de alcohol en el que está sumergido un índice. Al contraerse el alcohol, el índice es arrastrado por adherencia en dirección a la ampolla y queda fijo señalando la temperatura mínima alcanzada (Fuess, 1 992).

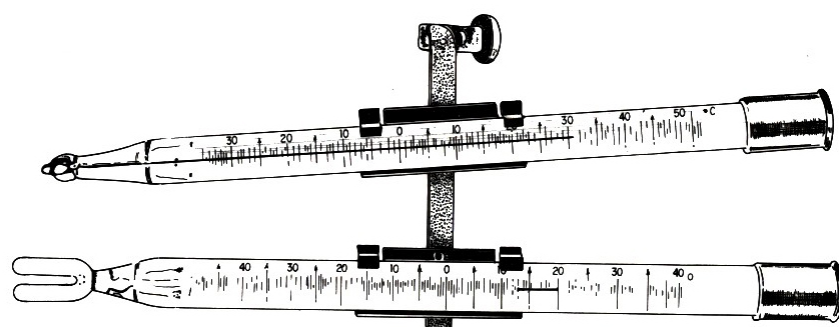


Figura 6. Termómetro de máxima (superior), termómetro de mínima (inferior)

4. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA Y CARTOGRÁFICA UTILIZADA

4.1 Red de medición de la irradiación solar

La red de medición de irradiación solar del SENAMHI está compuesta de estaciones con piranómetros, instrumentos de precisión que registran directamente la irradiación solar; actinógrafos, que son instrumentos registradores 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, las cuales son parte del programa sostenido de mediciones de irradiación solar y cuyos datos han sido utilizados para la validación de los datos históricos existentes, así como para el levantamiento de datos en lugares críticos sin información histórica.

En el presente estudio, para los procesos de calibración de los métodos se utilizó una red de 10 estaciones con registros piranométricos y se utilizaron 5 estaciones con registros actinográficos distribuida en todo el territorio peruano abarcando las tres regiones (costa, sierra y selva).

Los datos de piranómetros y parte de los de actinógrafos se encontraron registrados en planillas y fueron digitados directamente, mientras que otra gran parte de la información se encontraba en bandas actinográficas. Estos registros gráficos de actinógrafos son particularmente exigentes y de tediosa lectura manual, por lo que se elaboró un software específico para su procesamiento y lectura semi-automática.

La ubicación, récord de datos y tipo de instrumento de medición de las estaciones meteorológicas que conforman la red de estaciones de irradiación solar se presenta en la **tabla 1**, mientras que un resumen de las principales variables climatológicas de las mismas se presenta en la **tabla 2**.

Tabla 1. Ubicación geográfica, récord histórico y tipo de instrumento de medición de irradiación solar en las estaciones base.

Estación meteorológica	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (msnm)	Récord histórico	Instrumento de medición
Miraflores	5,17	80,62	30	1 979-1 992	Piranómetro
San Ramón SM	5,56	76,05	184	1 972-1 982	Actinógrafo
El Porvenir	6,35	76,19	230	1 964-1 971	Actinógrafo
Bambamarca	6,40	78,31	2 536	1 967-1 977	Actinógrafo
Bellavista	7,03	76,33	247	1 971-1 973	Actinógrafo
Weberbauer	7,17	78,50	2 536	1 980-1 985	Piranómetro
Huayao	12,03	75,32	3 308	1 977-1 996	Piranómetro
A. Von Humboldt	12,08	76,95	238	1 968-1 999	Piranómetro
Cosmos	12,15	75,57	4 575	1 986-1 988	Piranómetro
Granja Kcayra	13,55	71,87	3 219	1 980-1 988	Piranómetro
San Camilo	14,07	75,72	398	1 978-1 988	Piranómetro
Chuquibambilla	14,78	70,73	3 971	1 980-1 984	Piranómetro
Puno	15,83	70,02	3 820	1 977-1 993	Piranómetro
Characato-La Pampilla	16,45	71,48	2 451	1 978-1 987	Piranómetro
La Joya	16,58	71,92	1 295	1 967-1 993	Actinógrafo

Tabla 2. Valores de las principales variables climáticas de las estaciones base

Estación meteorológica	Energía solar diaria (kW h/m ²)	Heliofania relativa (%)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Precipitación total (mm/año)
COSTA					
Miraflores	5,75	56	30,7	19,3	216
A. Von Humboldt	4,06	40	23,3	15,5	16
San Camilo	5,92	61	28,7	13,4	11
La Joya	7,03	75	27,0	10,1	77
SIERRA					
Bambamarca	4,56	44	19,4	9,5	737
Weberbauer	4,92	49	21,3	7,6	644
Cosmos	4,92	46	9,2	-0,7	1 047
Huayao	6,00	56	19,6	4,4	765
Granja Kcayra	5,44	53	20,7	3,7	674
Chuquibambilla	6,08	59	16,8	-2,4	715
Puno	6,36	70	14,7	2,0	753
Characato	6,50	73	22,8	6,8	78
SELVA					
San Ramón SM	4,67	41	31,3	20,8	2 158
El Porvenir	3,89	41	32,5	20,4	1 041
Bellavista	4,78	40	32,2	20,9	928

La red de estaciones con heliógrafos son de mayor número y cuentan con un buen período de registro de datos que son utilizados para extender información de irradiación solar.

Además, la red de estaciones climatológicas es bastante más densa que las anteriores, y en la gran mayoría cuenta con los datos de temperaturas extremas y precipitación.

4.2 Red de estaciones meteorológicas

Para el presente estudio, se utilizaron un total de 197 estaciones meteorológicas incluidas las 15 estaciones base señaladas en el punto anterior. El período seleccionado para la cuantificación y tabulación de los datos meteorológicos de las estaciones utilizadas y elaboración de los mapas, fue de 1 975 a 1 990. La densidad y distribución espacial de estas estaciones se encuentra en el **mapa 1**. La ubicación y récord histórico de estas estaciones se presenta en el **anexo 3**. Las tablas y gráficos de los resúmenes mensuales de las principales variables meteorológicas utilizadas para el presente trabajo se encuentran en los **anexos 4, 5 y 6**.

4.3 Sistema de información geográfica

Para la elaboración de los mapas de energía solar se utilizaron los sistemas de información geográfica (SIG). La base cartográfica utilizada fueron 500 cartas nacionales provenientes del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a una escala de 1:100 000. La delimitación departamental fue obtenida del mapa Perú digital.

La base de datos cartográfica fue elaborada con curvas de nivel cada 200 metros, red hídrica hasta el sexto orden, fuentes de agua y límites nacionales e internacionales para todo el territorio peruano, el mismo que sirvió para la elaboración del modelo digital de elevación (DEM) que se incorporó en el modelo de interpolación para la obtención de los mapas finales de energía solar para todo el territorio.

5. PROCESAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN

5.1 Recopilación, digitación y control de calidad de los datos

Se identificaron las fuentes de datos y su disponibilidad, seguido de la digitación de toda la información meteorológica requerida, previa evaluación para el caso de las planillas de datos de irradiación solar.

El proceso de control de calidad estuvo dirigido a mantener el más alto nivel en la calidad de los datos de cada estación, y en particular de los de irradiación solar, a los que se les aplicó un procedimiento de análisis de consistencia detallado.

5.1.1 Digitación y control de calidad de los datos

a. Digitación y control de calidad de registros de irradiación solar: Basados en el “Inventario nacional con información de energías renovables” del año 2 000 (SENAMHI, 2 000), se seleccionó las estaciones de la red nacional con datos de irradiación solar y se obtuvo toda la información disponible del Archivo técnico. Luego de revisar cuidadosamente las planillas de energía solar, se remitieron para su digitación guardándose en formato de hoja de cálculo para facilitar su manipulación posterior. El control de calidad se inicia con la verificación de la información desde planillas y culmina con el contraste de la información de irradiación solar global y las variables meteorológicas, justificando físicamente cada uno de los registros (consistencia interna).

b. Digitación y control de calidad de información meteorológica: La información registrada en las planillas climatológicas fue digitada y se encuentra en una base de datos. Asimismo, la Oficina General de Estadística e Informática realizó un proceso de control de calidad que analizó los valores inconsistentes para su corrección o eliminación; en este caso, se utilizó directamente los archivos con la información procesada.

