

REVISTA ENERGETICA ENERGY MAGAZINE



ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA - LATIN AMERICAN ENERGY ORGANIZATION

LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA ELABORACION
Y APLICACION DE POLITICAS DE USO RACIONAL
DE ENERGIA EN LA INDUSTRIA

GENERAL GUIDELINES FOR THE ELABORATION
AND APPLICATION OF POLICIES FOR RATIONAL
USE OF ENERGY IN INDUSTRY

José Augusto Bicalho Roque

EXPERIENCIAS EN USO RACIONAL DE LA ENERGIA
REPORTADAS POR LOS PAISES MIEMBROS DE OLADE

EXPERIENCIES WITH RATIONAL USE OF ENERGY
REPORTED BY THE OLADE MEMBER STATES

OLADE

ESTIMACION DE ENERGIA SOLAR EN PERU

ESTIMATION OF THE SOLAR ENERGY IN PERU

J. W. Vásquez , P. Lloyd

AÑO 11 No. 1 ABRIL 1987

YEAR 11 No. 1 APRIL 1987

ESTIMACION DE ENERGIA SOLAR EN EL PERU *

J.W. Vásquez ^{1/}, P. Lloyd ^{2/}

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto determinar el potencial solar del Perú por medio de la estimación de la radiación solar sobre su territorio, de acuerdo con la relación entre la duración media diaria del brillo solar, S , la duración mensual y anual media del día, S_0 , los coeficientes de las constantes de Angstrom, a y b , la irradiación solar global en la superficie, H , y en la parte superior de la atmósfera, H_0 . Se han utilizado datos de diversas estaciones meteorológicas para S (la duración real de la heliofanía o brillo solar). Los valores de los coeficientes de Angstrom para estas estaciones fueron comparados con los reportados para países tropicales de condiciones climáticas similares y latitudes que fluctuaban entre cero y treinta y cinco grados Sur.

* Investigación financiada por el Consejo Británico y realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Estudios Energéticos, Universidad de Cardiff.

^{1/} Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

^{2/} Departamento de Ingeniería Mecánica y Estudios Energéticos, Universidad de Cardiff, Cardiff, Gales, Gran Bretaña.

INTRODUCCION

Puede ser de interés dar una idea de la energía de la radiación solar ("radiación solar", para simplificar) como parte del espectro electromagnético completo. Esta es la radiación electromagnética del sol, con longitudes de onda que fluctúan entre $0,20 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), denominada simplemente radiación de onda corta. El espectro correspondiente se divide en regiones de acuerdo con la longitud de las ondas (o frecuencia) de tal radiación. La radiación de onda corta del sol y la radiación de onda larga emitida por la Tierra (con longitudes de onda entre 5 y $100 \mu\text{m}$), conforman la radiación completa, que provoca los fenómenos físicos más importantes, siendo la radiación solar mayor y predominante. La tarea se dedicará enteramente al estudio de la radiación de onda corta, en la cual se pueden distinguir varias regiones principales, a saber:

- i) La región ultravioleta, con longitudes de onda entre $0,001$ y $0,38 \mu\text{m}$ y con subdivisiones como la ultravioleta cercana ($0,30 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$), la ultravioleta lejana ($0,20 < \lambda < 0,30 \mu\text{m}$) y la vacía ($0,001 < \lambda < 0,20 \mu\text{m}$).
- ii) La región visible, con longitudes de onda entre $0,38$ y $0,76 \mu\text{m}$, arrojando los colores:

$0,380 < \lambda$ (violeta)	$< 0,455 \mu\text{m}$
$0,455 < \lambda$ (azul)	$< 0,485$
$0,485 < \lambda$ (celeste)	$< 0,505$
$0,505 < \lambda$ (verde)	$< 0,550$
$0,550 < \lambda$ (verde-amarillo)	$< 0,575$
$0,575 < \lambda$ (amarillo)	$< 0,585$
$0,585 < \lambda$ (anaranjado)	$< 0,620$
$0,620 < \lambda$ (rojo)	$< 0,760$

y los valores típicos de longitudes de onda correspondientes a los colores:

violeta	con	$\lambda = 0,430 \mu\text{m}$
azul		$= 0,470$
celeste		$= 0,495$
verde		$= 0,530$
verde-amarillo		$= 0,560$
amarillo		$= 0,580$
anaranjado		$= 0,600$
rojo		$= 0,640$

- iii) La región infrarrojo, con longitudes de onda entre 0,76 y 1000 μm y con subdivisiones como el infrarrojo cercano ($0,76 < \lambda < 25 \mu\text{m}$) y el infrarrojo lejano ($25 < \lambda < 1000 \mu\text{m}$).

Se ha descubierto que prácticamente toda la energía solar radiante se encuentra en el rango de la radiación de onda corta, con longitudes de onda entre 0,20 y 5 μm con su mayor parte en la región de la ultravioleta cercana visible y en una zona de el infrarrojo cercano (o sea, en el intervalo de longitudes de onda de 0,30 μm a 3 μm).

Ya que la radiación electromagnética es un fenómeno parecido a una onda que transporta energía a través de las distancias, y dado que la luz (o radiación de onda corta), las ondas de radio, las micro-ondas y los rayos X y gamma son todas formas de radiación electromagnética, la única cosa que distingue a cada uno de estos tipos de radiación de los demás es su longitud de onda, o sea, la longitud de una onda completa. La luz ultravioleta en pequeñas cantidades arroja algunos beneficios, como son la generación de vitamina D y bronceados de piel, pero con altas intensidades puede ser muy peligrosa.

La luz infrarroja a veces se conoce como calor radiante, pero realmente no es energía térmica hasta que sea absorbida por una superficie. Los objetos calientes pierden calor al irradiar luz infrarroja. Del sol se irradia principalmente luz visible, pero también cantidades apreciables de luz ultravioleta e infrarroja. El sol es la principal fuente de radiación electromagnética, emitida a una temperatura de unos 5762 °K, que es la temperatura de su fotosfera. Se entiende que en la atmósfera superior de la Tierra y en la distancia media Tierra-sol, tal radiación tiene un valor constante de unos 1353 vatios/metro cuadrado, la llamada "constante G_{sc} ", que es la energía del sol por unidad de tiempo, recibida en una unidad de área de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación.

Sin embargo, además de la energía total del espectro solar (o sea, la constante solar G_{sc}), es conveniente conocer la distribución espectral de la irradiancia extraterrestre G_o que es la radiación que se recibiría en ausencia de la atmósfera. Las fuentes de variación en la irradiancia a incidencias normales son la variación de la radiación emitida por el sol y la variación de la distancia Tierra-sol, siendo ésta la más importante.

La dependencia de la irradiancia extraterrestre de la época del año-- a la incidencia normal G_{On} -- ha sido indicada por la relación aproximada:

$$G_{On} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \quad (1)$$

$$G_{sc} = 1353 \text{ vatios/metro cuadrado}$$

donde G_{On} es la irradiancia extraterrestre (radiación directa o por rayos o haces por unidad de tiempo y unidad de área), medida en el plano normal a la irradiación en el enésimo día del año. Obviamente, G_{On} también se expresa en vatios/metro cuadrado.

Interacción de la radiación solar con los principales componentes de la atmósfera inferior

La atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno, cuyo volumen combinado de concentración es alrededor del 99 por ciento. No obstante, existen otros componentes en cantidades mucho más pequeñas, tales como vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno y otros como aerosoles (polvo), que son de gran importancia en los principales procesos de la interacción con la radiación solar. El agua y el vapor de agua en la atmósfera se asocian con los procesos atmosféricos como la condensación y evaporación, formación de nubes y precipitación, limpieza de la atmósfera con la eliminación de partículas de aerosoles a través de su captura con la caída de gotas de agua, y la eliminación de gases con su disolución. El agua también desempeña un papel muy importante en la transmisión de radiación solar por la atmósfera.

Entre los tipos más importantes de interacción de la radiación solar con los principales componentes de la atmósfera, figuran los procesos de absorción y dispersión, que se producen principalmente en la región más baja de la atmósfera, o sea, la tropósfera, a alturas que fluctúan entre el nivel del mar hasta 10 ó 12 kilómetros. Como consecuencia de tales interacciones, la energía de la radiación solar se atenúa cuando pasa por la atmósfera y llega al suelo. La atenuación de la radiación debido a la absorción y dispersión se caracteriza por coeficientes normalmente denominados coeficiente de absorción de masa, K_a , y coeficiente de dispersión de masa, K_s , respectivamente. Estos coeficientes se relacionan con la longitud de trayectoria, ds , con la

densidad lineal del medio de absorción o dispersión (masa por unidad de longitud por la trayectoria del haz) y con la irradiancia G a través de las relaciones:

$$dG = \begin{cases} -K_a \rho G ds & \text{(absorción)} \\ -K_s \rho G ds & \text{(dispersión)} \end{cases} \quad (2)$$

A veces, en lugar de los coeficientes de atenuación de masa, se utilizan el coeficiente de absorción de volumen $\alpha = \rho K_a$ y el coeficiente de dispersión de volumen $K = \rho K_s$.

El espectro de absorción de la atmósfera se extiende en una amplia gama, desde la región de los rayos X hasta la de las ondas ultracortas de radio. Esto hace que el carácter físico de la absorción sea altamente variado y obviamente complica la estructura del espectro. El problema es el de determinar la absorción en diferentes intervalos del espectro y también en amplias regiones del mismo, abarcando la radiación de ondas cortas y largas. En todos los casos, el principal factor es la cantidad de radiación absorbida. En varios casos, la temperatura y la presión del medio absorbedor se vuelven muy importantes.

Los principales componentes absorbedores de la atmósfera son O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 , N_2 , NO , N_2O , CO , CH_4 .

La absorción de la radiación en el infrarrojo cercano se relaciona físicamente con las transiciones moleculares vibracionales y rotativas, mientras que la absorción de la radiación en el infrarrojo lejano se relaciona con las transiciones puramente rotativas.

La absorción en la atmósfera se debe en gran parte al ozono (en la ultravioleta) y al vapor de agua (en el infrarrojo). Existe una absorción casi completa de la radiación ultravioleta por parte del ozono en la parte superior media de la atmósfera (o sea, la estratósfera) para longitudes de onda menores a $0,29 \mu m$. La absorción de radiación por el ozono decrece conforme vaya aumentando la longitud de onda. En la región de las longitudes de onda mayores a $0,29 \mu m$ hasta $0,35 \mu m$, no hay absorción. La absorción por vapor de agua ocurre en bandas en la región del infrarrojo del espectro solar, con las bandas de absorción centradas a $1,0$, $1,4$ y $1,8 \mu m$. Más allá de $2,3 \mu m$, la penetración de la atmósfera es muy baja, debido a la absorción de radiación por vapor.

Los procesos de dispersión resultan en la atenuación de la radiación solar directa por moléculas de aire tales como las de oxígeno, nitrógeno, vapor de agua, polvo, etc. La dispersión de la radiación de haces por las moléculas de aire ocurre de acuerdo con la teoría de Rayleigh, que dice que tal proceso se produce cuando las partículas dispersantes son más pequeñas que la longitud de las ondas de la radiación. En este caso, los coeficientes de atenuación son proporcionales a λ^{-4} . La dispersión por vapor de agua depende de la cantidad de agua precipitable y los coeficientes de atenuación son proporcionales a λ^{-2} . Por otro lado, las partículas de polvo son más grandes que las moléculas de aire y los coeficientes de atenuación son proporcionales a $\lambda^{-3/4}$. Obviamente, se puede demostrar que las partículas de polvo tienen los coeficientes de atenuación más grandes en el proceso de dispersión. Bajo condiciones atmosféricas, los principales determinantes de la dispersión son las fluctuaciones de la densidad del aire y de las partículas aerosoles (gotitas de agua y partículas de polvo). Se puede decir que la dispersión atmosférica es una función continua de la longitud de la onda de radiación, mientras que la absorción es por lo general selectiva.

Como hecho importante, se debe señalar que la radiación solar es la fuente fundamental de energía para el ciclo hidrológico e influye en los posibles tipos de agricultura en cada región. Esto se logra a través de la distribución de las lluvias. Por otro lado, la energía proveniente de la radiación solar es un tipo no convencional de energía renovable, disponible al Hombre y susceptible de convertirse en energía calorífica y eléctrica y en otras formas de energía útil en la tecnología, la industria y el hogar.

Este trabajo de investigación es un aporte al desarrollo de la tecnología de energía solar en el Perú. Los autores esperan que este trabajo básico ayude a las autoridades estatales del Ministerio de Energía y Minas, así como a otros expertos, en la toma de decisiones sobre el desarrollo de este tipo de tecnología. Estas decisiones deben tener en cuenta el hecho de que, tarde o temprano, será menester enfrentar los problemas energéticos relacionados con las necesidades de electricidad y calefacción en la mayor parte de las localidades y regiones del territorio peruano.

Algunos conceptos y notaciones

Radiación directa - Es aquella radiación recibida del sol sin haber sido dispersada (o reflejada) por la atmósfera. La radiación por haces es la misma que la radiación directa.

