

APÉNDICE C

Este apéndice realiza una breve descripción de las estaciones meteorológicas del IDEAM, la instrumentación utilizada y sus métodos de calibración en el caso particular de la radiación solar. Muestra también algunos de los modelos utilizados para la estimación de la radiación solar y sus componentes directa y difusa sobre una superficie horizontal, con un ejemplo de aplicación a superficies inclinadas.

3. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

3.1. Instrumentos de medida

La radiación solar posee un amplio espectro que se puede clasificar en tres rangos ultravioleta para longitudes de onda desde 0,3 a 0,4 μm , visible desde 0,4 a 0,7 μm e infrarrojo en el intervalo de 0,7 a 5 μm . Los instrumentos de radiación solar miden la potencia incidente por unidad de superficie, integrando la energía de las diferentes longitudes de la onda.

Los diversos flujos de radiación inciden y se emiten en la superficie terrestre se miden con instrumentos de la Organización Mundial de Meteorología, OMM. Estos instrumentos se clasifican de acuerdo con el tipo de componente radiométrico que miden, el campo de visión, la respuesta espectral y el tipo de uso que se les asigne. En la Tabla 3.1 se muestran los principales tipos de instrumentos.

Tabla 3.1
Tipo de Instrumentos de Medida de la Radiación Solar

Tipo de Instrumento	Parámetro de Medida	Empleo Principal	Ángulo de Visión (sr)
Pirheliómetro absoluto	Radiación directa	Patrón primario	5×10^{-3}
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa	i) Patrón secundario para calibración ii) Red de medidas	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas	Red de medidas	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	i) Patrón de calibración ii) Red de medidas	1×10^{-3} a 1×10^{-2}
Piranómetro	i) Radiación global, ii) Radiación celeste, iii) Radiación solar reflejada	i) Patrón secundario ii) Red de medidas	2π
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha	Red de medidas	2π
Pirgeómetro	Radiación de onda larga descendente y ascendente	Red de medidas	2π

3.2. Medida de la radiación solar directa

La radiación solar directa se mide por medio de pirheliómetros, instrumentos cuya superficie receptora se dispone perpendicularmente a los rayos solares incidentes. Hay varios tipos de instrumentos que la OMM clasifica como patrones primarios y secundarios. A continuación se describen los dos tipos de pirheliómetros.

3.2.1. Pirheliómetro de cavidad absoluta

El instrumento posee dos cavidades cónicas idénticas: una externa, que se calienta al estar expuesta a la radiación solar, mientras la otra cavidad, oculta en el interior del instrumento, se calienta utilizando energía eléctrica hasta obtener una temperatura igual a la cavidad externa, asignándose el valor de la energía eléctrica consumida como el valor de la radiación solar incidente.

Tabla 3.2
Características de Pirheliómetros absolutos

Sigla	Tipo de cavidad	Sensor de temperatura	Diseñador
ACR	Cono de 30°	Resistencias de platino	R. C. Wilson, JPL USA
CROM	Cilindro	Termopila	D. Crommlynck, IRM Bélgica
PACRAD	Cilindro/cono	Termopila	J. Kendall, JPL USA
PMO	Cono invertido	Resistencia de cobre en diseño reciente	R. W. Brusa y C. Fröhlich WRC, Davos

La Tabla 3.2 presenta las características de los pirheliómetros absolutos.

La Figura 3.1 presenta el pirheliómetro de cavidad absoluta, el PMO6; corresponde al modelo patrón nacional de que dispone el IDEAM. Un

pirheliómetro de cavidad absoluta puede definir la escala de irradiación total sin acudir a instrumentos de referencia. Recientes investigaciones para el desarrollo de este tipo de instrumentos se orientan al uso de materiales superconductores con prototipos que mejoran la sensibilidad hasta en un orden de magnitud.