5.1.2 Análisis de consistencia de datos de irradiación solar.

a. Control horario de la información de irradiación solar: El análisis fue gráfico y se utilizó como referencia la irradiación solar horaria en el tope de la atmósfera (desde las 6 horas hasta las 19 horas), la cual se estimó para cada una de las estaciones. En este proceso se requirió de las planillas climatológicas, contrastando el dato de irradiación con las condiciones de tiempo: datos de nubosidad, horas de sol, temperaturas en horas sinópticas, temperaturas extremas, evaporación y precipitación. Las conclusiones del análisis permitieron detectar los datos inconsistentes que se eliminaron de las series.

b. Control de la variabilidad estacional: Se calcularon los totales diarios de irradiación solar y se analizó en la serie de tiempo: estacionalidad, saltos, tendencias, variabilidad. El análisis de la serie de datos de irradiación solar se hizo independientemente al de las series de las demás variables meteorológicas.

c. Análisis de dispersión de datos: Con los totales diarios de irradiación calculados anteriormente y teniendo en cuenta que existe una gran relación entre la energía que llega a la superficie y la cobertura nubosa, se procedió al análisis de los datos mediante gráficos de dispersión respecto a dos variables muy relacionadas con la claridad del cielo: heliofanía y rango térmico, cuya relación es inversamente proporcional a la cobertura nubosa y directamente proporcional a la cantidad de energía que llega a la superficie. Basados en ello, se detectó datos que podían considerarse dudosos verificando su valor en planillas o con las demás condiciones de tiempo para luego determinar su validez.

Al concluir con todo el proceso se encontraron errores de diversas fuentes los que se procedieron a corregir o eliminar.

Respecto a los errores admisibles en los datos de irradiación global medidos se puede considerar que con fines de evaluación de la energía solar se aceptan errores entre 10 y 15%, en tanto que la exactitud requerida en la estimación de los datos de irradiación está en el orden del 20% (Wardle, 1 998).

5.2 Modelo digital de elevación (DEM)

Después de la digitalización de 500 cartas nacionales con las curvas de nivel cada 200 metros, se procedió al empalme de las mismas, todo en formato vectorial. Luego de realizar el análisis de consistencia espacial de los valores vectoriales, se procedió a producir el modelo digital de elevación (DEM) en formato raster con tamaño de píxel de 500 x 500 metros. Posteriormente se produjeron los mapas de pendientes y de aspecto (ángulo azimutal) derivados del DEM a la misma resolución para su uso en el modelo.

6. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA IRRADIACIÓN SOLAR

6.1 Modelo Ångström-PreScott

El modelo de Ångström-PreScott es el modelo más frecuentemente usado para estimar la irradiación solar relativa (H/H_0) basado en las horas de sol relativas (n/N). Esta ecuación fue sugerida por Prescott (1 940) como una modificación del modelo de Ångström propuesto en 1 924. Esta ecuación está dada por:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N} \tag{1}$$

Donde **H** es la irradiación solar medida en superficie, **H₀** es la irradiación solar en el tope de la atmósfera, **n** son las horas de sol efectivas o heliofanía y **N** es la duración astronómica del día para una fecha del año y latitud específicos. Los coeficientes empíricos **a** y **b** tienen un significado físico, donde **a+b** representa el valor máximo de la transmisividad de la atmósfera (τ) mientras que el coeficiente **a** representa el mínimo valor de τ .

Para el presente trabajo se utilizó la información a nivel diario de las estaciones de base con instrumentación piranométrica y actinométrica. Se hicieron los cálculos respectivos de **H₀** y **N** y se procedió a estimar los valores de los coeficientes empíricos para cada una de las estaciones, los cuales se presentan en la **tabla 3**.

Estos valores muestran una alta variación en cuanto a su distribución espacial, incluso dentro de las regiones determinadas por García (1 994). Las relaciones entre la heliofanía relativa (n/N) y los coeficientes empíricos de los valores obtenidos en el presente estudio, no son tan claros como los encontrados por Frère *et al.* (1975). Esto imposibilita el uso de sólo un par de coeficientes empíricos para todo el país como lo sugiere Frere *et al.* (1975), especialmente en aquellas áreas como el Perú que poseen una gran diversidad de ambientes ecológicos. Kadono (1 972), trabajó con 9 estaciones “base” con datos de irradiación solar y heliofanía a nivel de valores medios mensuales, con un periodo de entre 1 y 4 años de datos, obteniendo valores de coeficientes para distintas regiones. El estudio utilizó la clasificación climática de W. Köppen aplicada para el Perú por el Instituto Geográfico Militar (1 970) para determinar las zonas de extrapolación de los coeficientes encontrados. Cabe mencionar que los coeficientes encontrados en el estudio de Kadono (1 972) para las localidades de Puno y Pampa de Majes no son adecuados debido a que los valores presentados no concuerdan con la explicación física del modelo utilizado, sobre todo en el coeficiente “a” con valores cercanos o menores a cero. Martínez-Lozano *et al.* (1 984) hace una recopilación de muchos trabajos publicados al respecto, mencionando además algunas relaciones propuestas entre estos coeficientes y la latitud, altitud, albedo, altitud media del sol, contaminación natural y/o artificial así como del contenido de vapor de agua de la atmósfera. Luego de intentar adecuar algunas de estas ecuaciones a los valores obtenidos en Perú, encontramos que ninguno de ellos se aplicaba para nuestras condiciones (Baigorria *et al.*, 2 003a). Sin embargo, existe una tendencia que muestra el efecto de los controladores climáticos como son la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y los anticiclones del Pacífico sur y del Atlántico sur, así como la presencia de montañas y corrientes marinas sobre la distribución espacial de la irradiación solar. Los efectos son básicamente relacionados a la ausencia o presencia de nubosidad debido a estos controladores, lo que influye grandemente en el coeficiente de transmisividad de la atmósfera.

Tabla 3: Valores de los coeficientes del modelo Ångström-PreScott por estación, número de datos utilizado y error promedio. (Baigorria *et al.*, 2 003a)

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

6.2 Modelo Bristow-Campbell

De acuerdo a Bristow-Campbell (1 984) la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima en un día determinado, depende de la relación de Bowen, esto es, la relación entre el calor sensible y el calor latente. El calor sensible depende de la irradiación solar y es responsable de las temperaturas máximas. Durante la noche, el calor sensible es perdido hacia el espacio como radiación en onda larga, disminuyendo

así la temperatura del aire hasta su valor mínimo, valor que normalmente se alcanza antes del amanecer. 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.

Dentro de los modelos existentes, Baigorria *et al.* (2 003a) llegaron a la conclusión que el modelo Bristow-Campbell era el que mejor se adecuaba a las condiciones de Perú. Este modelo sugiere la estimación de la transmisividad o irradiación solar relativa (H/H_o) en función de la diferencia entre las temperaturas máxima y mínimas (ΔT , °C):

$$\frac{H}{H_o} = a_B [1 - \exp(-b_B \Delta T^{c_B})] \quad (2)$$

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 τ que es característico de cada área de estudio y además depende de la contaminación atmosférica y de la altitud; b_B (°C⁻¹) y c_B determinan el efecto del incremento de ΔT sobre la máxima τ de la atmósfera (Mesa y Varas, 2 000).

La **tabla 4** muestra los valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell encontrados para cada estación así como su error promedio. Es necesario recalcar que el valor del coeficiente a_B 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 4: Valores de los coeficientes del modelo Bristow-Campbell por estación, número de datos y error promedio (Baigorria *et al.*, 2 003a)

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

Debido a que los valores absolutos y las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas son fuertemente influenciadas por la topografía, latitud (ϕ) y altitud, entre otros factores (Baigorria *et al.*, 2 001), 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.*, 2 003a).

$$c_B = 2,116 - 0,072\Delta T + 57,574 \exp(\phi) \quad (3)$$

$$b_B = 0,107 c_B^{-2,6485} \quad (4)$$

En el proceso de validación de estas ecuaciones se hallaron altos valores residuales para la localidad de Puno. Esta estación se encuentra a orillas del lago Titicaca, el mismo que cubre una superficie de 8 300 km². Esto produce un gran efecto de termorregulación en toda el área, evitando que los valores de temperatura mínima sean extremadamente bajos como corresponde en zonas de gran altura. Esto a su vez, provo-

ca la disminución de los valores de ΔT generando valores que no son representativos en la producción de una ecuación de aplicación general. Finalmente, la información procedente de esta estación para determinar las ecuaciones (3) y (4) fue eliminada.

La **Figura 7** muestra los valores comparativos observados versus estimados de ambos coeficientes de Bristow-Campbell así como la relación entre ambos coeficientes.