Radiación difusa	- Es aquella radiación recibida del sol después de haber sido cambiada por dispersión, por la atmósfera o por la superficie terrestre.
Radiación reflejada	- Es aquella radiación recibida del sol después de haber sido reflejada por el suelo o por una nube.
Radiación transmitida	- Es aquella radiación transmitida por un medio como la atmósfera.
Radiación global	- Es la radiación hemisférica compuesta por la radiación directa y la difusa.
Radiación total	- Es la radiación integrada por los intervalos de longitud de onda corta y larga.
Irradiancia G (irradianza)	- Es la tasa a la cual la radiación es recibida por una superficie, por unidad de área. Se mide en vatios/m ² .
Irradiación H	- Es la cantidad de radiación recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado período. La radiación solar en el suelo a veces se denomina insolación.
Radiación solar	- Es la energía irradiada por el sol.
Emisión (emitancia)	- Es la energía irradiada por un cuerpo, expresada como una fracción de la energía que sería irradiada por un cuerpo negro a la misma temperatura.
Coefficiente de absorción (absorbitancia)	- Es la fracción de la energía incidente que es absorbida por una superficie.
Coefficiente de reflexión (reflectancia)	- Es la fracción de la energía incidente que es reflejada por una superficie.

- Transmitancia - Es la fracción de la energía incidente que es transmitida a través de un medio.
- Irradiancia extra-terrestre G_0 - Es la tasa a la cual la radiación solar es recibida por unidad de área sobre un plano horizontal en la parte superior de la atmósfera. Es la suma de la irradiancia solar global recibida en el suelo más la irradiación absorbida por la atmósfera más la irradiación reflejada por la atmósfera al espacio.
- Irradiación extra-terrestre H_0 - Es la cantidad de radiación solar recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado período, en la parte superior de la atmósfera.
- Duración del brillo solar S - Es la duración real observada del brillo solar, expresada en horas. En otras palabras, es la duración de esa parte del día en la cual brilla el sol.
- Duración del día S_0 - Es la máxima duración posible del brillo solar, expresada en horas.
- Albedo - Es la fracción de la energía incidente reflejada por una superficie.
- Hora solar local LST - Es la hora basada en el aparente movimiento angular del sol a través del cielo, siendo el mediodía solar la hora en que el sol cruza el meridiano del observador. Se expresa en horas y es negativo en la mañana. También se conoce como la hora solar real o la hora local aparente.
- Hora media local LMT - Es la hora definida por el movimiento del sol medio, que es un punto imaginario en el cielo, en la trayectoria del sol y a la velocidad angular media del sol.

Hora media estándar SMT - Es la hora normalmente indicada en los relojes. Corresponde a una determinada región alrededor de un meridiano específico, por ej., para el Perú es la hora peruana a 75° Oeste, expresada también en horas.

Ecuación para la hora E - Es la diferencia de hora entre LST y LMT. Se puede calcular aproximadamente con la expresión:

$$E \text{ (en minutos)} = 9.87 \text{ sen } 2B - 7.53 \text{ cos } B - 1.5 \text{ sen } B \quad (3)$$

$$\text{donde } B \text{ (en grados)} = \frac{360 (n-81)}{365}$$

y $n = \text{día del año} ; 1 \leq n \leq 365.$

Estas fórmulas se tomaron de Duffie y Beckman, pero son originalmente de Whillier (1979).

Ecuación para LST - Es la ecuación dada por la expresión:

$$LST = SMT + \left[4 + (L_{st} - L_{loc}) + E \right] / 60 \quad (4)$$

donde L_{st} = longitud del meridiano estándar para la zona de tiempo = 75 para el Perú

y L_{loc} = longitud del sitio o ubicación.

Angulo de zenit Z - Es la distancia angular entre una determinada línea de vista y la perpendicular a la superficie del observador. En particular, el ángulo zenit solar es el ángulo entre una línea vertical al zenit (o sea, el punto directamente encima) y la línea de vista al sol. También es el ángulo de incidencia entre la radiación directa solar por haces sobre una superficie y la normal a dicha superficie. Se expresa en grados o radianes.

Angulo horario HA - Es el desplazamiento angular del sol, al este u oeste del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra alrededor de su eje, a 15° por hora. Si se expresa en grados, la ecuación es:

$$HA = LST \times 15 \quad (5)$$

Declinación δ - Es la posición angular del sol al mediodía con respecto al plano de la línea equinoccial. Cuando se expresa en grados, tiene un valor máximo de +23.45° el 22 de junio y un valor mínimo de -23.45° el 22 de diciembre. Estos son los solsticios de invierno y verano, respectivamente (en el Hemisferio Sur). Tiene un valor intermedio de cero el 22 de marzo y el 23 de septiembre, o sea, en los equinoccios de otoño y primavera, respectivamente (también en el Hemisferio Sur). Por lo tanto, sus valores fluctúan en el intervalo:

$$-23.45^\circ \leq \delta \leq +23.45^\circ$$

El ángulo de declinación δ se puede encontrar con la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left[\frac{360 (284+n)}{365} \right] \quad (6)$$

donde n es el día del año.

Masa relativa del aire m - Normalmente denominada "número de masa del aire" (a veces llamada, de una manera algo engañosa, simplemente "masa de aire"), es la relación entre la verdadera masa de aire a través de la cual pasan los rayos solares y la masa de aire en dirección vertical. Esencialmente es una medida de la cantidad de atmósfera que la luz del sol tiene que pasar antes de llegar a la superficie terrestre. Bajo la suposición de una densidad de aire uniforme (o, lo que es equivalente, sin

tomar en cuenta la refracción) y de que la atmósfera sea un plano infinito, la masa del aire puede aproximadamente ser calculada con la expresión $m = \sec Z$. Obviamente, la masa relativa de aire es un número adimensional.

Angulo horario de la puesta del sol (o el amanecer) HAS - Es el ángulo horario en que el ángulo de zenit solar es de 90° . Para una superficie horizontal, la expresión en términos de latitud L y declinación δ está dada por:

$$\cos (\text{HAS}) = -\tan L \cdot \tan \delta \quad (7)$$

Relación entre S_0 y HAS - Para una superficie horizontal, esta relación está dada por:

$$S_0 = 2 \text{ HAS} \frac{12}{180} \quad (8)$$

si HAS se expresa en grados.

Relación entre G_0 y el ángulo de zenit Z - Para una superficie horizontal, esta relación está dada por la expresión:

$$G_0 = G_{0n} \cos Z = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \cos Z \right] \quad (9)$$

$$\text{donde } \cos Z = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos (\text{HAS})$$

La irradiancia G_0 es aquella de la parte superior de la atmósfera, en un plano horizontal.

Ecuación para el H_0 diario - En la parte superior de la atmósfera y en un plano horizontal, esta ecuación es la integral de tiempo de G_0 durante el día, desde el amanecer hasta la puesta del sol. Está dada por las expresiones:

$$H_0 = \int G_0 \text{ durante un día}$$

$$= \frac{24 \times 3600}{\pi} C_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \left[\cos L \cos \delta \sin(HAS) + \frac{2\pi HAS}{360} \sin L \sin \delta \right] \quad (10)$$

DATOS Y METODOS

Se sabe que solamente una parte de la radiación solar que ingresa alcanza a la superficie terrestre. El resto es absorbido o dispersado por la atmósfera. La radiación global (o, más precisamente, la irradiación global H) se puede medir con piranómetros. Ya que es limitado el número de estaciones meteorológicas que miden la irradiación, se necesitan otros datos meteorológicos. Muchas estaciones meteorológicas registran sólo la duración del brillo solar S, que es la cantidad más importante para estimar la irradiación solar H.

Para encontrar la distribución de la radiación solar incidente en la Tierra, es preciso tener valores medidos suficientes de las cantidades requeridas. Para el presente trabajo, ha sido posible conseguir mediciones de la duración del brillo solar S de unas 70 localidades en el Perú, del Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Perú, de la Oficina Meteorológica de Bracknell, en Inglaterra, y de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). De dichas estaciones, solamente 64 tuvieron juegos de datos satisfactorios, los cuales fueron utilizados en el presente estudio.

Siguiendo el método de Angstrom (1924), quien fue el primero en sugerir una relación lineal entre la irradiación global H y la duración del brillo solar S, se puede utilizar su fórmula tal como fue re-escrita por Prescott (1940):

$$H = H_0 \left[a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \right] \quad (11)$$

donde:

H: = irradiación global diaria que llega a la superficie.

- H_0 = irradiación extraterrestre global diaria en la parte superior de la atmósfera (a veces conocida como el valor de Angot, por Angot, quien publicó una tabla de valores para H_0).
- S = número medido de horas de brillo solar registrado por un medidor heliofónico.
- S_0 = máximo número de horas de brillo solar posible en un día en el lugar de referencia. También es la duración del día.
- a y b = son parámetros adimensionales, casi constantes en el tiempo, pero variables de lugar a lugar; se determinan comparando la fórmula de Angstrom con los datos medidos.

La relación S/S_0 se denomina la duración relativa del brillo solar.

La primera parte del trabajo fue el de escribir un programa de computación para encontrar cada uno de los valores mensuales de S_0 , H_0 y H , así como los parámetros a y b de la fórmula de Angstrom, para cada una de las 64 estaciones con datos disponibles.

Es importante mencionar que en los sitios donde la irradiación global ha sido estimada por medio de la fórmula de Angstrom, la precisión de H depende de la precisión con que se calcularon los coeficientes a y b .

Las cantidades S_0 y H_0 se pueden encontrar con las fórmulas que contienen el ángulo horario del amanecer o de la puesta del sol, así como la integral de la irradiancia extraterrestre G_0 . La cantidad G_0 a su vez depende de la constante solar G_{sc} , el día del año n y el ángulo zenit solar Z .

Para estimar los coeficientes a y b de Angstrom, se han considerado varios métodos, tales como los de Black et.al. (1953), Pennan (1956), Frere et. al. (1975) y Fritz y McDonald (1949). Sin embargo, estos se basaban principalmente en datos de estaciones o sitios de una latitud mayor, o condiciones climáticas diferentes, a las del Perú y se ha preferido calcular los coeficientes de Angstrom con un método derivado de los datos de radiación registrados en el Perú y otros países latinoamericanos, tomados de un estudio financiado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Rijks,

1975). Los valores más adecuados para los coeficientes a y b de Angstrom serían aquellos estimados por un método esencialmente igual al de J.Q. Rijks (1975). Las curvas de Rijks fueron reajustadas a los valores medidos de a y b para sitios como los siguientes:

	a	b
Lambayeque	0.27	0.43
Huaraz	0.32	0.40
Lima (La Molina)	0.17	0.66
Moquegua	0.30	0.41

La inspección visual de los diagramas de dispersión sugirió que los ajustes lineales de dos elementos serían apropiados. Se hicieron los ajustes manualmente. Está claro en los gráficos que sí existe una relación entre los coeficientes a y b y la duración relativa media del brillo solar S/S_0 . Los valores para los coeficientes a y b de Angstrom han sido estimados en base a los valores para la duración relativa anual del brillo solar. Para aquellos sitios en que la relación $S/S_0 \geq 0.55$, los valores para los coeficientes se suponen como constantes (o sea, $a = 0.30$, $b = 0.413$) y para aquellos sitios en que $S/S_0 < 0.55$, los valores de a y b se estiman con las siguientes ecuaciones lineales, tal como se indica en la Figura 1.

$$a = \begin{cases} k_a + m_a (S_1/S_0)^{\text{anual}} & \text{para } s_{\text{anual}} \geq S_1 \\ k_a + m_a (S/S_0)^{\text{anual}} & \text{para } s_{\text{anual}} < S_1 \end{cases} \quad (12a)$$

$$b = \begin{cases} k_b + m_b (S/S_0)^{\text{anual}} & \text{para } s_{\text{anual}} < S_1 \\ k_b + m_b (S_1/S_0)^{\text{anual}} & \text{para } s_{\text{anual}} \geq S_1 \end{cases} \quad (12b)$$

en que

$$k_a = -0.05$$

$$k_b = 0.933$$

$$S_1 = 0.55$$

$$m_a = 0.636$$

$$m_b = -1.040$$

Cálculo de la irradiación H

Una vez estimados los valores de S_0 , H_0 , a y b, la siguiente tarea fue la de calcular los valores de H para las 64 localidades, utilizando los datos correspondientes sobre la duración de la heliofanía disponible. Los resultados se emplearon como la base para trazar un mapa isópiro del Perú. (Una isópiro es una línea de contorno de igual radiación.) Este mapa permite obtener los valores estimados de H para otras localidades en el Perú.

Tomando en cuenta condiciones meteorológicas y climatológicas similares (por ej., valores parecidos para la duración relativa del brillo solar, S/S_0), el territorio peruano ha sido dividido en tres principales regiones, que se extienden aproximadamente paralelas a la costa. Son las siguientes:

Región I - La costa y las laderas occidentales de los Andes, con alturas entre la del nivel del mar y 1000 m. Con relación a la radiación y clima, se deben considerar dos subregiones. Primero, la costa, que se considera como una zona muy estrecha de un ancho de aproximadamente 10 km y una altura hasta de 300 m. Un tipo de precipitación tipo llovizna cae en el invierno (junio a octubre). Segundo, las laderas occidentales de los Andes se consideran como una faja muy seca que yace paralela y un poco hacia el interior del litoral, con alturas que fluctúan entre 300 y 1000 m y dentro de aproximadamente 50 km del litoral. Esta es una zona con muy poca lluvia, una región desértica con unos pocos ríos de caudal rápido desde los Andes. La temperatura es baja, para esa latitud, y existen muchas nubes en la costa.