Figura 3.1. Pirheliómetro de cavidad absoluta PMO6

3.2.2. Pirheliómetros secundarios

Son instrumentos que miden la radiación solar; se calibran por intercomparación con un pirheliómetro de

cavidad absoluta. Se agrupan en patrón secundario, de primera y segunda clase, de acuerdo con los criterios expresados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3
Clasificación y características de los Pirheliómetros

Características	Patrón secundario	1ª clase	2ª clase
Sensibilidad (Wm^{-2})	$\pm 0,5$	± 1	± 5
Estabilidad (cambio % a escala completa al año)	$\pm 0,5$	± 1	± 2
Temperatura (cambio % en un intervalo de 50 K)	± 1	± 2	± 10
Selectividad (%)	$\pm 0,5$	± 1	± 5
Linearidad (%)	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 2
Respuesta coseno (%)	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 2
Constante de tiempo	<15s	<20s	<30s
Calibración	Pirheliómetro estándar primario	Pirheliómetro estándar secundario	Pirheliómetro estándar secundario

Uno de los varios diseños existentes en el mundo es el pirheliómetro Eppley de incidencia normal, de la Figura 3.2, que posee un sensor de termopila compensada de bismuto-plata con 15 juntas y un tiempo de respuesta de aproximadamente 20 s. Este instrumento

requiere un dispositivo que le permita seguir el movimiento del Sol durante su tránsito diurno por el cielo. Este pirheliómetro es muy estable y puede emplearse como patrón secundario para calibrar otros instrumentos. En Colombia se emplea, aunque no es de uso generalizado ni permanente.



Figura 3.2. Pirheliómetro Eppley de incidencia normal (montado sobre un seguidor del Sol)

3.3. Medición de la radiación solar difusa

Las mediciones de la radiación difusa se realizan con piranómetros cuyo sensor es sombreado por una banda o disco, de manera que no deja pasar radiación solar directa. El más tradicional utiliza la banda de sombra

en forma de aro o semiarco, puesto de acuerdo con la declinación del Sol y la latitud del lugar. De esta manera, el sensor se protegerá de la radiación directa durante el día. La Figura 3.3 ilustra uno de ellos.



Figura 3.3. Piranómetro con banda de sombra para la medición radiación difusa

El costo de la banda de la sombra es relativamente bajo y su ensamble es simple. Sin embargo, debido a que la banda también bloquea parte de la propia radiación difusa, es necesaria la corrección de las lecturas en un rango entre 5 y 25%, dependiendo de las dimensiones geométricas de la banda, la latitud, la época del año, la turbidez atmosférica, el grado de nubosidad, el albedo de las superficies vecinas y de la reflectividad de la superficie interna de la banda.

3.4. Medidas de radiación global, difusa y reflejada

Las definiciones de radiación global, difusa y reflejada se pueden consultar en el Apéndice B; para su medición, se utilizan instrumentos más sencillos que los

ilustrados anteriormente. A continuación se describen algunos usados en Colombia.

3.4.1. Piranómetros

Los piranómetros son instrumentos cuyo sensor termoelectrico o termopila, protegido por una cúpula de vidrio, convierte la radiación solar en una señal eléctrica de voltaje. Son clasificados por la ISO 9060 en piranómetros patrones secundarios, de primera y segunda clase, cuyas características se muestran en la Tabla 3.4. Un ejemplo de piranómetro de primera clase es el Blanco y Negro Eppley de la Figura 3.4. Otro ejemplo de patrón secundario es el espectral de precisión Eppley (PSP) de la Figura 3.5.

Tabla 3.4
Clasificación y características de los Piranómetros

Características	Patrón secundario	1ª clase	2ª clase
Sensibilidad (W/m ²)	± 1	± 5	± 10
Estabilidad (% año)	± 0,8	± 1,8	± 3
Temperatura (%)	± 2	± 4	± 8
Selectividad (%)	± 2	± 5	± 10
Linealidad (%)	± 0,5	± 1	± 3
Constante de tiempo	< 15s	< 30s	< 60s
Respuesta coseno (%)	± 0,5	± 2	± 5



Figura 3.4. Piranómetro Blanco y Negro Eppley (BWP)



Figura 3.5. Piranómetro espectral de precisión Eppley (PSP)

3.4.2. Actinógrafo

El actinógrafo es un instrumento que funciona mediante un sensor termomecánico, protegido por una cúpula de vidrio, conformado por un arreglo bimetalico de dos superficies, una pintada de negro y la otra blanca, el cual registra los valores de la radiación solar incidente mediante el trazo de una gráfica en un tambor movido por un mecanismo de reloj.

La precisión de los valores de la radiación global que se obtienen con este instrumento es del orden de $\pm 8\%$. Estos instrumentos requieren una calibración con un patrón secundario una vez por año. La Figura 3.6 ilustra un actinógrafo Fuess utilizado en Colombia por el IDEAM. Es de anotar que otras instituciones regionales, como CENICAFÉ, disponen de actinógrafos Belfor con precisiones de $\pm 6\%$.