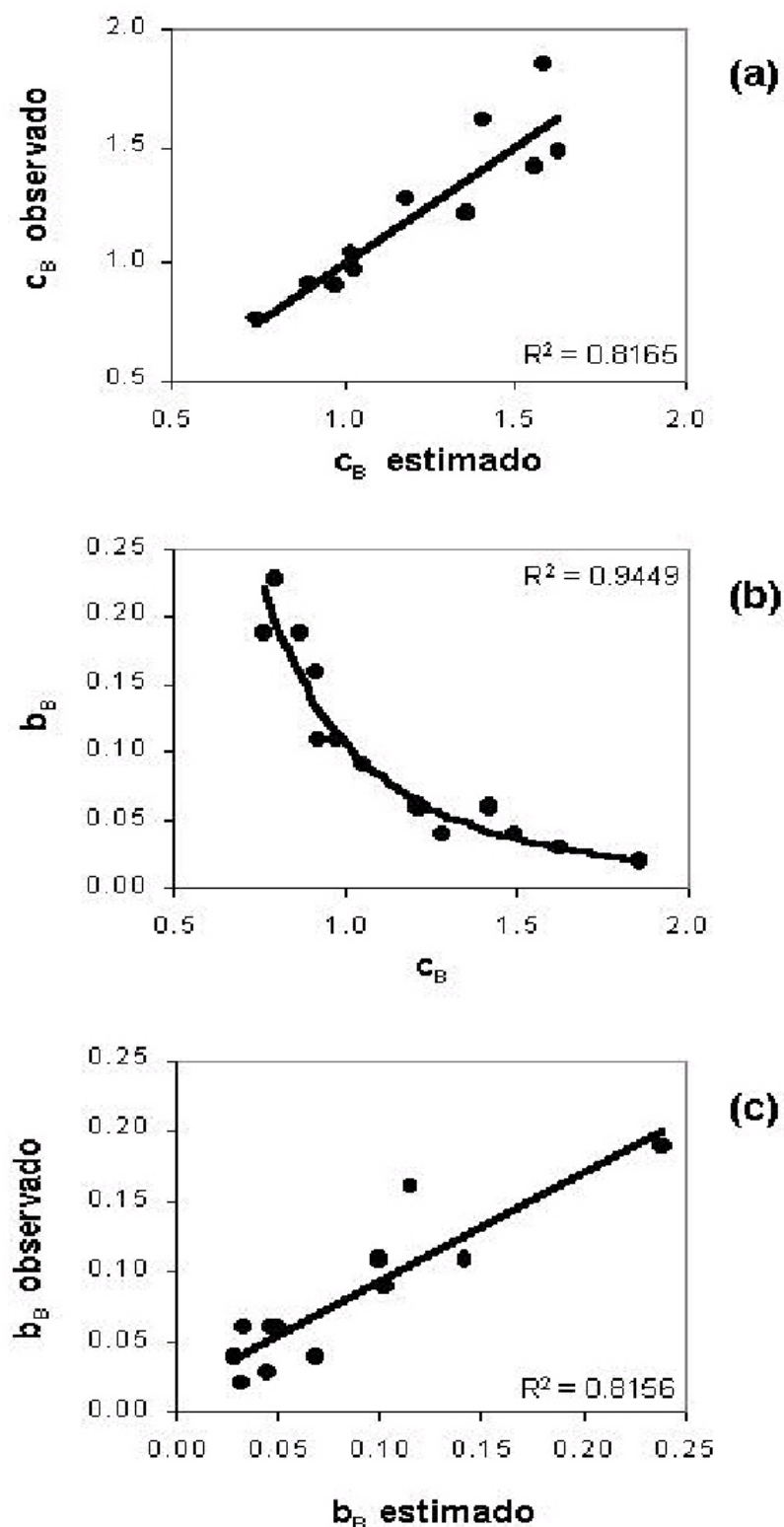


Figura 7: Relaciones entre valores observados y estimados para los coeficientes b_B y c_B del modelo Bristow-Campbell, y la relación entre ambos. (Baigorria *et al.*, 2 003a)

6.3 Modelo de interpolación

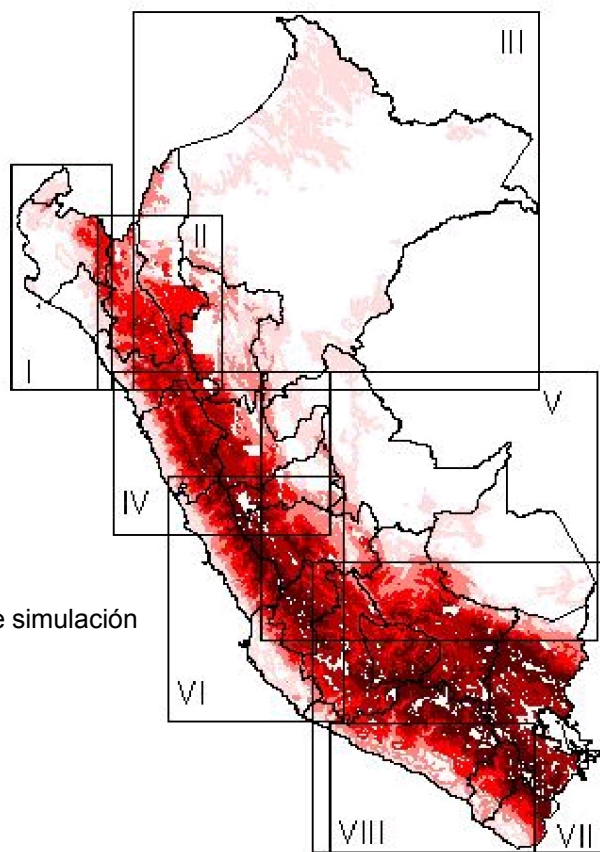
6.3.1 Insumos del modelo

a. Coberturas SIG: El modelo utiliza las coberturas correspondientes al modelo digital de elevación (DEM), el mapa digital de pendientes y el mapa digital de aspecto, todos ellos en formato raster.

Para el presente trabajo, debido al gran tamaño de las coberturas antes mencionadas, y con el propósito de introducir en las simulaciones el mayor número de factores que influyen la variación espacial de la irradiación solar en Perú, se seleccionaron 8 zonas homogéneas de simulación. Entre zonas es importante mencionar la existencia de áreas de traslape las que fueron simuladas bajo las condiciones de cada zona de tal manera que sirvieran como áreas de interfase para el empalme final. Las áreas de cada zona de simulación se encuentran en la **figura 8** y las ubicaciones geográficas en la **tabla 5**.

Tabla 5: Coordenadas de las zonas de simulación establecidas

Zona	Latitud (°)		Longitud (°)	
	máxima	mínima	máxima	mínima
I Costa Norte	-3,35	-9,69	-78,27	-81,44
II Sierra Norte	-4,46	-8,32	-76,80	-79,55
III Selva Norte	0,01	-8,32	-69,89	-78,77
IV Sierra Central	-7,89	-13,82	-74,45	-79,22
V Selva Sur	-7,41	-13,82	-68,55	-76,87
VI Costa Central	-10,18	-16,00	-74,12	-77,98
VII Sierra Sur	-12,05	-18,38	-68,54	-75,99
VIII Costa Sur	-15,00	-18,38	-68,54	-74,48

**Figura 8:** Zonas de simulación

b. Información de estaciones meteorológicas: Después de la adquisición y control de calidad de los datos meteorológicos y utilizando el programa Weatherman (Tsuji *et al.*, 1998), que también verifica errores en los datos, se procedió a la generación de los archivos de datos climáticos, los cuales contienen los valores promedio mensuales multianuales de irradiación solar, horas de sol, temperatura máxima y temperatura mínima. También se procedió a generar los archivos con promedios mensuales de estas mismas variables, pero a nivel anual, es decir, 16 archivos por cada estación meteorológica correspondiente al período de estudio.

6.3.2 Fundamento teórico

El modelo de interpolación está basado en la estimación de la distribución espacial y temporal de las temperaturas máximas y mínimas para que éstas a su vez sirvan de entrada al modelo de Bristow-Campbell previamente explicado (6.2).

El modelo basado en procesos para interpolar temperaturas máximas y mínimas (Baigorria y Bowen, 2000a; Baigorria *et al.*, 2000b; Baigorria *et al.*, 2003b) fue desarrollado para territorios complejos de montaña donde las variaciones microclimáticas son muy grandes y donde los métodos tradicionales de interpolación geoestadística tienen muchos problemas debido a la escasa densidad de información, siendo incapaces de representar las variaciones reales existentes en esta región (Baigorria *et al.*, 2001).

Muchos procesos en la atmósfera dependen del flujo neto de radiación a nivel de la superficie (F_{rad}^{sfc}) resultado del balance de los flujos de irradiación solar (onda corta) y la radiación terrestre (onda larga) (Peixoto y Oort, 1992). Los procesos diarios de calentamiento y enfriamiento dependen de este balance, el cual se hace negativo en las noches y positivo durante el día, lo que hace que F_{rad}^{sfc} sea cero dos veces durante el día, que es cuando las temperaturas extremas ocurren.

Estimaciones del balance de radiación en ondas corta y larga son posibles de hacer en estaciones meteorológicas donde se estiman directa o indirectamente. La irradiación directa y difusa (ambas en onda corta) son medidas por piranómetros, y considerando las características de la superficie (albedo), se puede estimar la irradiación neta en onda corta. Para la estimación de la radiación terrestre en onda larga se utiliza la ecuación de Stefan-Boltzmann, la cual relaciona las temperaturas del cuerpo emisor con la radiación que este produce.