Región II - Las tierras altas de los Andes, con una altura mayor de 1000 m, formando una faja de aproximadamente 250 km, de ancho promedio. La lluvia aumenta hacia el este en su conjunto. Normalmente, se denomina la región montañosa donde el clima es templado o frío (según la altura), con lluvias ligeras en la Cordillera Occidental y bastante más fuertes sobre la Cordillera Oriental. Tormentas de lluvias con truenos, típicas de los trópicos y de las montañas, se producen con frecuencia en esta zona, especialmente sobre la Cordillera Oriental en la temporada húmeda.

Región III - Las laderas orientales de los Andes y las llanuras orientales, con alturas menores a 1000 m, hasta 300 m, y desde 300 hasta casi el nivel del mar en las tierras bajas. Esta región normalmente se denomina la selva y es la parte más húmeda del Perú. Las laderas orientales de los Andes descienden a la región tropical de la cuenca del Amazonas y tienen una época de lluvias y truenos desde octubre hasta abril.

RESULTADOS Y COMENTARIOS

Una vez estimados los 64 valores medios anuales y estacionales de la irradiación diaria, la siguiente, y última, tarea fue la de anotarlos en un mapa del Perú y trazar las líneas de contorno isópiras con iguales valores de la irradiación H. Tal mapa se muestra en la Figura 2. Los valores estimados para la irradiación diaria media anual muestran que las tierras altas de la región andina tiene los valores más grandes de irradiación, aumentando hacia el sur del Perú. Los valores típicos de irradiación para esta región son los siguientes:

Sitios	Irradiación H (en kWh/m ²)
Pampa de Majes	5.610
Paucarani	5.406
Moquegua	5.363
Characato	5.322
Arequipa	5.313
Puno	5.190
Huaraya-Moho	5.161
Huaraz	5.138
Juli	5.048

Sin embargo, en los extremos norte y sur de la región de la costa y las laderas occidentales de la región de los Andes, se encuentran valores moderadamente altos de irradiación solar. Existen dos valores máximos, de 5.446 y 5.159 kWh/m² en el norte y norte-central, en Cayalti y Nepeña, respectivamente. Los valores típicos de irradiación en esta región son:

Sitios	Irradiación H (en kWh/m ²)
Cayalti	5.446
Nepeña	5.159
Andahuasi-Sayan	5.139
Castilla	5.128
Ei Tablazo	5.109
Punta Las Zorras	5.087
Parcona	5.040
Hda. Majoro	5.024

En las laderas orientales de Los Andes y las tierras bajas orientales, los resultados de los valores calculados de H muestran que la mayor parte de los sitios tiene mucho menos radiación solar, con el menor valor de 2.505 kWh/m² para Neshuya, Ucayali, en el Departamento de Loreto. Los valores típicos para la irradiación en esta región son:

Sitios	Irradiación H (en kWh/m ²)
Hda. Valor	4.495
Yurimaguas	4.143
Tingo Maria	4.016
Padre Abad	4.015
Santa Ana	4.006
San Ramón	3.981

Una cosa muy importante que hay que señalar es que los valores de la energía de radiación solar en el Perú son apreciables en las tierras altas de la región de los Andes (o sea, la región montañosa) pero decrecen en las laderas orientales de los Andes y, de manera más significativa, en las tierras bajas (o sea, la selva) y también en las laderas occidentales de los Andes y la costa.

Como resultado final de los estimativos de energía solar para el Perú, los valores más importantes para la irradiación, así como para los demás parámetros, se pueden apreciar en la Tabla 1.

REFERENCIAS

Da Mota, F.S., Beirsdorf, M.I.C. and Acosta, M.J.C., 1977. "Estimates of Solar Energy in Brazil," Agricultural Meteorology, 18: 241-254.

Duffie, J.A., Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 1980.

Coulson, K.L. Solar and Terrestrial Radiation, Academic Press, 1975.

Kondratyev, K.Y.A., Radiation in the Atmosphere, Academic Press, 1969.

Rietveld, M.R. 1978 "A New Method for Estimating the Regression Coefficients in the Formula Relating Solar Radiation to Sunshine," Agricultural Meteorology, 19: 243-252.

Rijks, J.Q., Rea, J. and Frere, M. 1975 "Estudio Agroclimático de la Zona Andina". (Agroclimatology Study of the Andes Zone), Inf. Tech., FAO/UNESCO/OMM, Rome, Italy.

Robinson, N. Solar Radiation, Elsevier, 1966.

LECTURA ADICIONAL

International Solar Energy Society, Solar World Forum, Brighton, England, 1981.

World Meteorological Organisation, Solar Energy, Proceedings of the UNESCO/WMO Symposium, Geneva, Switzerland, 1976.

Ajuste de Vásquez:-
 $a = -0,05 + 0,636 (S/S_0)$ para $S/S_0 < 0,55$
 $a = 0,30$ para $S/S_0 > 0,55$

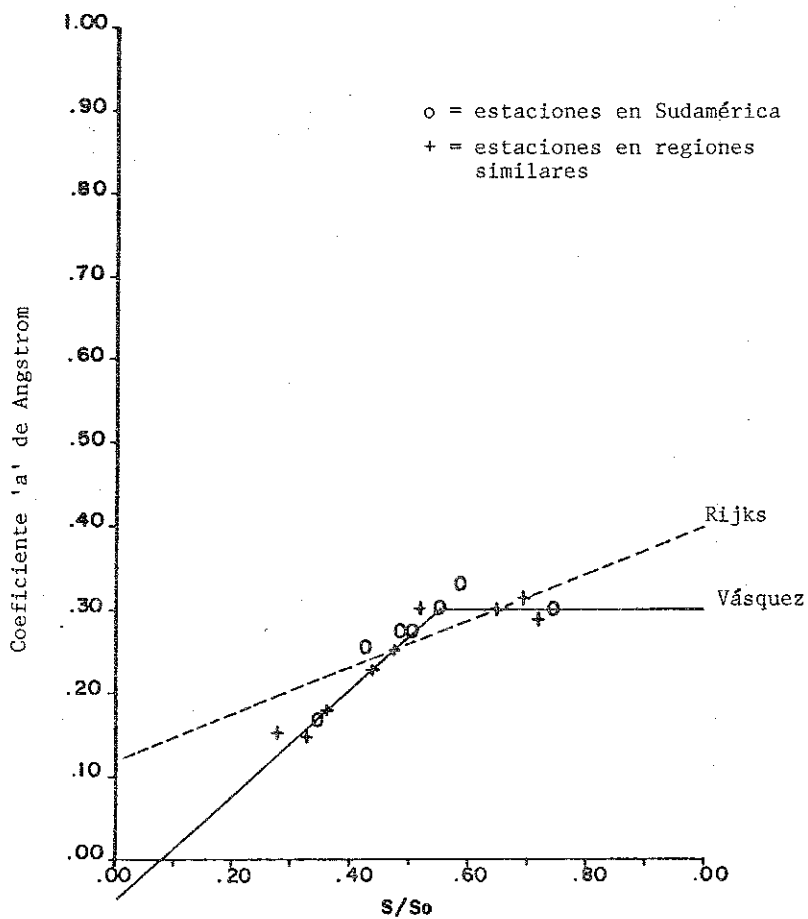


FIGURA 1 A

Predicción del coeficiente 'a' en base a la duración anual del brillo solar
 Ajuste lineal de dos elementos de Vásquez y línea de Rijkz

Ajuste de Vásquez:-
 $b = 0,933 - 1,040 (S/S_0)$ para $S/S_0 < 0,55$
 $b = 0,413$ para $S/S_0 > 0,55$

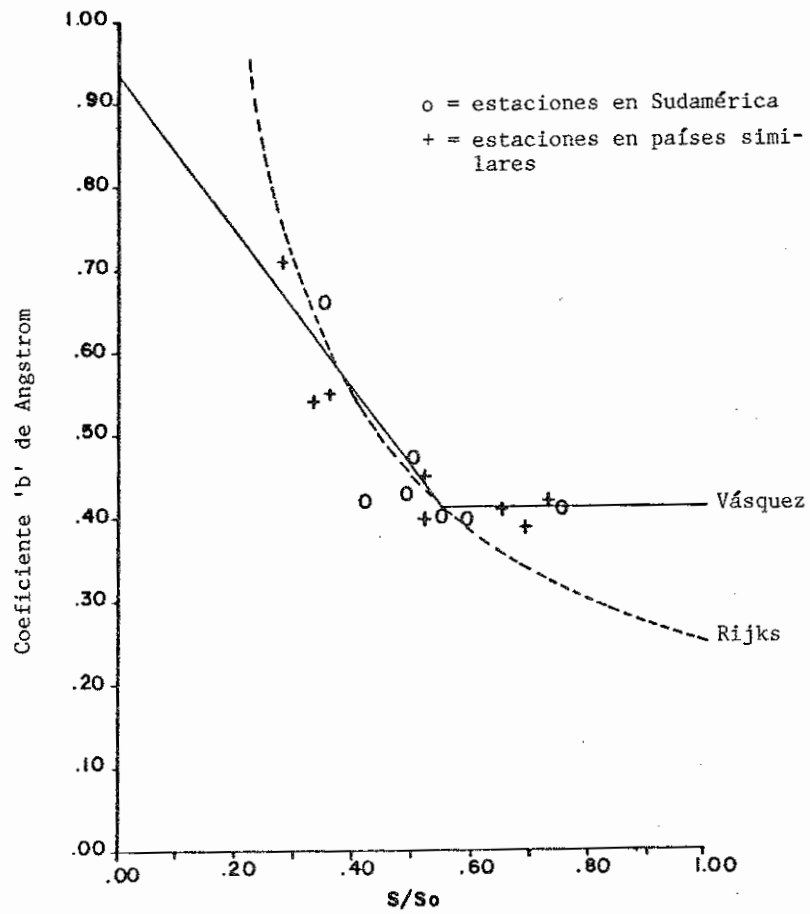


FIGURA 1 B

Predicción del coeficiente 'b' en base a la duración anual del
 brillo solar
 Ajuste lineal de dos elementos de Vásquez e hipérbola de Rijks

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR
DE SAN MARCOS,
LIMA
UNIVERSITY COLLEGE, CARDIFF,
WALES, G BRITAIN
28 JULIO 1986
POR: J. V. VASQUEZ & P. LLOYD