Figura 3.6 Actinógrafo Fuess

3.4.3. El solarímetro (heliógrafo)

La Figura 3.7 ilustra el heliógrafo Campbell-Stokes, muy utilizado en Colombia. Este instrumento tiene por objeto medir la duración de la insolación diaria. Registra los periodos de tiempo de radiación solar directa que superan un valor mínimo. Opera focalizando la radiación solar mediante una esfera de vidrio a manera de lente convergente, en una cinta con escala de horas, que, como resultado de la exposición a la radiación

solar directa, se quema formando líneas cuya longitud determina el número de horas de brillo del Sol.

En localidades donde no se mida directamente la radiación solar global, es posible obtenerla a partir de los valores de horas de brillo solar, mediante un modelo de regresión lineal simple llamado Ångström Modificado. El modelo se aplica a estaciones de brillo solar de la misma zona geográfica donde se mida simultáneamente radiación y brillo solar.



Figura 3.7. Solarímetro Campbell-Stokes

3.5. Calibración de instrumentos

La calibración de instrumentos es necesaria para tener referencias de comparación entre mediciones realizadas en las diferentes regiones de la Tierra, mediante metodologías acordadas con la OMM y Centro Mundial de Radiación Solar de Davos, Suiza, ajustando pirheliómetros, piranómetros y actinógrafos a la referencia mundial de radiación solar.

Calibrar un instrumento consiste en determinar su factor K que ajuste sus datos medidos con los obtenidos de un instrumento patrón. En Colombia, el patrón nacional es calibrado cada cinco años con el patrón mundial. A su vez, con el patrón nacional calibrado se procede a calibrar los instrumentos de la red radiométrica del país.

Colombia ha participado en dos intercomparaciones de pirheliómetros patrones nacionales de Suramérica, que la OMM ha realizado en el Centro de Física de la Atmósfera en Buenos Aires, Argentina, y recientemente en el Centro Mundial de Radiación en Davos, Suiza, con el nuevo instrumento de Cavidad Absoluta, el PMO6 de la Figura 3.1.

3.5.1. Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR)

La Referencia Radiométrica Mundial de radiación solar mantiene la homogeneidad en tiempo y espacio de medidas de radiación solar en el mundo; permanece en el Centro Mundial de Radiación Solar en Davos, Suiza, y se determina utilizando mínimo cuatro pirheliómetros de cavidad absoluta, aunque ocasionalmente se utilizan seis, que conforman el grupo patrón mundial (World Standard Group, WSG).

Para las medidas de radiación solar que se efectúan en cualquier país, la Organización Mundial de Meteorología (OMM) facilita metodologías de calibración y el traslado a los diferentes continentes de uno de los pirheliómetros del grupo WSG, para realizar trabajos regionales de intercomparación y calibración de los radiómetros patrones nacionales.

3.5.2. Calibración de pirheliómetros

Los pirheliómetros absolutos pueden servir de referencia como patrón secundario. Aunque poseen un meca-

nismo de autocalibración, necesitan un factor de comparación con el valor de la referencia mundial, que se obtiene cada cinco años con el grupo WSG. Todos los demás pirheliómetros necesitan ser calibrados; el método más usado es comparando con un pirheliómetro patrón secundario usando como fuente de radiación el Sol.

Los instrumentos de medida de radiación de primera y segunda clase se calibran con un patrón secundario. Los pirheliómetros de primera y segunda clase se deben calibrar cada uno o dos años, durante días muy claros y estables, de preferencia en estaciones de gran altura.

La calibración de pirheliómetros, se efectúa intercomparando la potencia radiante (W/m^2) medida con el instrumento patrón nacional y la respuesta en milivoltios de la termopila del pirheliómetro por calibrar, teniendo el Sol como fuente de energía, en un día completamente despejado, efectuando lecturas simultáneas a intervalos de 90 segundos y en series agrupadas de 18 minutos, obteniéndose entre 6 y 12 valores de irradiancia según la clase de pirheliómetro.

La constante K del instrumento se determina graficando los resultados del conjunto de observaciones realizadas mediante un ajuste lineal que pasa por el origen.

$$I = K v \quad (3-1)$$

donde I es la potencia radiante incidente medida por el patrón nacional y v es el voltaje medido por el pirheliómetro.