Algunos problemas aparecen al momento de estimar la irradiación atmosférica (onda larga), ya que depende de más de un factor y no se dispone de datos medidos o estimados de esta variable. Este término del balance es entonces estimado por simple diferencia para los momentos en los que las temperaturas extremas ocurren. Teniendo todos los componentes del balance de radiación para cada estación meteorológica, es posible encontrar el coeficiente de transmisividad de la atmósfera (τ). Estos valores de τ son utilizados para generar algoritmos que relacionan estas variables con las variables espaciales. Estos algoritmos son utilizados posteriormente para estimar las temperaturas máximas y mínimas para cada celda dentro de la grilla en un área de estudio determinada. La agregación de todas estas células o píxeles dan como resultado un mapa de estas variables (Baigorria *et al.*, 2003b). Estos mapas a su vez sirven como insumos (inputs) espaciales para la aplicación del modelo Bristow-Campbell, también a nivel espacial, el cual fue previamente calibrado y validado para el Perú (Baigorria *et al.*, 2003a).

6.3.3 Modelo digital de elevación (DEM)

El modelo digital de elevación de todo el territorio es la mejor aproximación realizada en el Perú. Los mapas 2, 3 y 4 muestran el modelo digital de elevación (DEM), mapa de pendientes y de aspecto, respectivamente. Si bien es cierto, éstos sólo constituyen un producto secundario dentro del proyecto, corresponden sin embargo, al mayor esfuerzo realizado en el país en este sentido y constituyen un gran logro no sólo para SENAMHI sino también para todas las instituciones relacionadas con el quehacer nacional y que hacen uso de este tipo de información de tan alta calidad.

6.3.4 Simulación

Se simuló por separado las 8 zonas para cada uno de los años comprendidos entre 1975 y 1990 (16 años de simulación). Para cada zona, se utilizaron los coeficientes a_b del modelo Bristow-Campbell de la estación más representativa de cada zona. Los coeficientes b_b y c_b fueron estimados automáticamente con el modelo utilizando las ecuaciones (3) y (4) que se muestran en la sección 6.2 de Modelos de estimación de irradiación solar.

Utilizando software de SIG se procedió a promediar los 16 años simulados produciendo un mapa digital promedio por cada zona. Luego se empalmaron las 8 zonas digitalmente, produciendo un mapa digital para todo el territorio peruano. Este procedimiento se realizó a nivel mensual, por lo que finalmente se obtuvieron los 12 mapas mensuales para todo el Perú. Para producir el mapa digital promedio anual de energía solar se procedió a calcular la media aritmética de estos mapas mensuales. De igual manera, utilizando los mismos mapas digitales, se generó el mapa digital de desviación estándar.

7. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA ENERGÍA SOLAR INCIDENTE DIARIA 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 2 000 msnm. La Sierra es la región de la Cordillera de los Andes, caracterizada por la presencia de cumbres y montañas con alturas de 6 768 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 2 000 msnm conocido como selva alta (Cáceres *et al.*, 1 984).

7.1 Distribución anual

A nivel anual, la zona de mayor potencial de energía solar del territorio peruano se encuentra principalmente en la costa sur (16° a 18° S), donde se dispone de 6,0 a 6,5 kW h/m². Otras zonas en las que se registra alta disponibilidad de energía solar diaria, entre 5,5 a 6,0 kW h/m² son la costa norte (3 a 8° S) y gran parte de la sierra sobre los 2 500 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 kW h/m² con una zona de mínimos valores en el extremo norte cerca del ecuador (0° a 2° S).

Asimismo, 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.

7.2 Distribución estacional

Al explicar la distribución de la energía solar en el territorio peruano debemos tener en cuenta diversos factores que controlan el clima, tales como: la cordillera de los Andes, que configura la orografía del territorio peruano; el Anticiclón del Pacífico Sur (APS), que produce gran estabilidad atmosférica por la presencia de movimientos verticales descendentes en la tropósfera media; el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), que provee de humedad, y alimenta a los vientos Alisios del sureste; la Corriente Fría Peruana en el Océano Pacífico, que refuerza la estabilidad en la atmósfera; la Corriente Cálida Ecuatorial (“Corriente El Niño”), que inestabiliza la atmósfera en la costa norte en los meses de verano; la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que genera muy activos sistemas nubosos; la Alta de Bolivia que se asocia a sistemas convectivos que suelen afectar mayormente la sierra y selva norte y central del Perú.

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 irradiación al atravesar un menor espesor atmosférico. Esto se debe a la interacción de los principales controladores climáticos tales como el Sistema de Alta presión del Océano Pacífico Sur (APS), el Sistema de Alta presión del Atlántico Sur (AAS); la ZCIT muy activa en este hemisferio en estos meses, la Alta de Bolivia y la Cordillera de los Andes, 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). Este efecto estacional se puede apreciar claramente en el comportamiento de la irradiación solar extraterrestre (**Anexo 7**).

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 que la ZCIT está situada en el hemisferio norte. Esto provoca la ausencia de nubosidad y de lluvias (condiciones de estiaje o estación seca) en la sierra norte y central por lo que la transmisividad de la atmósfera alcanza sus máximos valores, registrándose consecuentemente los valores más altos de energía solar diaria recibida en esta región (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 sierra central muestran altos valores de energía solar, presentándose los máximos a fines de primavera y durante el verano, lo cual se debe a que se encuentra menos influenciada por los controladores climáticos que generan los sistemas nubosos como son la ZCIT y la Alta de Bolivia. La ZCIT tiene mayor dominio e influencia sobre la sierra norte y central del territorio peruano, mientras que la Alta de Bolivia, ejerce mayor influencia sobre la sierra central y sierra sur, originando y manteniendo la convección diurna y la humedad atmosférica en niveles medios en los flancos occidentales de los Andes, pudiendo incluso ser realimentada la convección entre los 5 y 8° S a lo largo de los Andes (sobre los 2 400 msnm) por las brisas de montaña o brisas marinas (Gilford *et al.*, 1 992).

En términos generales, en la región de la costa central y sur ocurren valores altos de heliofanía y por lo tanto altos valores de energía solar en la época del verano austral; sin embargo, es necesario detallar algunas excepciones. En la franja costera cercana al litoral, ubicada por debajo de los 600 m de altura, el comportamiento descrito anteriormente cambia durante fines de otoño, invierno e inicios de primavera en que esta región muestra valores marcadamente bajos de heliofanía y energía solar y constituye una zona de mínimos en el territorio. Estas condiciones se dan en razón de que la transmisividad atmosférica disminuye considerablemente debido a la intensificación durante estos meses de la inversión térmica, que determina una capa nubosa baja (estratiforme) e incluso fuerte presencia de nieblas en esta región. Esto es originado por la mayor influencia del APS que por esta época migra hacia su posición más al norte en el Pacífico sur (30° S y 90° W), esto es, más cerca al litoral peruano, y tiene una mayor intensidad y amplitud; por otro lado, a las menores temperaturas superficiales de la Corriente Fría Peruana y la presencia e intensificación de afloramientos costeros de aguas frías profundas sub superficiales. A fines de primavera, en las terrazas desérticas de Arequipa, Moquegua y Tacna (13,5 a 18° S y 70 a 76° W), por encima de los 1 000 msnm, se alcanzan los mayores valores de energía solar durante el año y de todo el territorio nacional. Esto se debe a que están ubicadas encima de la capa de inversión térmica y presentan cielo despejado durante todo el año.

La costa norte, entre los 3 y 6° S y los 80 a 81° W (departamentos de Tumbes, Piura y norte de Lambayeque) presenta también valores altos de heliofanía y energía solar durante el verano austral, presentándose, sin embargo, los valores máximos en los meses de octubre y noviembre (primavera) y que constituye otra de las zonas en que se alcanzan altos valores de energía solar en términos anuales. Esto se debe a que esta zona al igual que toda la zona costera peruana se encuentra fuera de la zona de migración y principal influencia de la ZCIT, pero dentro del gran dominio del APS, en tanto que la Corriente Fría Peruana sólo domina las costas hasta aproximadamente 6° S. También son importantes aunque excepcionales, las ondas de calor y los pulsos de aguas cálidas del océano Pacífico central-occidental, los cuales inestabilizan la atmósfera, especialmente durante los episodios del fenómeno “El Niño”, provocando mayor cobertura nubosa y en algunas veces tormentas e intensas lluvias.

Un caso a resaltar es el comportamiento de la irradiación solar en nuestro litoral costero. La zona costera baja del Perú, entre 0 a ~900 msnm, se caracteriza porque durante gran parte del año hay considerable nubosidad y formación de nieblas, presentando algunas particularidades climáticas locales. Es particularmente en la costa sur (15° 15' a 18° 20', sur de Ica hasta Tacna) que no se dispone de muchos datos de irradiación solar medidos, de calidad aceptable, por lo que se ha recurrido a datos registrados por estaciones automáticas durante los años 2001 y 2002 en tres transectos altitudinales, observándose que la irradiación solar recibida a lo largo del litoral, en la mayoría de los meses del año, es menor entre el 15% y el 30% que la recibida en partes más altas, mientras que en el verano esta situación se revierte en un 10%.