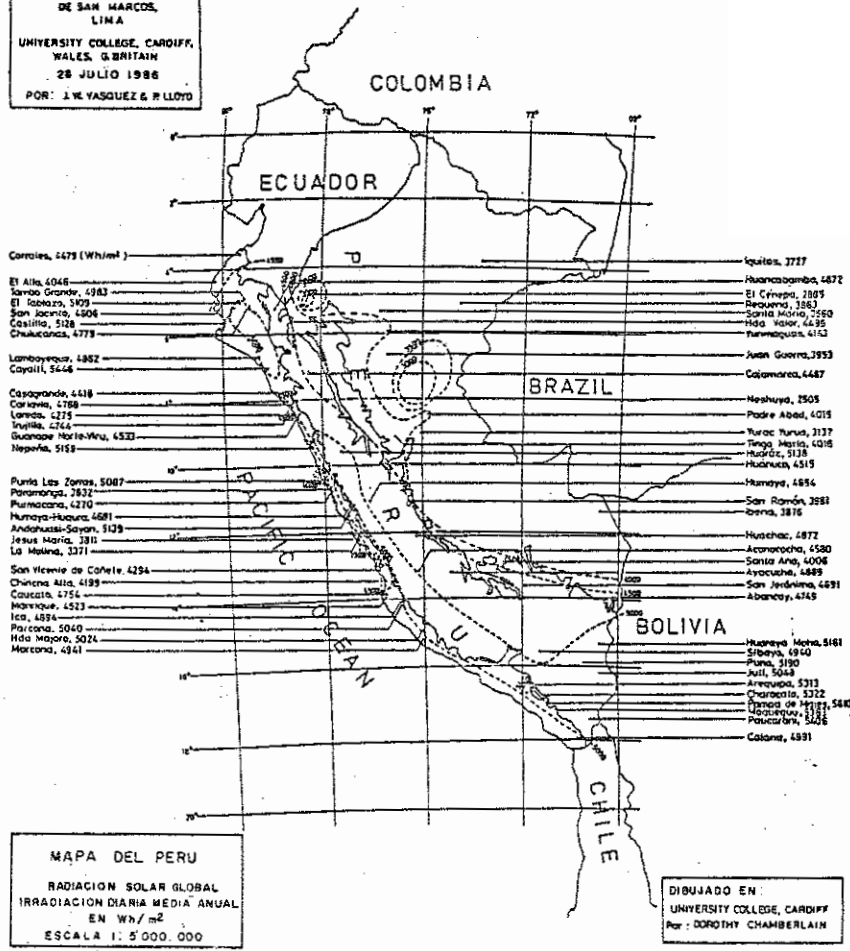


FIGURA 2

64

64

TABLA 1: MEDIA ANUAL DE LA RADIACION SOLAR DIARIA EN EL PERU

J.M.VASQUEZ - P.LLOYD UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS, LIMA, PERU UNIVERSITY COLLEGE CARDIFF, WALES, GREAT BRITAIN					COEFICIENTES ANGSTROM		IRRADIACION DIARIA EN kWh/m ²												IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL EN kWh/m ²	
DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO/ LOCALIDAD	LAT O S	LEN. O M	ALT. M	a	b	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		DEC
TUMBE	TUMBE	CONRALES	3.6	80.5	85	0.74	0.46	4.618	4.864	5.111	4.903	4.482	4.021	3.876	3.926	4.222	4.252	4.603	4.908	4.479
PIURA	TALARA	EL ALTO	4.3	81.2	270	0.70	0.52	4.533	4.615	4.513	4.085	3.876	3.432	3.486	3.682	3.913	3.991	4.039	4.390	4.046
PIURA	PIURA	TAMBO GRANDE	4.7	80.3	200	0.30	0.36	4.930	5.049	4.635	4.816	4.614	4.420	4.565	4.932	5.496	5.644	5.525	5.175	4.983
PIURA	PIURA	EL TABLAZO	4.9	80.5	147	0.30	0.36	5.285	5.443	5.050	5.134	4.832	4.256	4.390	5.039	5.345	5.603	5.467	5.469	5.109
PIURA	PIURA	BAN JACINTO	4.9	80.9	102	0.76	0.42	4.663	4.459	4.868	4.620	4.608	3.916	4.157	4.685	5.030	4.916	4.659	5.202	4.644
PIURA	NOORUPON	CIRULICANAS	5.1	80.1	110	0.28	0.39	4.268	5.760	4.522	4.709	4.402	3.630	4.126	4.878	5.509	5.583	5.106	-	4.779
PIURA	PIURA	CASTILLA	5.2	80.6	311	0.27	0.43	5.269	5.336	5.396	5.188	4.835	4.292	4.420	4.945	5.402	5.542	5.430	5.478	5.128
PIURA	HUANCABAMBA	HUANCABAMBA	5.2	76.5	857	0.27	0.41	4.607	4.757	4.499	4.743	4.431	4.154	4.434	5.045	5.132	4.949	4.395	4.938	4.672
IAMBAYEQUE	IAMBAYEQUE	IAMBAYEQUE	6.7	79.9	18	0.29	0.38	5.444	5.437	5.200	5.035	4.568	3.902	3.844	4.320	4.901	5.088	5.259	5.347	4.862
IAMBAYEQUE	CHICLAYO	CAVALTI	7.1	79.6	150	0.30	0.36	5.897	5.918	5.508	5.449	5.023	4.442	4.675	4.885	5.568	5.848	6.130	6.211	5.446
LA LIBERTAD	ASCOPE	CASAGRANDE	7.7	79.2	158	0.24	0.46	4.811	5.133	4.459	4.450	4.479	3.430	3.250	4.057	4.064	4.731	4.865	5.064	4.416
LA LIBERTAD	ASCOPE	CANTAVIO	7.9	79.2	51	0.28	0.40	4.981	6.056	5.034	4.616	4.800	3.824	3.561	4.361	4.308	4.918	5.208	5.474	4.768
LA LIBERTAD	TRUJILLO	LANEDO	8.1	78.9	100	0.22	0.48	4.640	4.753	4.434	4.560	3.972	3.288	3.389	3.546	4.150	4.519	4.927	4.927	4.275
LA LIBERTAD	TRUJILLO	TRUJILLO	8.1	79.0	30	0.32	0.40	5.340	5.042	5.034	4.702	4.465	3.649	3.794	4.054	4.494	5.075	5.511	5.764	4.744
LA LIBERTAD	TRUJILLO	CHIMPEK NOROK VIBU	8.4	78.8	30	0.25	0.44	5.416	6.162	5.056	4.692	4.511	3.937	3.403	-	3.750	4.778	4.565	3.590	4.533
ANCASH	SANTA	HEPENA	9.2	78.4	283	0.17	0.66	5.529	6.391	5.877	5.304	5.450	3.485	3.690	4.617	4.474	5.660	5.710	5.721	5.159
ANCASH	HUARAZ	HUARAZ	9.5	77.5	3000	0.30	0.36	5.164	5.032	5.039	5.009	4.944	4.729	4.809	5.265	5.390	5.396	5.550	5.241	5.138
ANCASH	HUARMEY	PURTA LAB ZUMRAS	10.3	78.1	100	0.30	0.36	5.006	6.148	6.040	5.519	5.286	3.651	3.449	4.149	4.181	5.175	6.096	6.287	5.087
LIMA	BARANCA	BARANCONA	10.7	77.0	15	0.18	0.55	5.713	4.395	5.092	4.708	2.699	1.945	2.281	2.008	2.720	4.294	4.928	5.516	3.832
LIMA	CHANCAY	HINACAHUA	10.8	77.8	170	0.22	0.48	5.401	5.121	5.192	4.909	3.857	2.673	2.876	3.108	3.789	4.375	5.060	4.837	4.270
LIMA	CHANCAY	AMORINHADE- BAYAN	11.1	77.2	500	0.30	0.36	5.128	5.119	5.027	5.248	4.858	4.330	4.388	4.943	5.417	5.992	5.677	5.567	5.139
LIMA	CHANCAY	HINATA- HINATA	11.1	77.0	350	0.27	0.41	5.224	5.091	4.891	5.103	4.401	3.555	3.425	3.866	4.098	5.335	5.349	5.811	4.681
LIMA	LIMA	JESUS MARIA	12.1	77.0	100	0.18	0.55	5.514	5.337	5.207	5.033	3.557	2.294	2.046	2.239	2.436	3.307	3.969	4.794	3.811
LIMA	LIMA	LA MOLINA	12.1	76.9	150	0.15	0.60	4.721	4.927	4.241	4.389	3.737	2.747	1.964	2.055	2.211	2.808	3.346	4.208	3.371
LIMA	CANETE	SAN VICENTE DE CANETE	13.1	76.3	112	0.30	0.41	4.959	5.326	5.059	4.664	4.373	2.886	2.574	3.119	3.866	4.713	4.730	5.253	4.294
ICA	CHINCHA	CHINCHA ALTA	13.4	76.1	94	0.22	0.49	5.383	4.707	4.993	4.955	3.540	2.749	2.608	3.275	3.859	4.849	4.580	4.931	4.199
ICA	ICA	CACAYO	13.7	76.2	35	0.29	0.38	5.768	5.861	5.828	5.028	4.289	3.569	3.239	3.574	4.191	5.129	5.121	5.448	4.794

J. M. VASQUEZ - V. FLOYD UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS, I.T.M.A., PERU. UNIVERSITY COLLEGE, CARDIFF, WALES, GREAT BRITAIN				COEFI- CIENTES ANGSTROM		IRRADIACION DIARIA EN kWh/m ²												IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL EN kWh/m ²		
DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO/ LOCALIDAD	LAT °S	LONG °W	ALT m	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC			
ICA	ICA	NAURQUE	13.7	76.0	-1.0	0.26	0.41	5.209	5.250	5.145	4.356	4.069	3.356	3.520	3.545	4.243	5.040	5.413	5.039	4.523
ICA	ICA	ICA	14.0	75.7	390	0.30	0.36	5.072	4.832	4.878	5.133	4.245	4.140	3.975	4.425	4.975	5.003	5.654	5.504	4.894
ICA	ICA	PANCHOA	14.1	75.7	389	0.30	0.36	5.372	5.342	5.235	5.171	4.469	3.893	3.896	4.530	5.052	5.754	5.917	5.049	5.040
ICA	NAZCA	INIA, MAJANO	14.8	75.0	410	0.30	0.36	5.320	5.622	5.571	4.816	4.480	3.757	3.822	4.407	5.070	5.869	5.997	5.404	5.074
ICA	NAZCA	MARCONA	15.1	75.0	620	0.30	0.36	5.425	5.109	5.150	4.937	4.347	3.762	3.755	4.300	5.043	5.839	5.835	5.696	4.941
AREQUIPA	CAILLOCH	STAYO	15.5	71.5	704	0.30	0.36	4.968	4.356	5.010	5.143	4.317	4.072	3.959	4.818	5.258	5.575	5.817	5.005	4.940
AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	16.3	71.5	2150	0.30	0.36	5.442	5.135	5.038	5.164	4.554	4.357	4.468	5.145	5.704	6.160	6.475	6.117	5.311
AREQUIPA	AREQUIPA	CHACABATO	16.4	71.5	2451	0.30	0.36	5.186	4.948	5.198	5.057	4.645	4.426	4.570	5.173	5.711	6.501	6.501	5.862	5.322
AREQUIPA	AREQUIPA	PANPA DE HAJES	16.5	72.2	1440	0.30	0.36	5.840	5.535	5.699	5.034	4.673	4.548	4.816	5.289	5.837	6.669	6.605	6.372	5.410
MORAY	NABICAL HITO	MOQRHANA	17.2	70.8	1412	0.30	0.36	5.484	5.304	5.285	5.205	4.562	4.265	4.429	4.846	5.694	6.190	6.503	6.294	5.363
YACHA	YACHA	PACAHAMI	17.5	69.8	4541	0.30	0.36	5.146	5.253	5.041	5.801	4.909	4.716	4.762	5.496	5.839	6.218	6.144	5.823	5.406
YACHA	YACHA	CALANA	17.9	70.2	875	0.30	0.36	5.432	5.507	5.236	4.817	4.206	3.783	3.951	4.364	4.872	5.680	5.966	5.884	4.981
CAJAMARCA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	7.1	70.5	2640	0.25	0.45	4.475	4.445	4.257	4.160	4.197	4.077	4.270	4.505	4.426	4.627	4.930	4.734	4.447
HUANCO	EDIFICIO PRADO YIMCO	HARLA	9.1	76.0	441	0.20	0.52	3.822	3.858	3.783	3.753	3.773	3.612	3.872	4.554	4.450	4.530	4.249	3.931	4.016
HUANCO	HUANCO	HUANCO	9.9	76.2	1895	0.26	0.41	4.450	4.290	4.395	4.350	4.141	4.201	4.152	4.692	4.694	4.855	4.876	4.658	4.515
JUNIN	CHANCHAYAYO	HURAYA	11.1	77.0	-1.0	0.27	0.41	5.059	5.322	5.301	4.715	4.592	3.472	3.578	4.323	4.229	5.018	4.943	5.296	4.654
JUNIN	CHANCHAYAYO	MAY BAKON	11.1	75.9	800	0.20	0.52	3.792	3.519	3.723	3.767	3.762	3.780	4.054	4.387	4.112	4.307	4.378	4.329	3.981
JUNIN	HUANCAYO	HUANCAYO	12.0	75.4	1360	0.30	0.36	4.998	4.931	4.649	4.696	4.593	4.393	4.526	4.809	4.994	5.270	5.428	5.154	4.822
HUANCAYAYO	CASTRO- VIRREY	ACONOCOCCHA	13.1	75.2	4520	0.27	0.41	4.857	3.976	4.147	4.291	4.221	4.624	4.322	4.595	4.945	4.858	5.253	4.874	4.580
AYACUCHO	HUAMANGA	AYACUCHO	13.2	74.2	2764	0.30	0.36	5.144	5.080	4.735	4.654	4.494	4.301	4.212	4.677	5.032	5.443	5.671	5.329	4.889
AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	13.5	72.9	2378	0.29	0.37	4.796	4.724	4.681	4.625	4.309	4.116	4.230	4.653	4.864	5.491	5.375	4.931	4.749
CUSCO	LA COMUNICACION SANTA ANA		12.9	73.7	920	0.31	0.51	3.993	3.972	3.950	3.792	3.943	3.818	3.931	4.046	4.149	4.268	4.294	4.919	4.006
CUSCO	CUSCO	SAN JERONIMO	13.6	71.9	3220	0.29	0.38	4.647	4.635	4.503	4.645	4.393	4.271	4.424	4.637	4.852	5.201	5.165	4.834	4.691
PUNO	HUANCAYO	HURAYA-HURO	15.4	69.5	3870	0.30	0.36	5.544	5.314	4.841	4.755	5.003	4.741	4.498	5.260	5.512	5.332	5.267	5.851	5.141
PUNO	PUNO	PUNO	15.8	70.0	3875	0.30	0.36	5.106	5.243	5.075	5.051	4.639	4.380	4.557	5.015	5.504	5.935	5.965	5.57	5.190
PUNO	CHUCUYO	JUNI	16.2	69.4	3852	0.30	0.36	4.587	4.719	5.052	4.785	4.812	4.495	4.966	5.642	5.935	5.310	5.291	5.048	
AMAZONAS	BAJOS	EL CENIPA	5.1	78.0	240	0.12	0.64	2.471	2.517	3.685	2.726	2.601	2.545	2.964	3.206	3.131	3.777	3.277	2.701	2.885
AMAZONAS	BAJOS	INA, VALLON	5.7	78.4	421	0.25	0.45	4.102	4.181	4.410	4.444	4.002	4.180	4.108	4.649	4.789	4.903	5.281	4.804	4.493