3.5.3. Calibración de piranómetros

La calibración de los piranómetros consiste en determinar un factor K de ajuste entre las mediciones en milivoltios de la termopila del piranómetro y el dato de radiación medido con el pirheliómetro patrón, teniendo el Sol como fuente de energía, se efectúan 12 medidas simultáneas en serie con intervalos de 90 segundos. Las cuatro primeras lecturas y las últimas cuatro se toman con el piranómetro destapado; las cuatro intermedias se toman sombreando el piranómetro. De esta forma, la componente solar directa que recibe el piranómetro queda establecida de la siguiente manera:

$$I \sin h = K \Delta v \quad (3-2)$$

donde:

I = Irradiancia en W/m^2 , medida con el pirheliómetro.

h = Altura del Sol en el momento de la observación.

Δv = Diferencia de voltaje entre lectura tapada y destapada, obtenida con el piranómetro por calibrar.

Finalmente, con la serie de observaciones se determina K por el ajuste lineal que pase por el origen.

3.5.4 Calibración de actinógrafos

El actinógrafo es un instrumento termomecánico de alta inercia (Figura 3.6). Para su calibración se compara en centímetros cuadrados el área bajo la curva (una curva típica del trazado de un actinógrafo se ilustra en la gráfica de la Figura 3.8) con el valor de la radiación solar

diaria, medido por el instrumento patrón nacional. Luego de medir valores simultáneos durante varios días continuos para obtener los datos de radiación solar global diaria, se realiza una regresión lineal entre las áreas medidas y radiaciones medidas representada en la ecuación (3.3).

$$H = K A \quad (3-3)$$

donde:

H = Radiación solar global diaria medida con el equipo patrón nacional (piranómetro-integrador).

A = Área bajo la curva de la gráfica del actinógrafo para el día de la observación.

K = Constante de calibración del actinógrafo, con la cual se convierte el área en unidades de radiación.

La constante K se determina por el ajuste lineal que pasa por el origen de la serie de observaciones.

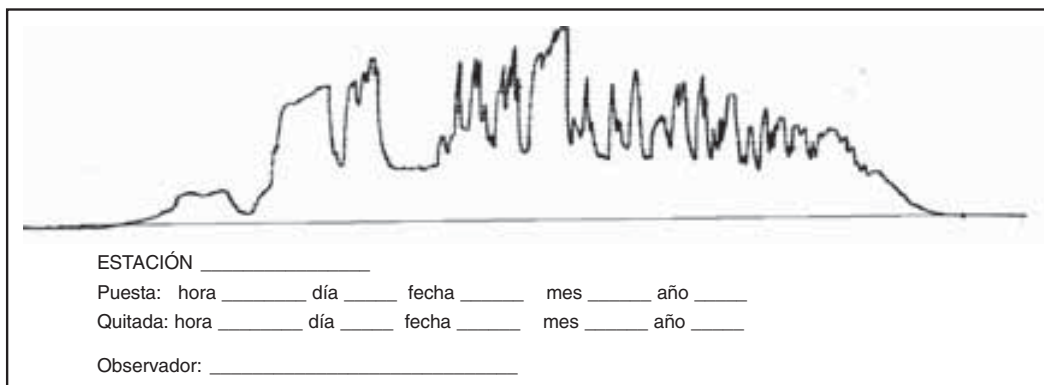


Figura 3.8. Gráfica típica de un actinógrafo, durante un día con nubosidad leve y variable

3.6. Estación meteorológica

Una estación meteorológica es un lugar de observación y medición sobre la superficie, mediante instrumentos que miden la radiación solar, el viento, la humedad, la precipitación, la temperatura, la presión atmosférica, entre otras variables meteorológicas. Me-

dante el estudio de estas variables es posible establecer el comportamiento atmosférico de la zona donde se encuentra la estación. La Figura 3.9 muestra una estación típica del IDEAM. En Colombia se cuenta con cerca de 1.000 estaciones localizadas a diferentes alturas a lo largo y ancho del territorio.



Fig. 3.9. Estación meteorológica

Los principales instrumentos instalados en las estaciones son: actinógrafos, registradores Campbell-Stokes, pluviógrafos, higrotermógrafos, geotermógrafos, termómetros de máxima y mínima, anemógrafos y tanque de evaporación. Actualmente el IDEAM se encuentra realizando la instalación de 200 estaciones nuevas con piranómetros, lo cual permitirá mejorar la calidad y confiabilidad de los datos de radiación solar.