REFERENCIAS

1. Ångström, A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Q.J.R. Meteorol. Soc. 50: 121-125.
2. Baigorria, G.A., E.B. Villegas, I. Trebejo, J.F. Carlos y R. Quiroz. 2003a. Solar irradiation in complex terrenos and empirical relation to its estimation. A ser enviado a la revista Environmental Modelling and Software – Elsevier en febrero 2003.
3. Baigorria, G.A., W.T. Bowen and J.J. Stoorvogel. 2003b. A process-based interpolation model for maximum and minimum temperatures and solar radiation in mountain areas. A ser enviado a la revista Agricultural and Forest Meteorology - Elsevier en febrero 2003.
4. Baigorria, G.A., W.T. Bowen and J.J. Stoorvogel. 2001. Estimating the spatial variability of weather in mountain environments. *In: Scientist and farmer: partners in research for the 21st century*. CIP Program Report 1999-2000. Pp. 371-378.
5. Baigorria, G.A. and W.T. Bowen. 2000a. A process-based model for spatial interpolation of extreme temperatures and solar radiation. In Proceedings – Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development [CD-ROM computer file]. International Potato Center (CIP). Lima, Peru.
6. Baigorria, G.A., W.T. Bowen, and J.J. Stoorvogel. 2000b. Climate/Weather interpolation: A process-based spatial interpolation model. In Proceedings - Annual meetings of American Society of Agronomy - Crop Science Society of America – Soil Science Society of America. Minneapolis, Minnesota. November 5-9, 2000. Pp. 421.
7. Bristow, K. and Campbell, G. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. Agric. For. Meteorol. 31: 159-166.
8. Cáceres, R., A. Herrera, C. Rivera, C. Cavero, M. Díaz, N. Aguilar y J. Chang. 1984. Desarrollo y aplicación de métodos agrometeorológicos para el pronóstico del estado de los cultivos en el Perú. Informe Final. Missouri. Pp. 108.
9. European Meteorological Education and Training (EUROMET). 2002. Glossary.
10. Frère, M., J. Rijks and J. Rea. 1975. Estudio agroclimatológico de la zona andina (Informe Técnico). Proyecto Interinstitucional FAO / UNESCO / WMO. Roma. Pp. 375
11. Fuess, R. 1992. Termómetros de uso en Meteorología-Climatología-Hidrología, Berlín.
12. García, J. 1984. Radiación incidente obtenida con el piranómetro Bellani y el solarímetro. Cuadernos de Física y Meteorología. Vol. IX, N° 22. Universidad Nacional Agraria. Lima, Perú.
13. García, J. 1994. Principios físicos de la climatología.. Universidad Nacional Agraria La Molina. Ediciones UNALM Pp. 244
14. Gilford, M.T., M.J. Vojtesak, G. Myles, R.C. Bonam and D.L. Martens. 1992. SOUTH AMERICA. South of the Amazon River. A Climatological Study. USA.
15. Goldberg, R.A., G. Tisnado and R.A. Scofield. 1987. Characteristics of extreme rainfall events in northwestern Peru during the 1982-83 El Niño period. Journal of geophysical research. Vol. 92, No. C13, Pages 14,225 – 14,241.
16. Hernández E., A. Tejeda y S. Reyes. 1991. Atlas solar de la Republica Mexicana. México. Pp. 153.
17. Instituto Geográfico Militar. 1971. Atlas del Perú. Lima, Perú.
18. Kadono, c. 1972. Radiación solar en el Perú. Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico-Electricista. Universidad de Ingeniería. Lima, Perú.
19. Martínez-Lozano, J.A., F. Tena, J.E. Onrubia and J. de la Rubia. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: Review and bibliography. Agricultural and Forest Meteorology, 33 (1984) 109 – 128.
20. Meza, F. and Varas, E. 2000. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. Agric. For Meteorol. 100:231-241.
21. NOAA. 2002. Sunrise / Sunset Calculator. Surface Radiation Research Branch. Department of Commerce, USA[On line]. Disponible en <http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/sunrise.html>. Verificado el 15 Diciembre 2002.
22. Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1990. Guía de instrumentos y Métodos de observación meteorológicos. OMM N°08, Suiza.
23. Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1992. Vocabulario meteorológico internacional. OMM N° 182, Suiza. Pp. 784.
24. Organización Meteorológica Mundial (OMM). 1996. Compendio de apuntes sobre instrumentos meteorológicos para la formación del personal meteorológico de las clases III y IV. OMM N°622. Suiza. Pp. 255
25. Peixoto, J.P. and A.G. Oort. 1992. Physics of Climate. American Institute of Physics. New York, US. Pp. 520.
26. Prescott, J.A. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Trans. R. Soc. Sci. Aust., 64:114-125.
27. RISOL. 1999. Terminología, definiciones y simbología. Energías renovables y medio ambiente. Vol. 8. Junio del 2000. Pp. 29-30.
28. Robinson, N. 1966. Solar Radiation. Elsevier Publishing Company. Pp. 346.
29. Rodríguez, H y F. González. 1992. Manual de irradiación solar en Colombia (Irradiación sobre superficies horizontales). Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Pp.148
30. Sánchez, C., F. Rodríguez, E. Collante y O. Simbaqueva. 1993. Atlas de Radiación solar de Colombia. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) e Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT). Primera edición, Colombia. Pp. 85.
31. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología –SENAMHI. 2000. Inventario Nacional con información de energías renovables. Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales. Lima, Perú. Pp. 249. No publicado.
32. Tiba, Ch., N. Fraidenaich, F. Maciel, A. de Barros y H. Grossi. 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil, Banco de Datos Terrestres. Recife: Ed. Universitária da UFPE. Pp.111.
33. Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom, y P.K. Thornton (eds.). 1998. Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. Pp.399.
34. Wardle, D.I. 1988. Solar Radiation for Solar Energy applications. Atmospheric Environment Service from WMO Final Report: Second Joint Session, Working groups on solar radiation of RA III and RA IV, Marzo 21-25, 1988. Pp. 41. Buenos Aires, Argentina.
35. World Meteorological Organization (WMO). 1981. Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source. Technical Note N°172, Suiza.
36. World Meteorological Organization (WMO). 1992. Instrument and Observing Methods, Report N°49, Suiza.
37. World Meteorological Organization (WMO). 1996. Guide to meteorological instrument and methods of observation. Sixth edition. WMO N°08, Suiza.

ANEXOS
Y
MAPAS

Anexo 1: Hora de salida del sol (HS), hora de puesta del sol (HP) y duración astronómica del día (N) , para diferentes latitudes

Lat (S)	0°			2°			4°			6°			8°		
	HS	HP	N	HS	HP	N	HS	HP	N	HS	HP	N	HS	HP	N
Ene	06:06	18:13	12.1	06:03	18:16	12.2	06:00	18:19	12.3	05:56	18:22	12.4	05:53	18:26	12.6
Feb	06:11	18:18	12.1	06:09	18:19	12.2	06:07	18:21	12.2	06:05	18:23	12.3	06:03	18:25	12.4
Mar	06:06	18:12	12.1	06:05	18:12	12.1	06:05	18:13	12.1	06:05	18:13	12.1	06:04	18:13	12.2
Abr	05:57	18:03	12.1	05:58	18:02	12.1	05:59	18:01	12.0	06:01	17:59	12.0	06:02	17:58	11.9
May	05:53	18:00	12.1	05:56	17:57	12.0	05:58	17:54	11.9	06:01	17:52	11.9	06:04	17:49	11.8
Jun	05:57	18:04	12.1	06:00	18:01	12.0	06:04	17:57	11.9	06:07	17:54	11.8	06:11	17:50	11.7
Jul	06:02	18:10	12.1	06:06	18:06	12.0	06:09	18:03	11.9	06:12	18:00	11.8	06:15	17:57	11.7
Ago	06:01	18:08	12.1	06:03	18:06	12.1	06:05	18:04	12.0	06:07	18:02	11.9	06:09	18:00	11.9
Set	05:52	17:58	12.1	05:52	17:58	12.1	05:53	17:58	12.1	05:53	17:57	12.1	05:54	17:57	12.1
Oct	05:42	17:49	12.1	05:41	17:50	12.2	05:40	17:52	12.2	05:39	17:53	12.2	05:38	17:54	12.3
Nov	05:41	17:48	12.1	05:35	17:51	12.3	05:36	17:54	12.3	05:33	17:56	12.4	05:30	17:59	12.5
Dic	05:51	17:59	12.1	05:48	18:02	12.2	05:45	18:06	12.4	05:41	18:09	12.5	05:38	18:13	12.6

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (2002)