65

J. M. VASQUEZ - P. LLOYD UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS, LIMA, PERU UNIVERSITY COLLEGE CARDIFF, WALES, GREAT BRITAIN				COEFICIENTES ANGSTROM		IRRADIACION DIARIA EN kWh/m ²												IRRADIACION DIARIA MEDIA ANUAL EN kWh/m ²		
DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO/ LOCALIDAD	LAT DE	LITG DE	ALT EN M	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DEC			
SAN MARTIN	SAN MARTIN	JUAN GUERRA	6.4	74.4	110	0.20	0.51	1.925	4.017	1.798	3.415	3.691	3.608	3.920	4.242	4.211	4.256	4.212	4.115	3.953
LORETO	MAYNAS	EQUITOS	3.8	73.2	125	0.18	0.56	1.339	1.467	1.500	1.710	2.964	3.138	3.699	4.195	4.726	3.792	4.206	3.792	3.727
LORETO	REQUENA	REQUENA	5.0	73.6	180	0.19	0.54	1.907	1.995	1.618	2.552	3.378	3.351	3.717	4.182	4.265	4.643	4.115	3.818	3.843
LORETO	ALTO AMAZONAS	SANTA MARIA	5.1	76.1	179	0.17	0.50	1.335	1.239	2.817	2.860	3.271	3.150	4.001	4.323	4.165	4.402	3.844	3.318	3.560
LORETO	ALTO AMAZONAS	YURIMACHAS	5.9	74.1	165	0.21	0.50	1.041	1.928	1.766	1.892	3.981	3.941	4.104	4.600	4.548	4.431	4.286	4.150	4.141
LORETO	UCAYALI	MESUYA	8.0	75.1	140	0.10	0.60	2.188	2.014	2.100	2.154	2.067	2.327	3.729	3.557	3.327	2.816	2.540	2.221	2.505
UCAYALI	PADRE ABAD	PADRE ABAD	8.5	74.8	270	0.20	0.52	1.907	1.862	1.758	1.545	1.675	3.480	3.974	4.554	4.577	4.512	4.122	4.101	4.015
UCAYALI	ATALAYA	YANAC-YURIA	9.0	75.0	140	0.14	0.61	2.550	2.593	2.726	2.651	2.738	3.041	3.327	3.819	4.046	3.539	3.437	3.175	3.137
ISL. DE CALLAO	TAMAYO	ISLETA	11.4	69.6	150	0.20	0.51	1.746	1.736	1.706	1.713	1.471	3.509	3.819	4.263	4.322	4.087	4.232	3.908	3.874

ESTIMATION OF THE SOLAR ENERGY IN PERU *

J.W. Vasquez ^{1/}, P. Lloyd ^{2/}

ABSTRACT

The aim of this research work has been to find the solar energy potential of Peru by estimating the solar radiation energy over its territory in accordance with the relationship between: the monthly and yearly average daily sunshine duration S , the monthly and yearly average day length S_0 , the Angstrom constants coefficients a and b , the global solar irradiation on the ground H and on the top of the atmosphere H_0 . Several meteorological stations' data for S (the actual sunshine duration) have been used. The values of the Angstrom coefficients for these stations were comparable to values reported for tropical countries of about the same climatic conditions and latitudes ranging between zero and thirty five degrees South.

* Research work financed by the British Council and done at the Department of Mechanical Engineering and Energy Studies, University College Cardiff.

^{1/} School of Physical Sciences, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru.

^{2/} Department of Mechanical Engineering and Energy Studies, University College Cardiff, Cardiff, Wales, Great Britain.

INTRODUCTION

Probably it may be of interest to give an idea of solar radiation energy ("solar radiation" for simplicity) as a part of the entire electromagnetic spectrum. This is electromagnetic radiation from the Sun with wavelengths ranging between $0.20 \mu\text{m}$ and $5 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$), called simply short wave radiation. Its corresponding spectrum is divided into spectral regions in accordance with the wavelength (or frequency) of such radiation. The short wave radiation from the Sun and the long-wave radiation emitted by the Earth (with wavelengths in between 5 and $100 \mu\text{m}$) from the whole radiation, which causes the most important physical phenomena, solar radiation being the largest and predominant. The task will be entirely devoted to the study of the short-wave radiation, in which one can distinguish several main regions as follows:

- i) The ultraviolet region, with wavelengths between 0.001 and $0.38 \mu\text{m}$ and with subdivisions such as the near-ultraviolet ($0.30 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$), the far-ultraviolet ($0.20 < \lambda < 0.30 \mu\text{m}$) and the vacuum ($0.001 < \lambda < 0.20 \mu\text{m}$).
- ii) The visible region with wavelengths between 0.38 and $0.76 \mu\text{m}$, giving the colours

$0.380 < \lambda$ (violet)	$< 0.455 \mu\text{m}$
$0.455 < \lambda$ (dark blue)	< 0.485
$0.485 < \lambda$ (light blue)	< 0.505
$0.505 < \lambda$ (green)	< 0.550
$0.550 < \lambda$ (yellow green))	< 0.575
$0.575 < \lambda$ (yellow)	< 0.585
$0.585 < \lambda$ (orange)	< 0.620
$0.620 < \lambda$ (red)	< 0.760

and typical values of wavelengths corresponding to the colours

violet	with	$\lambda = 0.430 \mu\text{m}$
dark blue		$= 0.470$
light blue		$= 0.495$
green		$= 0.530$
yellow green		$= 0.560$
yellow		$= 0.580$
orange		$= 0.600$
red		$= 0.640$

- iii) The infrared region with wavelengths between 0.76 and 1000 μm and with subdivisions such as the near-infrared ($0.76 < \lambda < 25 \mu\text{m}$) and the far-infrared ($25 < \lambda < 1000 \mu\text{m}$).

It has been found that practically all radiant solar energy is in the range of the short-wave radiation, with wavelengths between 0.20 and 5 μm and with its major portion in part of the near-ultraviolet, visible and part of the near-infrared (i.e., in the wavelength interval from 0.30 μm to 3 μm).

Since electromagnetic radiation is a wave-like phenomenon that moves energy across distances, and light (or short-wave radiation) as well as radio waves, micro-waves, X and gamma rays are all forms of electromagnetic radiation, then the only thing that distinguishes each of these types of radiation from the others is its wavelength, the length of a complete wave. Ultraviolet light in small quantities is responsible for some beneficial things, such as the generation of vitamin D and suntans, but at high intensities it can be very dangerous.

Infrared light is sometimes called radiant heat, but it is not real heat energy until it is absorbed by a surface. Hot objects lose heat by radiating infrared light. The Sun mostly radiates visible light, but also substantial amounts of ultraviolet and infrared light. The Sun is the main source of electromagnetic radiation, emitted at a temperature of about 5762° K, which is the temperature of its photosphere. It is understood that at the top of the Earth's atmosphere and at the mean Earth-Sun distance such radiation has a constant value of about 1353 watts/square metre, the so-called "solar constant G_{sc} ", which is the energy from the Sun per unit time, received on a unit area of surface perpendicular to the direction of propagation of the radiation.

In addition to the total energy in the solar spectrum (i.e., the solar constant G_{sc}), however, it is useful to know the spectral distribution of the extra-terrestrial irradiance G_o , which is the radiance that would be received in the absence of the atmosphere. The sources of variation in the extra-terrestrial irradiance at normal incidences are the variation in the radiation emitted by the Sun and the variation of the Earth-Sun distance, the latter being the more important.

The dependence of the extra-terrestrial irradiance at normal incidence G_{on} on time of the year has been indicated by the approximate relation:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \quad (1)$$

$$G_{sc} = 1353 \text{ watts/square metre}$$

where G_{on} is the extra-terrestrial irradiance (direct or beam radiation per unit time and unit area) measured in the plane normal to the irradiation on the n th day of the year. Obviously, G_{on} is also expressed in watts/square metre.

Interaction of Solar Radiation with the Main Components of the Lower Atmosphere

The atmosphere consists mainly of nitrogen and oxygen, the combined volume concentration of which is about 99 percent. There are, however, more components in much smaller amounts, such as water vapour, carbon dioxide, ozone, oxides of nitrogen and some others, such as aerosols (dust), which are of prime importance in the main processes of the interaction with solar radiation. The water and water vapour in the atmosphere are associated with atmospheric processes such as condensation and evaporation, cloud formation and precipitation, cleaning of the atmosphere due to the removal of aerosol particles through capture when water droplets fall, and elimination of gases by dissolving. Water is also associated with chemical reactions with other substances that occur in aqueous solution. Finally, water vapour is also associated with very important roles in the transmission of solar radiation through the atmosphere.

Among the most important types of interaction of solar radiation with the main components of the atmosphere are the processes of absorption and scattering which occur mainly in the lowest atmospheric region (i.e., the troposphere) at altitudes ranging from sea level up to 10 or 12 kilometres. As a consequence of such interactions, the solar radiation energy is attenuated when it passes through the atmosphere and gets to the ground. The attenuation of radiation due to absorption and scattering is characterised by coefficients usually called "mass absorption coefficient" K_a and "mass scattering coefficient" K_s , respectively. These coefficients are related to the path length ds , to the

linear density of the absorbing or scattering medium ρ (mass per unit length along beam path) and to the irradiance G through the relations

$$dG = \begin{cases} -K_a \rho G ds & \text{(absorption)} \\ -K_s \rho G ds & \text{(scattering)} \end{cases} \quad (2)$$

Sometimes instead of the mass attenuation coefficients, the volume absorption coefficient $\alpha = \rho K_a$ and the volume scattering coefficient $K = \rho K_s$ are used.

The absorption spectrum of the atmosphere extends over a wide range, from the X-ray region to ultrashort radio waves. This makes the physical nature of absorption highly varied and obviously complicates the structure of the spectrum. The problem is to determine the absorption in different spectral intervals and also in wide spectral regions embracing short and long wave radiation. In all cases the main factor is the amount of radiation absorbed. In several cases the temperature and pressure of the absorbing medium become very important.

The main absorbing components of the atmosphere are O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 , N_2 , NO , N_2O , CO , CH_4 .

Radiation absorption in the near-infrared is physically related to vibrational and rotational molecular transitions, whereas radiation absorption in the far-infrared is related to purely rotational transitions.

Absorption in the atmosphere is largely due to ozone (in the ultraviolet) and water vapour (in the infrared). There is almost complete absorption of ultraviolet radiation by ozone in the middle upper atmosphere (i.e., the stratosphere) at wavelengths less than $0.29 \mu m$. Ozone absorption decreases as wavelength increases. In the region of wavelengths greater than $0.29 \mu m$ until $0.35 \mu m$, there is no absorption. Water vapour absorption takes place in bands in the infrared part of the solar spectrum, with absorption bands centred at 1.0 , 1.4 and $1.8 \mu m$. Beyond $2.3 \mu m$ the transmission of the atmosphere is very low owing to absorption by water vapour and carbon dioxide.

The scattering processes result in the attenuation of beam radiation by air molecules such as those of oxygen, nitrogen, water vapour, dust, etc. Scattering of beam radiation by air molecules occurs in accordance with Rayleigh's theory, which states that such a process takes place when the scattering particles are smaller than the wavelength of the radiation. In this case the attenuation coefficients are proportional to λ^{-4} . Water vapour scattering depends on the amount of precipitable water and the attenuation coefficients are proportional to λ^{-2} . On the other hand, dust particles are larger than air molecules and the attenuation coefficients are proportional to $\lambda^{-3/4}$. Obviously it can be shown that dust particles have the largest attenuation coefficients in the processes of scattering. In atmospheric conditions the main factors that determine scattering are air-density fluctuations and aerosol particles (water droplets and dust particles). It can be said that atmospheric scattering is a continuous function of the wavelength of the radiation whereas atmospheric absorption is in general selective.

As an important fact, it should be stated that solar radiation is the fundamental energy source for the hydrological cycle and exerts influence on the possible types of agriculture in each region. It does this through the distribution of rainfall. On the other hand, solar radiation energy is a non-conventional type of renewable energy available to man's hand that can be converted to heat and electricity and other forms of energy useful in technology, industry and domestic life.

This research work is a contribution to the development of solar energy technology in Peru. The authors hope that this basic work will help the state authorities of the Ministry of Energy and Mining, as well as other experts, in taking decisions on the development of this sort of technology. These decisions must take into account the fact that sooner or later it will be necessary to face energy problems in connection with the needs for electricity and heating in most of the sites and regions of the Peruvian territory.

Some Concepts and Notations

Beam radiation - is that radiation received from the Sun without having been scattered by the atmosphere. Beam radiation is the same as direct radiation.

- Diffuse radiation - Is that radiation received from the Sun after its direction has been changed by scattering by the atmosphere or by the ground.
- Reflected radiation - Is scattered radiation received from the Sun after being reflected from the ground or from a cloud.
- Transmitted radiation - Is that radiation transmitted by a medium such as the atmosphere.
- Global radiation - Is the hemispherical radiation composed of beam and diffuse radiations.
- Total radiation - Is the radiation integrated over the short and long-wavelength intervals.
- Irradiance G - Is the rate at which radiation is received by a surface per unit area. It is measured in watts/m².
- Irradiation H - Is the amount of radiation received by a surface per unit area over a specified period. For solar radiation on the ground, it is sometimes called insolation.
- Solar radiation - Is the energy radiated from the Sun.
- Emittance - Is the energy radiated by a body, expressed as a fraction of the energy that would be radiated by a black body at the same temperature.
- Absorptance - Is the fraction of incident energy that is absorbed by a surface.
- Reflectance - Is the fraction of incident energy that is reflected by a surface.

Transmittance	- Is the fraction of incident energy that is transmitted through a medium.
Extra-terrestrial irradiance G_0	- Is the rate at which solar radiation is received per unit area on a horizontal plane at the top of the atmosphere. It is the sum of the global solar irradiance received at the ground plus the irradiance absorbed by the atmosphere plus the irradiance reflected by the atmosphere into space.
Extra-terrestrial irradiation H_0	- Is the amount of solar radiation received by a surface per unit area over a specified period at the top of the atmosphere.
Sunshine duration S	- Is the actual observed duration of sunshine, expressed in hours. In other words it is the length of that part of the day during which the Sun is shining.
Day length S_0	- Is the maximum possible duration of sunshine, expressed in hours.
Albedo	- Is the fraction of incident energy that is reflected by a surface.
Local solar time LST	- Is the time based on the apparent angular motion of the Sun across the sky, with solar noon the time the sun crosses the meridian of the observer. It is expressed in hours and is negative in the morning. It is also called the true solar time or local apparent time.
Local mean time LMT	- Is the time defined by the motion of the mean Sun, which is a fictional point in the sky traveling along the course of the Sun at the mean angular speed of the Sun.

Standard mean time - Is the time normally shown on clocks. It corresponds to a certain region around a specific meridian, e.g. for Peru it is the Peruvian time at 75° West, expressed also in hours.

Equation of time E - Is the time difference between LST and LMT. It can be computed approximately by the expression:

$$E \text{ (in minutes)} = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (3)$$

$$\text{where } B \text{ (in degrees)} = \frac{360 (n-81)}{365}$$

and $n = \text{day of the year} ; 1 \leq n \leq 365.$

These formulae are taken from Duffie and Beckman but originally are from Whillier (1979).

Equation for LST - Is the equation given by the expression:

$$LST = SMT + \left[4 + (L_{st} - L_{loc}) + E \right] / 60 \quad (4)$$

where L_{st} = longitude of the standard meridian for the time zone = 75° for Peru

and L_{loc} = longitude of site or location.

Zenith angle Z - Is the angular distance between a given line of sight and the perpendicular to the observer's surface. In particular the solar zenith angle is the angle between a vertical line to the Zenith (i.e., the point directly overhead) and the line of sight to the Sun. It is also the angle of incidence between the beam radiation on a surface and the normal to that surface. It is expressed in degrees or radians.

Hour angle HA - Is the angular displacement of the Sun, east or west of the local meridian, due to rotation of the Earth, about its axis at 15° per hour. If expressed in degrees, its equation is:

$$HA = LST \times 15 \quad (5)$$

Declination δ - Is the angular position of the Sun at solar noon with respect to the plane of the equator. When expressed in degrees it has a maximum value of $+23.45^\circ$ on June 22 and a minimum value of -23.45° on December 22. These are the Winter and Summer solstices, respectively (in the Southern Hemisphere). It has an intermediate value of zero on March 22 and September 23, i.e., on the Autumnal and Vernal equinoxes, respectively (also in the Southern Hemisphere). Its value ranges thus in the interval:

$$-23.45^\circ \leq \delta \leq +23.45^\circ$$

The declination angle δ can be found from the equation of Cooper (1969):

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360 (284+n)}{365} \right] \quad (6)$$

where n is the day of the year.

Relative air mass m - Usually called "air mass number" (sometimes misleadingly called simply "air mass"), is the ratio of the actual air mass through which the Sun's beam passes to the vertical air mass. It is essentially a measure of how much atmosphere sunlight must pass through before it reaches the ground. Under the assumption of

uniform air density (or equivalently ignoring refraction) and that the atmosphere is an infinite plane slab, the air mass can be approximated by the expression $m = \sec Z$. Obviously the relative air mass is a pure number.

Sunset (or sunrise) hour angle HAS - It is the hour angle at which the solar zenith angle is 90° . For a horizontal surface its expression in terms of latitude L and declination δ is given by:

$$\cos (\text{HAS}) = -\tan L \cdot \tan \delta \quad (7)$$

Relation between S_0 and HAS - For a horizontal surface this relation is given by:

$$S_0 = 2 \text{ HAS} \frac{12}{180} \quad (8)$$

if HAS is expressed in degrees.

Relation between G_0 and Zenith angle Z - For a horizontal surface this relation is given by the expression:

$$G_0 = G_{0n} \cos Z = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \cos Z \quad (9)$$

where $\cos Z = \sin \delta \sin L + \cos \delta \cos L \cos (\text{HAS})$

The irradiance G_0 is that at the top of the atmosphere and in a horizontal plane.

Equation for the daily H_0 - At the top of the atmosphere and in a horizontal plane, this equation is the time integral of G_0 over the day from sunrise to sunset. It is given by the expressions:

$$H_0 = \int C_0 dt \text{ over a day}$$

$$= \frac{24 \times 3600}{\pi} C_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 n}{365} \right) \right] \left[\cos L \cos \delta \sin(HAS) + \frac{2\pi HAS}{360} \sin L \sin \delta \right] \quad (10)$$

DATA AND METHODS

It is known that only part of the incoming solar radiation reaches the ground. The rest of it is absorbed or scattered by the atmosphere. The global radiation (or more precisely, the global irradiation H) can be measured with pyranometers. As the number of meteorological stations measuring irradiation is limited, other meteorological data are needed. Many meteorological stations record only the duration of sunshine S, which is the most important quantity for estimating the irradiation H.

To find the distribution of the incident solar radiation on the Earth, it is necessary to have sufficiently many measured values of the quantities required. For the present work it has been possible to get measurements of the duration of sunshine S for about seventy sites in Peru from the National Meteorological and Hydrological Service of Peru, the Meteorological Office at Bracknell in England and from the Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO). Of those stations, only 64 had satisfactory data sets, which were used in the present study.

Following the method of Angstrom (1924) who was the first to suggest a linear relationship between global irradiation H and sunshine duration S, we can use his formula re-written by Prescott (1940) as:

$$H = H_0 \left[a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) \right] \quad (11)$$

in which

H = daily global irradiation reaching the ground.

H_0 = daily global extra-terrestrial irradiation at the top of the atmosphere, (sometimes known as the Angot-value, after Angot, who published a table of values of H_0).

S = measured number of hours of sunshine registered by a sunshine recorder.

S_0 = maximum number of hours of sunshine possible on a day and place in question. It is also the day length.

a and b = dimensionless parameters almost constant in time but variable from place to place, determined by fitting Angstrom's formula to measured data.

The ratio S/S_0 is called the relative duration of sunshine.

The first part of the work was to write a computer program for finding each of the monthly values of S_0 , H_0 and H , as well as the parameters a and b of Angstrom's formula, for each of the 64 stations with available data.

It is important to mention that in sites where global irradiation is estimated through Angstrom's formula, the accuracy of H depends on the accuracy with which the coefficients a and b are estimated.

The quantities S_0 and H_0 can be found with formulae containing the sunset or sunrise hour angle and the integral of the extra-terrestrial irradiance G_0 . The quantity G_0 in turn depends on the solar constant G_{sc} , the day of the year n and the solar Zenith angle Z .

For the estimation of Angstrom's coefficients a and b , several methods have been considered, such as those of Black et. al. (1953), Pennan (1956), Frere et. al. (1975), and Fritz and McDonald (1949). These, however, were predominantly based on data from stations or sites of higher latitudes than, or different climate conditions from, those of Peru and it has been preferred to estimate the Angstrom coefficients with a method derived from radiation data recorded in Peru and other Latin American countries, taken from a study funded by the Food and Agriculture Organisation of the United Nations (Rijks, 1975). The most suitable

values of Angstrom's coefficients a and b would be those estimated by a method essentially the same as that of J.Q. Rijks (1975). Rijks curves were re-fitted to measured values of a and b for sites, as follows:

	a	b
Lambayeque	0.27	0.43
Huaraz	0.32	0.40
Lima (La Molina)	0.17	0.66
Moquegua	0.30	0.41

Visual inspection of the scatter diagrams suggested that two-piece linear fits would be appropriate. The fits were done by hand. It is clear from the graphs that a relation does exist between the coefficients a and b and the mean relative duration of sunshine S/S_0 . The values of the Angstrom coefficients a and b have been estimated from the values of the annual relative sunshine duration. For those sites where the ratio $S/S_0 \geq 0.55$, the values of the coefficients are assumed to be constants, (namely $a = 0.30$, $b = 0.413$); and for those sites where $S/S_0 < 0.55$, the values of a and b are estimated by the following linear equations, as shown in Figure 1:

$$a = \begin{cases} k_a + m_a (S_1/S_0)^{Y^r} & \text{for } SY^r \geq S_1 \\ k_a + m_a (S/S_0)^{Y^r} & \text{for } SY^r < S_1 \end{cases} \quad (12a)$$

$$b = \begin{cases} k_b + m_b (S/S_0)^{Y^r} & \text{for } SY^r < S_1 \\ k_b + m_b (S_1/S_0)^{Y^r} & \text{for } SY^r \geq S_1 \end{cases} \quad (12b)$$

in which

$$k_a = -0.05$$

$$k_b = 0.933$$

$$S_1 = 0.55$$

$$m_a = 0.636$$

$$m_b = -1.040$$

Computation of the Irradiation H

When the values of S_0 , H_0 , a and b had been estimated, the next task was to compute the values of H for the 64 sites, using the corresponding available sunshine duration data. The results were employed as the basis for drawing an isopyr map of Peru. (An isopyr is a contour of equal irradiation.) This map then allows one to get the estimated values of H for other sites in Peru.

Taking into account similar meteorological and climate conditions (e.g., similar values for the relative sunshine duration S/S_0), the Peruvian territory has been divided into three main regions running roughly parallel to the coast. These are as follows:

Region I - The Coast and the Western Slopes of the Andes with altitudes between sea level and 1000 m. With regard to radiation and climate, two subregions must be considered. First, the coast, which is considered as a very narrow area of about 10 km in width and an altitude of up to 300 m. A drizzle type of precipitation falls in Winter (June to October). Second, the Western slopes of the Andes is considered as a very dry strip running parallel to and a little way inland from the coast, with altitudes ranging from 300 m to 1000 m and within roughly 50 km of the shore. This is an area with very little rain, a desert region with a few swift-flowing rivers from the Andes. The temperature is low for the latitude and there is considerable cloud cover on the Coast.

Region II - The Highlands of the Andes, with an altitude greater than 1000 m, forming a strip of roughly 250 km on average. The rainfall increases towards the east in the whole. Usually it is called the mountain region, where the climate is temperate or cold (according to height) with light rainfall on the Western Cordillera and rather heavier over the Eastern Cordillera. Thundery rainstorms, typical of the tropics and mountains, frequently occur in this area, especially over the Eastern Cordillera in the wet season.

Region III - The Eastern Slopes of the Andes and the Eastern Lowlands with altitudes of less than 1000 m down to 300 m and from 300 down to almost sea level in the lowlands. This region is usually called the jungle and is the wettest part of Peru. The Eastern Slopes of the Andes descend into the tropical region of the Amazon Basin and have a thundery rainy season from October to April.

RESULTS AND COMMENTS

Once the 64 yearly average and seasonal values of daily irradiation were estimated, the next and last task was to write them onto a map of Peru and to draw isopyrs were drawn as contour lines for equal values of irradiation H. Such a map is shown in Figure 2. The estimated values of the yearly average daily irradiation show that the highlands of the Andes region have the largest values of irradiation, increasing towards the south of Peru. Typical values of such irradiation for this region are as follows:

Sites	Irradiation H (in kWh/m ²)
Pampa de Majes	5.610
Paucarani	5.406
Moquegua	5.363
Characato	5.322
Arequipa	5.313
Puno	5.190
Huaraya-Moho	5.161
Huaraz	5.138
Juli	5.048

On the coast and western slopes of the Andes region, however, the far north and the far south of this region have fairly high values of solar irradiation. There are two peak values of 5.446 and 5.159 kWh/m² in the north and middle north, at Cayalti and Nepena, respectively. Typical irradiation values in this region are as follows:

Sites	Irradiation H (in kWh/m ²)
Cayalti	5.446
Nepena	5.159
Andahuasi-Sayan	5.139
Castilla	5.128
El Tablazo	5.109
Punta Las Zorras	5.087
Parcona	5.040
Hda. Majoro	5.024

On the eastern slopes of the Andes and in the eastern lowlands region the results of the computed values of H show that most of the sites have very much less solar radiation, with the lowest value of 2.505 kWh/m² for Neshuya, Ucayali in the Department of Loreto. Typical values of irradiation in this region are as follows:

Sites	Irradiation H (in kWh/m ²)
Hda. Valor	4.495
Yurimaguas	4.143
Tingo Maria	4.016
Padre Abad	4.015
Santa Ana	4.006
San Ramon	3.981

A very important thing to mention is that the values for solar radiation energy in Peru are very appreciable in the highlands of the Andes region (i.e., the mountain region), decreasing on the eastern slopes of the Andes, and more significantly in the lowlands (i.e., the jungle), and also decreasing on the western slopes of the Andes and the coast.