Lat (S)	10°			12°			14°			16°			18°		
	HS	HP	N	HS	HP	N	HS	HP	N	HS	HP	N	HS	HP	N
Ene	05:50	18:29	12.7	05:47	18:32	12.8	05:44	18:35	12.9	05:40	18:39	13.0	05:37	18:42	13.1
Feb	06:02	18:27	12.4	06:00	18:28	12.5	05:58	18:30	12.5	05:56	18:32	12.6	05:54	18:34	12.7
Mar	06:04	18:14	12.2	06:04	18:14	12.2	06:03	18:14	12.2	06:03	18:14	12.2	06:03	18:15	12.2
Abr	06:04	17:56	11.9	06:05	17:55	11.8	06:06	17:53	11.8	06:08	17:52	11.7	06:09	17:50	11.7
May	06:07	17:46	11.7	06:09	17:43	11.6	06:12	17:40	11.5	06:15	17:37	11.4	06:18	17:34	11.3
Jun	06:14	17:47	11.6	06:18	17:43	11.4	06:21	17:40	11.3	06:25	17:36	11.2	06:29	17:32	11.1
Jul	06:18	17:54	11.6	06:21	17:51	11.5	06:25	17:47	11.4	06:28	17:44	11.3	06:32	17:40	11.1
Ago	06:11	17:58	11.8	06:13	17:56	11.7	06:15	17:54	11.7	06:17	17:52	11.6	06:20	17:50	11.5
Set	05:54	17:57	12.1	05:54	17:56	12.0	05:55	17:56	12.0	05:55	17:55	12.0	05:56	17:55	12.0
Oct	05:36	17:55	12.3	05:35	17:57	12.4	05:34	17:58	12.4	05:32	17:59	12.5	05:31	18:01	12.5
Nov	05:27	18:02	12.6	05:25	18:05	12.7	05:22	18:08	12.8	05:19	18:10	12.9	05:16	18:14	13.0
Dic	05:34	18:16	12.7	05:30	18:20	12.8	05:27	18:24	13.0	05:23	18:28	13.1	05:19	18:31	13.2

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (2002)

Referencia : Día 15 del mes

Anexo 2: Cuadro de conversión de unidades utilizadas en solarimetría

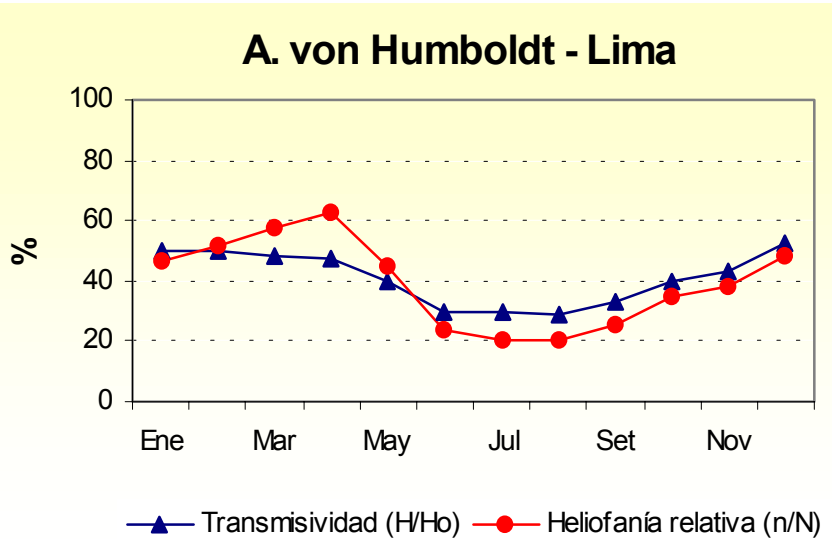
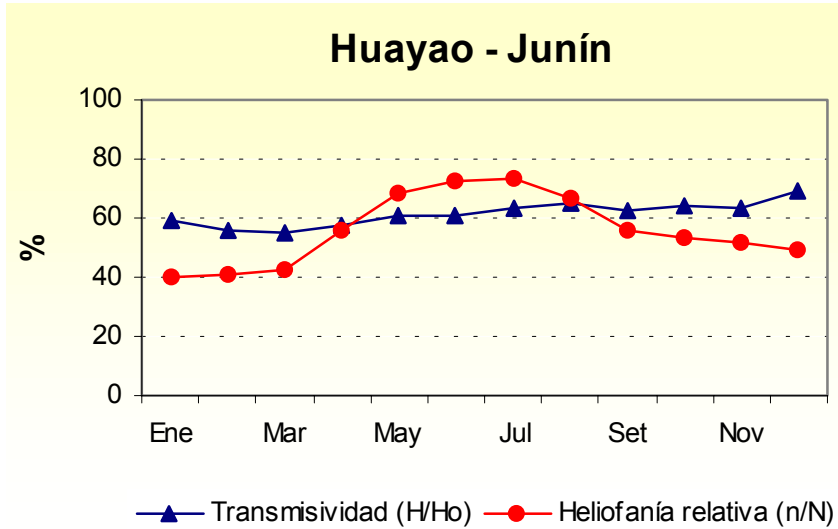
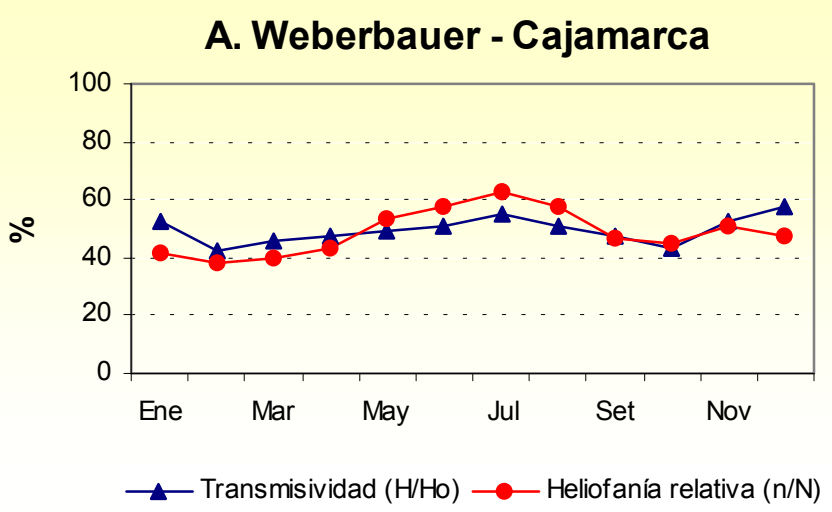
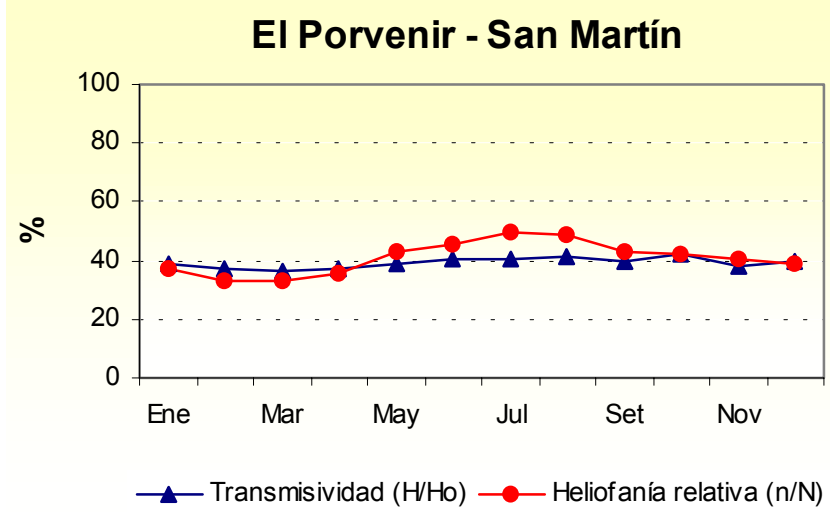
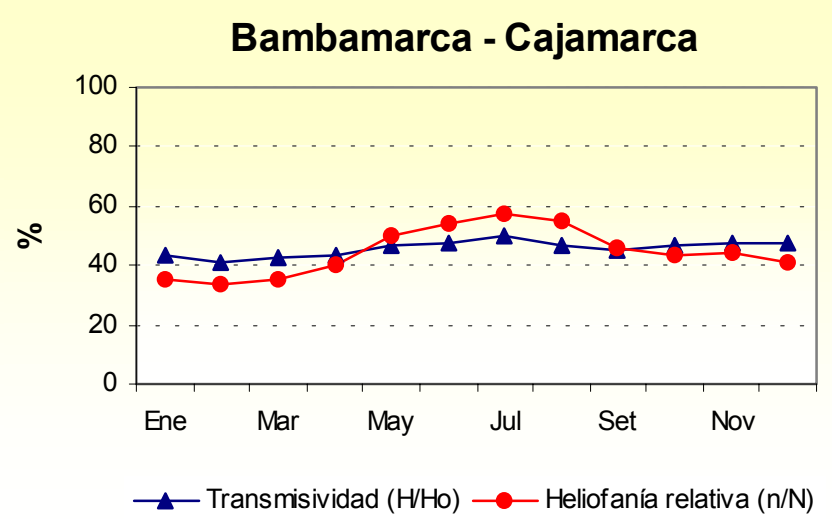
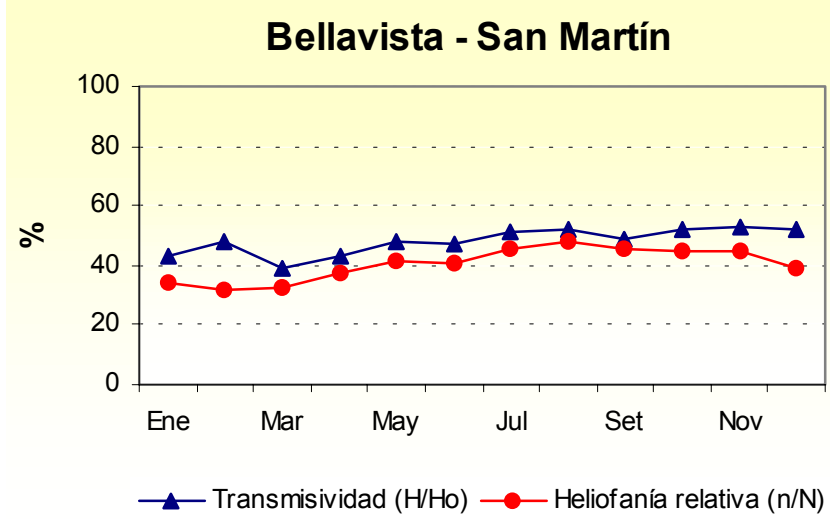
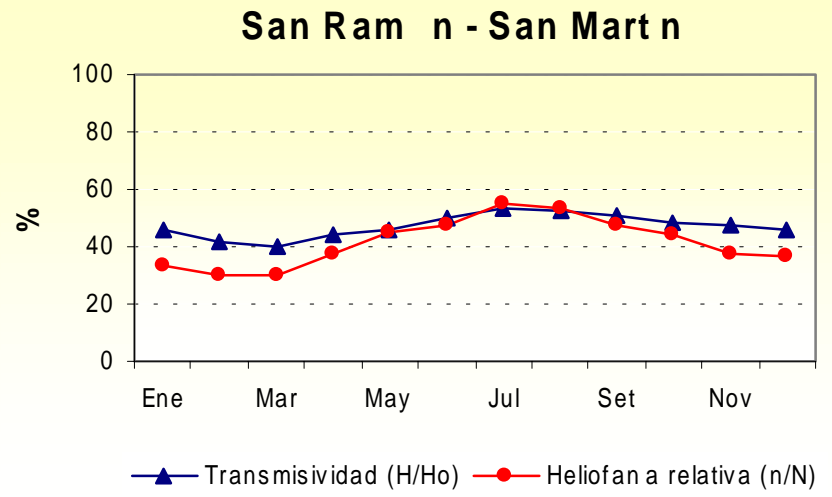
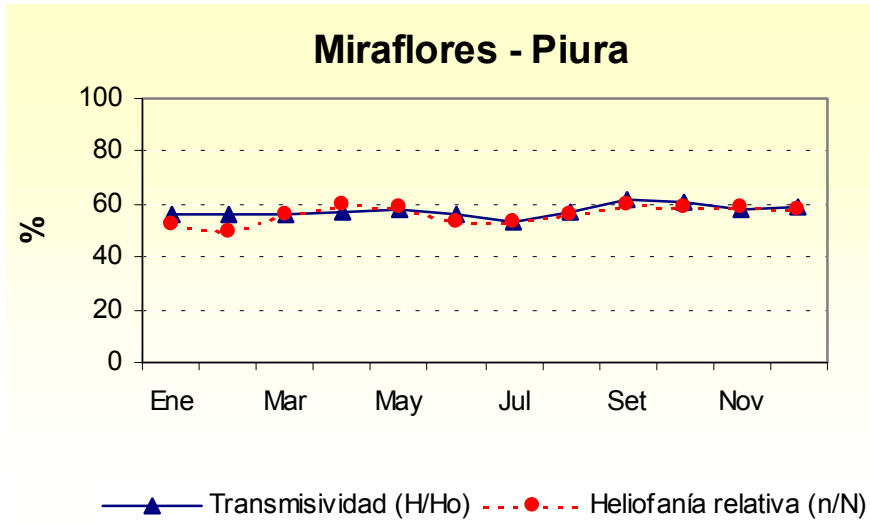
Unidad de Origen	Factor de corrección multiplicar por	Unidad de destino
kW h/m²	85,984194	cal/cm²
	3,6	MJ/m²
MJ/m²	277,777778	W h/m²
J/cm²	2,777778	W h/m²
	0,238845	cal/cm²
kJ/m²	0,0238845	cal/cm²
J/m²	0,000277778	W h/m²
Ly = cal/cm²	11,622447	W h/m²
	0,0418682	MJ/m²