As a final result of the estimates of the solar energy for Peru, the most important values for irradiation, as well as for the other parameters involved, are shown in Table 1.

REFERENCES

Da Mota, F.S., Beirsdorf, M.I.C. and Acosta, M.J.C., 1977. "Estimates of Solar Energy in Brazil," Agricultural Meteorology, 18: 241-254.

Duffie, J.A., Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 1980.

Coulson, K.L. Solar and Terrestrial Radiation, Academic Press, 1975.

Kondratyev, K.Y.A., Radiation in the Atmosphere, Academic Press, 1969.

Rietveld, M.R. 1978 "A New Method for Estimating the Regression Coefficients in the Formula Relating Solar Radiation to Sunshine," Agricultural Meteorology, 19: 243-252.

Rijks, J.Q., Rea, J. and Frere, M. 1975 "Estudio Agroclimatólogico de la Zona Andina". (Agroclimatology Study of the Andes Zone), Inf. Tech., FAO/UNESCO/OMM, Rome, Italy.

Robinson, N. Solar Radiation, Elsevier, 1966.

FURTHER READING

International Solar Energy Society, Solar World Forum, Brighton, England, 1981.

World Meteorological Organisation, Solar Energy, Proceedings of the UNESCO/WMO Symposium, Geneva, Switzerland, 1976.

Vasquez' fit:
 $a = -0.05 + 0.636 (S/S_0)$ for $S/S_0 < 0.55$
 $a = 0.30$ for $S/S_0 > 0.55$

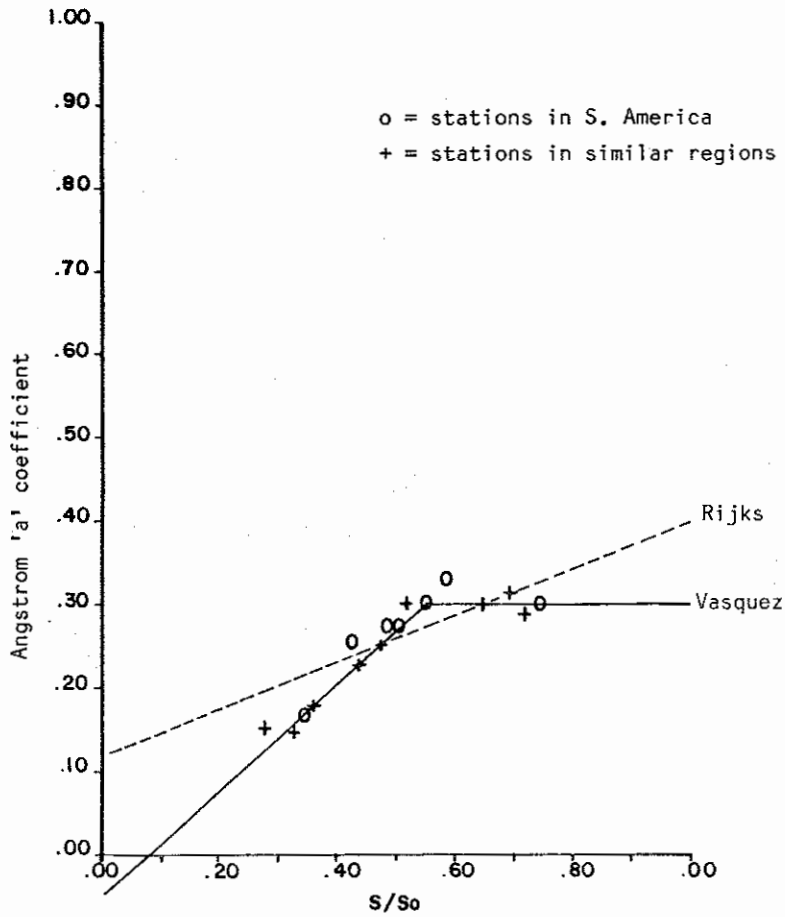


FIGURE 1 A

Prediction of 'a' coefficient from annual sunshine duration
 Vasquez' two-piece linear fit, and Rijks' line

Vasquez' fit:
 $b = 0.933 - 1.040 (S/S_0)$ for $S/S_0 < 0.55$
 $b = 0.413$ for $S/S_0 > 0.55$

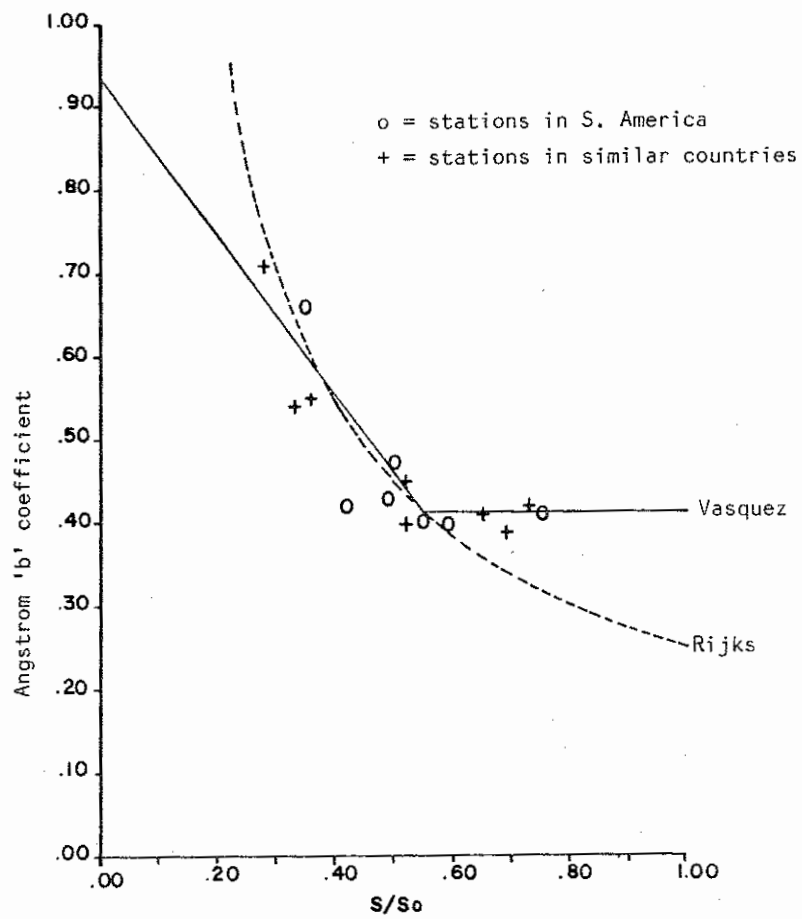


FIGURE 1 B

Prediction of 'b' coefficient from annual sunshine duration
 Vasquez' two-piece linear fit, and Rijks' hyperbola

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR
DE SAN MARCOS,
LIMA
UNIVERSITY COLLEGE, CARDIFF,
WALES, G. BRITAIN
JULY 29th 1966
BY: J. W. YASQUEZ & P. LLOYD

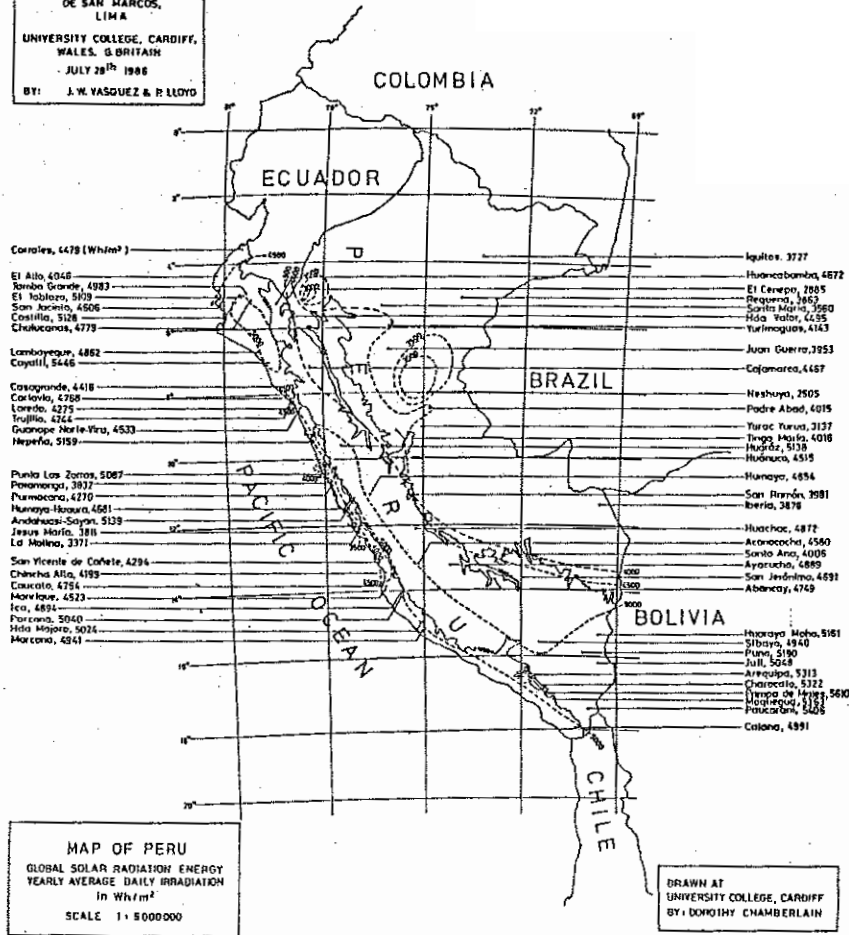


FIGURE 2

TABLE 1: YEARLY AVERAGE OF THE DAILY SOLAR RADIATION IN PERU

J. V. VARDOLAKIS - P. STAFFS UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCO, LIMA, PERU UNIVERSITY COLLEGE CARDIFF, WALES, GREAT BRITAIN						ANNUAL SOLAR CONSTANT		DAILY IRRADIATION IN kWh/m ²												YEARLY AVERAGE OF THE DAILY IRRADIATION IN kWh/m ²	
DEPARTMENTS	PROVINCES	DISTRICTS OR SITES	LAT °S	LONG °W	ALT m	A	B	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC		
TUMBE	TUMBE	CONALES	3.6	80.5	85	0.74	0.46	4.618	4.864	5.111	4.903	4.487	4.021	3.836	3.926	4.222	4.252	4.603	4.908		4.479
PIURA	TAJAMA	EL ALTO	4.3	81.2	270	0.20	0.52	4.531	4.615	4.513	4.085	3.876	3.433	3.486	3.682	3.913	3.991	4.039	4.290		4.046
PIURA	PIURA	TARPO GRANDE	4.7	80.3	201	0.30	0.36	4.970	5.049	4.615	4.816	4.614	4.470	4.565	4.932	5.496	5.664	5.525	5.175		4.983
PIURA	PIURA	EL TAGLADO	4.9	80.5	147	0.30	0.36	5.205	5.443	5.050	5.134	4.832	4.256	4.290	5.039	5.345	5.603	5.467	5.469		5.109
PIURA	PIURA	SAN JACINTO	4.9	80.9	102	0.26	0.42	4.661	4.459	4.868	4.620	4.608	3.916	4.157	4.668	5.070	4.916	4.659	5.202		4.648
PIURA	HONGONCH	CIRILICANIAS	5.1	80.1	110	0.28	0.39	4.268	5.760	4.522	4.709	4.487	3.630	4.126	4.878	5.509	5.583	5.106			4.779
PIURA	PIURA	CASTILLA	5.2	80.6	30	0.27	0.41	5.269	5.336	5.396	5.188	4.836	4.292	4.420	4.945	5.402	5.542	5.430	5.478		5.128
PIURA	HUACABANDA	HUACABANDA	5.2	76.5	1157	0.27	0.41	4.607	4.757	4.498	4.743	4.433	4.154	4.434	5.045	5.132	4.949	4.395	4.938		4.672
LAMBAYEQUE	LAMBAYEQUE	LAMBAYEQUE	6.7	79.9	18	0.29	0.38	5.444	5.417	5.200	5.015	4.568	3.903	3.844	4.320	4.901	5.008	5.259	5.347		4.862
LAMBAYEQUE	CHICLAYO	CAYALTI	7.1	79.6	150	0.30	0.16	5.897	5.918	5.501	5.449	5.023	4.442	4.475	4.885	5.568	5.848	6.130	6.311		5.466
LA LIBERTAD	ASCOPE	CASAGRANDE	7.2	79.2	154	0.24	0.46	4.811	5.133	4.659	4.450	4.479	3.430	3.750	4.057	4.060	4.731	4.865	5.064		4.416
LA LIBERTAD	ASCOPE	CARYAVI	7.9	79.2	51	0.20	0.40	4.981	6.056	5.014	4.616	4.800	3.824	3.561	4.361	4.308	4.918	5.108	5.474		4.760
LA LIBERTAD	TRUJILLO	LARGO	8.1	78.9	100	0.22	0.40	4.640	4.753	4.634	4.560	3.972	3.208	3.389	3.546	4.150	4.518	4.827	4.927		4.275
LA LIBERTAD	TRUJILLO	TRUJILLO	8.1	79.0	30	0.32	0.40	5.340	5.042	5.034	4.702	4.465	3.649	3.794	4.054	4.494	5.075	5.511	5.764		4.744
LA LIBERTAD	TRUJILLO	QUANPE NORTE VINO	8.4	78.8	30	0.25	0.44	5.416	6.147	5.056	4.692	4.511	3.937	3.401		3.750	4.778	4.565	2.590		4.533
ANCASH	BAIFA	HEPENA	9.2	78.4	203	0.17	0.66	5.529	6.391	5.877	5.304	5.450	3.485	3.890	4.617	4.474	5.460	5.710	5.721		5.159
ANCASH	HUARAZ	HUARAZ	9.5	77.5	3090	0.30	0.36	5.164	5.032	5.019	5.009	4.944	4.729	4.889	5.265	5.198	5.396	4.550	5.241		5.138
ANCASH	HUAMAY	PUNTA LAS ZUMBAS	10.3	78.1	160	0.30	0.36	5.006	6.148	4.040	5.519	5.206	3.451	3.449	4.149	4.181	5.175	6.096	6.287		5.087
LIMA	HUANCA	PARANANCA	10.7	77.8	15	0.18	0.55	5.313	4.395	5.092	4.700	2.699	1.945	2.281	2.098	2.720	4.294	4.928	5.516		4.832
LIMA	CHANKAY	PUNHACANA	10.8	77.8	170	0.22	0.48	5.401	5.121	5.192	4.909	3.857	2.673	2.836	3.108	3.789	4.375	5.060	4.837		4.270
LIMA	CHANKAY	ANHUASIS- BATAI	11.1	77.2	500	0.30	0.36	5.128	5.119	5.027	5.248	4.858	4.330	4.308	4.943	5.417	5.992	5.477	5.647		5.139
LIMA	CHANKAY	HIMATA- IHUWA	11.1	77.0	350	0.27	0.41	5.224	5.091	4.893	5.103	4.401	3.555	3.425	3.866	4.098	5.335	5.349	5.831		4.681
LIMA	LIMA	JESUS MARIA	12.1	77.0	100	0.18	0.55	5.514	5.337	5.207	5.033	3.557	2.294	2.046	2.239	2.436	3.307	3.969	4.784		3.811
LIMA	LIMA	LA MOLINA	12.1	76.8	150	0.15	0.60	4.191	4.927	4.241	4.389	3.737	2.267	1.960	2.055	2.311	2.808	3.146	4.208		3.371
LIMA	CANCHE	SAN VICENTE DE CANCHE	13.1	76.3	113	0.30	0.43	4.959	5.326	5.059	4.664	4.373	3.886	2.574	3.319	3.866	4.713	4.730	5.253		4.294
ICA	CHICHUA	CHICHUA ALTA	13.4	76.1	94	0.22	0.49	5.303	4.707	4.993	4.955	3.540	2.748	3.608	3.235	3.859	4.849	4.580	4.911		4.189
ICA	ICA	CANCAYO	13.7	76.2	35	0.29	0.48	5.760	5.861	5.428	5.028	4.289	3.569	3.239	3.574	4.183	5.128	5.121	5.448		4.750

J. H. VASQUEZ - P. LLOYD UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS, LIMA, PERU. UNIVERSITY COLLEGE CARDIFF, WALE, GREAT BRITAIN					ANGSTROM COEFFI- CIENTS		DAILY IRRADIATION in kWh/m ²												YEARLY AVERAGE OF THE DAILY IRRADIATION in kWh/m ²	
DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRICTO O SITE	LAT °S	LONG °W	ALT m	a	b	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
ICA	ICA	MANGUQUE	11.7	76.0	410	0.24	0.43	5.289	5.250	5.145	4.356	4.069	3.256	3.320	3.545	4.241	5.040	5.411	5.039	4.573
ICA	ICA	ICA	14.0	75.7	390	0.30	0.36	5.072	4.812	4.874	5.172	4.245	4.140	3.975	4.425	4.975	5.897	5.654	5.504	4.894
ICA	ICA	PANCONA	14.1	75.7	389	0.30	0.36	5.372	5.142	5.235	5.171	4.469	3.897	3.896	4.530	5.052	5.756	5.927	5.849	5.040
ICA	NAJCA	SEA. NAJCA	14.8	75.0	010	0.30	0.36	5.328	5.632	5.571	4.816	4.458	3.753	3.632	4.407	5.078	5.869	5.957	5.484	5.074
ICA	NAJCA	NAJCONA	15.1	75.0	620	0.30	0.36	5.425	5.109	5.150	4.932	4.347	3.762	3.756	4.300	5.063	5.839	5.835	5.696	4.941
AREQUIPA	CAJALLMA	SIBAYO	19.5	71.5	3847	0.30	0.36	4.968	4.356	5.010	5.143	4.317	4.072	2.959	4.818	5.150	5.575	5.817	5.985	4.940
AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	16.3	71.5	2150	0.30	0.36	5.442	5.125	5.030	5.164	4.254	4.357	4.468	5.148	5.704	6.140	6.475	6.117	5.711
AREQUIPA	AREQUIPA	CHINACATO	16.4	71.5	2451	0.30	0.36	5.186	4.948	5.198	5.057	4.645	4.426	4.570	5.173	5.711	6.581	6.503	6.862	5.322
AREQUIPA	AREQUIPA	PANZA DE MUJER	16.5	72.2	1940	0.30	0.36	5.840	5.525	5.699	5.434	4.673	4.940	4.816	5.289	5.837	6.669	6.605	6.372	5.610
AYACUCHO	HUANUCO	MOYUSCA	17.2	70.8	1412	0.30	0.36	5.486	5.304	5.285	5.205	4.562	4.265	4.429	5.245	5.894	6.250	6.593	6.294	5.363
AYACUCHO	AYACUCHO	AYACUCHO	17.5	69.8	4541	0.30	0.36	5.146	5.251	5.041	5.001	4.808	4.716	4.762	5.496	5.839	6.238	6.144	5.623	5.606
AYACUCHO	AYACUCHO	AYACUCHO	17.9	70.2	075	0.30	0.36	5.622	5.507	5.216	4.817	4.206	3.793	3.951	4.364	4.872	5.680	5.966	5.884	4.901
CAJAMARCA	CAJAMARCA	CAJAMARCA	7.1	78.5	2440	0.25	0.45	4.475	4.445	4.257	4.160	4.197	4.077	4.770	4.505	4.426	4.647	4.830	4.734	4.467
HUANUCO	HUANUCO	HUANUCO	9.1	76.0	640	0.30	0.52	3.822	3.838	3.783	3.783	3.733	3.613	3.872	4.886	4.450	4.510	4.309	3.911	4.016
HUANUCO	HUANUCO	HUANUCO	9.0	76.2	1895	0.30	0.51	4.450	4.298	4.388	4.350	4.141	4.201	4.353	4.682	4.694	4.855	4.876	4.658	4.111
JUNIN	CHUSIMAYO	CHUSIMAYO	11.1	77.0	-1.0	0.27	0.41	5.059	5.138	5.301	4.715	4.591	3.872	3.678	4.323	4.228	5.018	6.942	5.296	4.654
JUNIN	CHUSIMAYO	SAN ANTON	11.1	78.3	800	0.30	0.52	3.782	3.519	3.721	3.747	3.743	3.780	4.054	4.303	4.112	4.307	4.378	4.223	3.981
JUNIN	CHUSIMAYO	CHUSIMAYO	12.0	78.6	3250	0.30	0.36	4.998	4.931	4.660	4.696	4.593	4.391	4.536	4.809	4.994	5.270	5.428	5.157	4.872
HUANUCO	HUANUCO	HUANUCO	13.1	75.2	4520	0.27	0.41	4.857	3.976	4.147	4.291	4.221	4.624	4.322	4.595	4.945	4.850	5.251	4.874	4.500
AYACUCHO	AYACUCHO	AYACUCHO	13.2	74.2	3760	0.30	0.35	5.144	5.080	4.735	4.654	4.594	4.201	4.219	4.677	5.033	5.443	5.671	5.324	4.899
AYACUCHO	AYACUCHO	AYACUCHO	13.6	72.9	3278	0.29	0.37	4.796	4.724	4.681	4.625	4.380	4.116	4.230	4.653	4.964	5.494	5.375	5.925	4.749
CUSCO	LA CONDESA	LA CONDESA	12.0	72.7	920	0.31	0.51	3.993	3.972	3.950	3.792	3.943	3.810	3.921	4.046	4.149	4.268	4.290	4.915	4.006
CUSCO	CUSCO	SAN JERONIMO	13.6	71.0	3220	0.29	0.38	4.647	4.545	4.583	4.585	4.383	4.271	4.424	4.633	4.852	5.201	5.164	4.836	4.691
PUÑO	PUÑO	PUÑO	15.8	70.0	3875	0.30	0.36	5.544	5.314	4.881	4.759	5.003	4.744	4.698	5.260	5.512	5.332	5.267	5.856	5.161
PUÑO	PUÑO	PUÑO	15.8	70.0	3875	0.30	0.36	5.306	5.283	5.078	5.021	4.839	4.380	4.957	5.015	5.504	5.975	5.965	5.571	5.190
PUÑO	PUÑO	PUÑO	16.2	69.4	3853	0.30	0.36	4.487	4.719	5.652	4.785	4.932	4.695	-	4.966	5.642	5.839	5.310	5.390	5.048
AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	16.1	78.4	240	0.18	0.44	2.471	2.517	2.685	2.726	2.681	2.849	3.804	3.206	3.131	3.727	3.227	2.701	2.885
AREQUIPA	AREQUIPA	AREQUIPA	16.7	78.6	421	0.25	0.45	4.102	4.181	4.410	4.444	4.082	4.180	4.108	4.649	4.780	4.901	5.201	4.808	4.493

J. W. VASQUEZ UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARCOS, LIMA, PERU UNIVERSITY COLLEGE CARDIFF, WALES, GREAT BRITAIN				ANGSTROM COEFFI- CIENTS		DAILY IRRADIATION in kWh/m ²												YEARLY AVERAGE OF THE DAILY IRRADIATION in kWh/m ²			
DEPARTMENTS	PROVINCES	DISTRICTS	#	LAT °N	LONG °W	ALT m	a	b	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
SAN MARTIN	SAN MARTIN	JUAN GUERRA	1	6	76.4	330	0.20	0.53	3.925	4.037	3.798	3.415	3.691	3.608	4.920	4.242	4.211	4.256	4.212	4.115	3.953
LORETO	MAYNAS	IQUITOS	1	6	71.3	125	0.18	0.56	3.339	3.667	3.500	3.710	3.964	3.138	4.497	4.195	4.726	3.792	4.206	3.794	3.727
LORETO	REQUENA	REQUENA	5	0	71.6	180	0.19	0.54	3.907	3.995	3.668	3.552	3.378	3.351	4.717	4.182	4.265	4.443	4.115	3.814	3.863
LORETO	ALTO AMAZONAS	SANTA MARIA	5	1	76.1	179	0.17	0.58	3.335	3.239	2.817	2.860	3.271	3.150	4.403	4.323	4.165	4.402	3.844	3.318	3.560
LORETO	ALTO AMAZONAS	KURIMINGIAS	5	9	76.1	185	0.21	0.50	4.041	3.978	3.766	3.892	3.981	3.941	4.104	4.600	4.548	4.431	4.286	4.150	4.143
LORETO	UCAYALI	NESHUYA	8	0	75.1	340	0.10	0.69	2.180	2.014	2.108	2.154	2.067	2.327	2.729	3.557	3.327	2.816	2.548	2.221	2.505
UCAYALI	PADRE ABAD	PADRE ABAD	8	5	74.8	270	0.20	0.52	3.987	3.862	3.758	3.545	3.675	3.480	3.974	4.556	4.577	4.512	4.172	4.101	4.015
UCAYALI	ATALAYA	YURAC-YURIA	9	0	75.0	-1.0	0.14	0.63	2.550	2.593	2.726	2.651	2.738	3.041	3.327	3.819	4.046	3.539	3.437	3.175	3.137
MADRE DE DIEU	TARUMAHU	IBERIA	11	4	69.6	350	0.20	0.51	3.746	3.736	3.706	3.713	3.471	3.509	3.819	4.263	4.322	4.087	4.232	3.908	3.874