Anexo 5: Promedios climáticos de heliofanía de las estaciones meteorológicas utilizadas

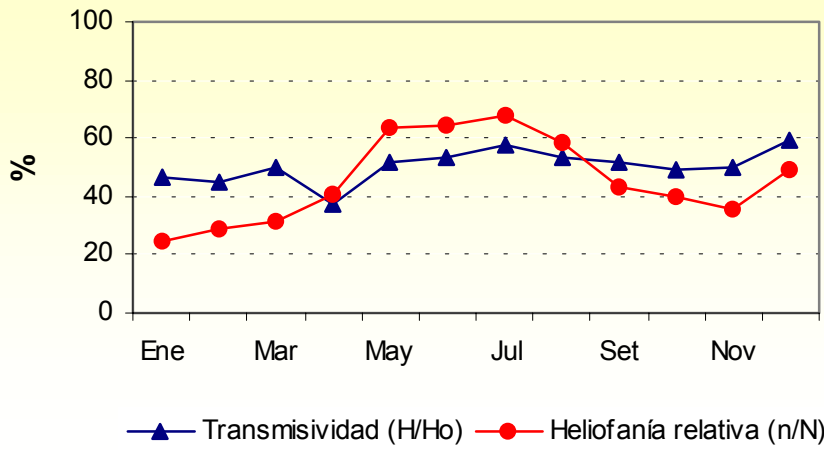
N°	CODIGO	ESTACION	HELIOFANIA	
			Promedio	Desv.Estánd.
1	110133	Zarumilla	4,6	3,0
2	110136	Cañaverál	6,2	2,7
3	110176	San Roque	4,4	2,9
4	110228	Arenales	5,9	3,6
5	110230	La Esperanza	7,4	2,5
6	110232	Chilaco	6,8	2,5
7	110235	Morropón	5,5	3,0
8	110236	Olmos	5,8	3,2
9	110247	San Miguel	6,8	2,7
10	110253	Bagua Chica	5,5	3,0
11	110255	Chulucanas	5,5	2,8
12	110299	Pucalá	6,1	2,9
13	110303	Chota	4,9	3,0
14	110320	Cayaltí	6,6	2,8
15	110331	Ferreñafe	5,4	2,7
16	110333	Jayanca (La Viña)	6,1	3,0
17	110334	Motupe	5,4	3,0
18	110335	Tinajones	6,7	3,1
19	110371	Celendín	5,2	3,1
20	110373	Cajabamba	6,7	2,9
21	110382	Bellavista	5,0	2,8
22	110384	La Unión	5,1	2,8
23	110387	Contamana	5,5	3,2
24	110441	Recuay	6,6	2,8
25	110463	Tocache	4,6	2,8
26	110531	Isla Don Martín	4,2	2,9
27	110532	Camay	4,6	3,3
28	110534	Lomas de Lachay	4,3	2,9
29	110542	Picoy	5,0	2,1
30	110548	Matucana	4,3	3,0
31	110561	San Ramón	5,3	2,8
32	110601	La Punta	4,0	3,3
33	110650	Hacienda Bernales	6,8	3,2
34	110703	Pangaravi	7,1	2,4
35	110829	Santa Rita	9,5	2,1
36	110880	Juli	7,5	3,2
37	110883	Desaguadero	5,9	1,3
38	120101	Los Cedros	5,6	3,1

N°	CODIGO	ESTACION	HELIOFANIA	
			Promedio	Desv.Estánd.
39	120208	Mallares	6,8	2,7
40	120237	Ayabaca	5,8	3,4
41	120239	Huancabamba	3,7	2,8
42	120278	San Ramón	5,2	3,3
43	120281	Genaro Herrera	4,9	2,9
44	120301	Lambayeque	6,9	2,9
45	120325	Talla	6,1	3,0
46	120343	Huambos	6,1	2,9
47	120362	Bambamarca	5,3	3,0
48	120404	Huánuco	5,9	2,9
49	120407	San Jorge	4,5	3,3
50	120451	Palmawasi	4,9	2,8
51	120502	Surasaca	4,8	2,7
52	120535	Andahuasi	7,0	2,5
53	120536	Santa Rosa	6,4	2,8
54	120547	Canta	6,0	3,0
55	120606	Quillabamba	4,9	2,8
56	120607	Granja Kcayra	6,2	3,0
57	120615	Hipólito Unánue	4,1	3,5
58	120616	Cañete	4,2	3,4
59	120635	Huayao	6,5	2,9
60	120638	Pacarán	6,5	2,8
61	120708	Puno	8,3	2,8
62	120764	Chuquibambilla	7,3	2,9
63	120806	Moquegua	8,6	2,5
64	120837	Pampa Blanca	5,6	3,3
65	120839	La Pampilla	8,7	1,5
66	120899	La Yarada	6,0	3,3
67	130207	Miraflores	6,7	2,7
68	130304	A. Weberbauer	6,0	2,9
69	130310	El Porvenir	4,9	3,0
70	130501	Alcantarilla	5,2	3,1
71	130610	A. Von Humboldt	5,0	3,4
72	130617	Modelo	4,3	3,5
73	130637	Pampa de Villacurí	6,4	3,0
74	130700	San Camilo	7,4	2,3
75	130805	Pampa de Majes	9,3	2,3
76	140500	Aerop.Int. J. Chávez	5,6	2,6

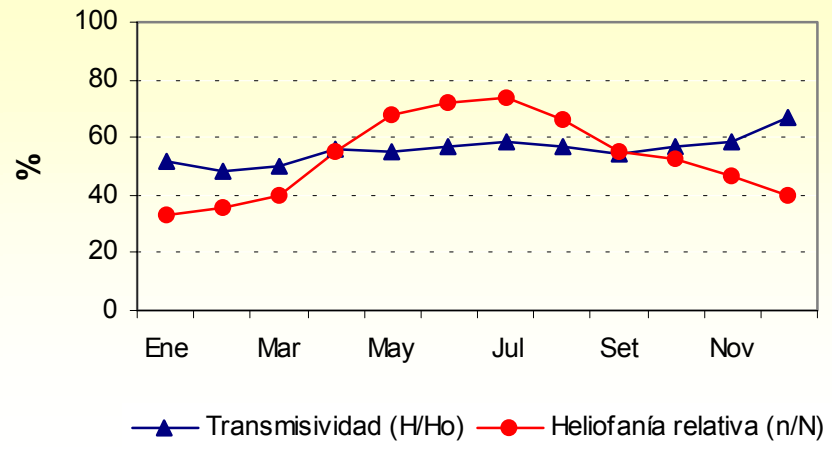
Anexo 6 : Variación mensual de la transmisividad (H/Ho) y heliofanía relativa (n/N) de las estaciones base



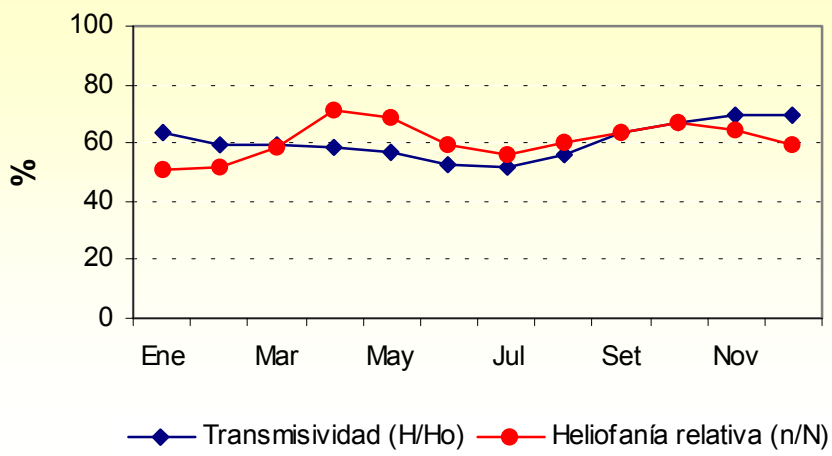
Cosmos - Junín



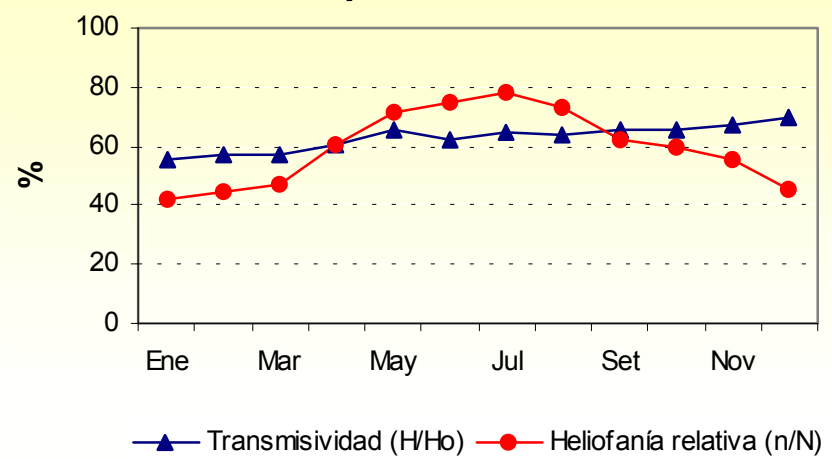
Granja Kcayra - Cusco



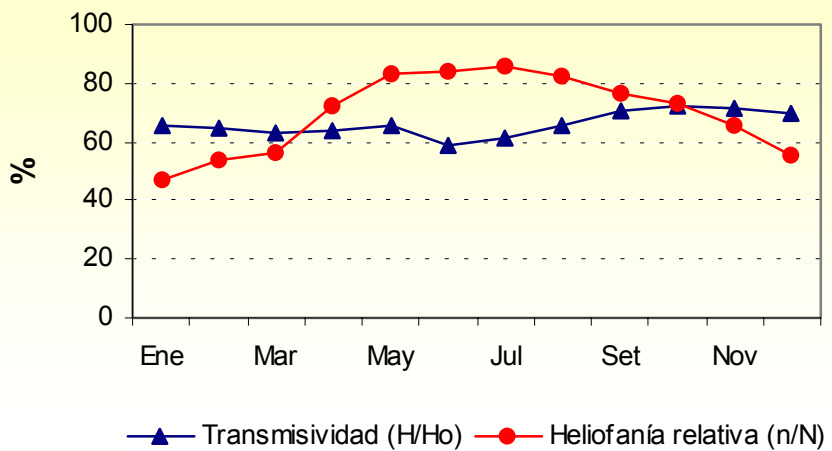
San Camilo - Ica



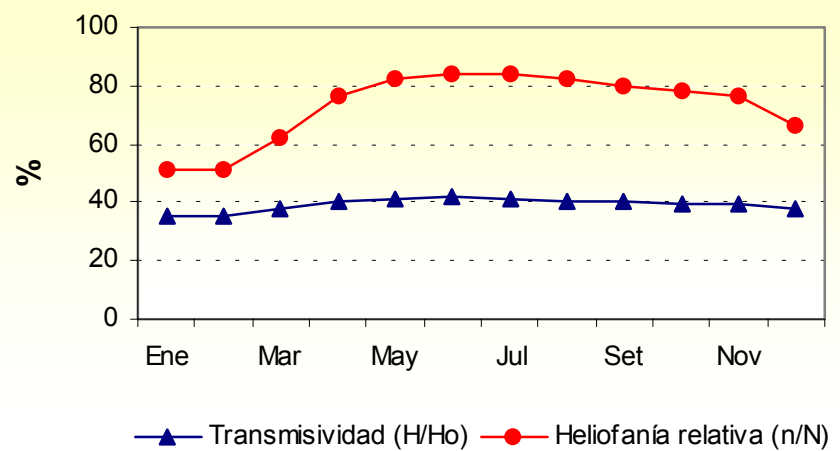
Chuquibambilla - Puno



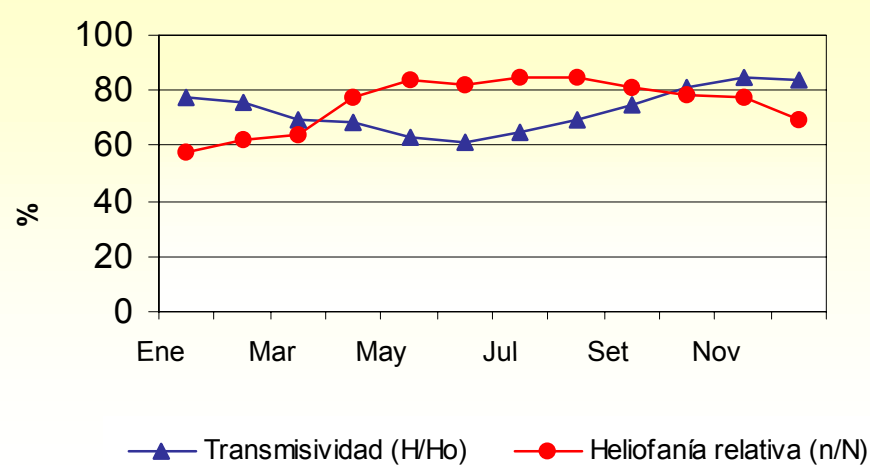
Puno - Puno



Characato/La Pampilla - Arequipa



La Joya - Arequipa



Anexo 7: Irradiación solar extraterrestre - Hemisferio Sur