Algunos aspectos operacionales para tener en cuenta para la instalación de instrumentos solarimétricos en las estaciones son: tomar precauciones en la instalación evitando obstrucciones sobre el horizonte, como objetos próximos que puedan ocasionar sombras o altas de reflectividades sobre el instrumento, e igualmente inspeccionar periódicamente los instrumentos, y elementos empleados para la medición y adquisición de datos.

3.7. Estimación de la radiación solar

3.7.1. Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales

Las mediciones directas de la radiación solar son la mejor fuente de información; sin embargo, debido a

los costos de la instrumentación y de su operación y mantenimiento, son pocos los instrumentos con que se cuenta en el país, por lo que se utilizan mediciones del brillo solar más simples y económicas de mantener. Varios investigadores han desarrollado modelos empleando datos climatológicos, como: temperatura, humedad relativa, nubosidad, pluviosidad y horas de brillo solar, con los cuales es posible calcular la radiación solar global, la radiación difusa y directa incidente sobre la superficie horizontal de la Tierra.

Una de las primeras expresiones desarrolladas fue la regresión de Ångström (1924) que relaciona la radiación solar promedio diaria mensual para días claros y la radiación para un lugar dado con el promedio de la fracción de las horas de brillo solar medidas y la duración teórica del día; esta es:

$$\frac{\bar{H}}{Hc} = a' + b' \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-4)$$

donde para en un periodo de toma de datos:

\bar{H} = Radiación promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal

Hc = Radiación promedio diaria para días claros para el lugar y la fecha dados.

a' y b' = Constantes empíricas

n = Número de horas de brillo solar promedio diario mensual.

N = Promedio diario mensual del máximo número de horas posible de brillo solar (duración del día promedio del mes).

Una dificultad básica de esta ecuación está en la incertidumbre con que se determine H_c para un día claro.

Page (1964) y otros, han modificado la ecuación para reemplazar la radiación de un día claro por la radiación incidente sobre una superficie horizontal en el límite superior de la atmósfera; es decir:

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = \left(a + b \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-5)$$

donde H_0 es la radiación solar fuera de la atmósfera para la misma localización, promediada sobre el mismo período de tiempo. El término $\frac{\bar{H}}{H_0}$ es conocido como el índice de claridad K_t ; es decir:

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = K_t \quad (3-5a)$$

Bennett (1965) mediante las ecuaciones anteriores estimó los coeficientes a y b de estaciones en Canadá para junio y diciembre, respectivamente:

$$H = H_0 \left(311,6 + 4,94 \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-6)$$

$$H = H_0 \left(194,8 + 7,85 \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-7)$$

para los Estados Unidos, propuso:

$$H = H_0 \left(A + B \frac{\bar{n}}{N} + C h \right) \quad (3-8)$$

donde:

H_0 = 1,98 langley/minuto (1 langley = 1 cal/cm²)

A = varía de 188 en abril a 291 en agosto

B = varía de 5,574 en abril a 3,768 en agosto

C = varía de 0,0130 en julio a 0,0226 en diciembre

h = elevación de la estación en pies

e introdujo el valor promedio diario mensual de nubosidad Cd mediante la siguiente ecuación:

$$H = H_0 \left(A + B \left(\left(1 - Cd + \frac{\bar{n}}{N} \right) / 2 \right) \right) \quad (3-9)$$

A y B = constantes

En 1966 Swartman y Ogulande introdujeron la humedad relativa (R) en tres diferentes ecuaciones:

$$H = 490 D^{0,357} R^{0,262} \quad (3-10)$$

$$H = 460 e^{0,607(D-R)} \quad (3-11)$$

$$H = 464 + 265 D - 248 R \quad (3-12)$$

donde:

D = número de horas de brillo solar dividido entre 12.

Masson (1966) encontró una relación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal (en langley por día) y el número de horas de brillo solar (n). El resultado fue expresado como:

$$H = 60 + (1406,2 n^2 + 7426,6 n)^{1/2} \quad (3-13)$$

En 1971 Reddy propuso una compleja ecuación mediante la cual estima la radiación solar total diaria en la superficie de la Tierra en cal/cm²/día:

$$H = K \left(1 + 0,8 \frac{\bar{n}}{N} \right) (1 - 0,2J) / R \quad (3-14)$$

donde:

$$K = (\lambda N + \psi_{ij} \cos\phi) 10^2 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$$

$\phi =$ Latitud del lugar en grados

$$J = \frac{\text{días lluviosos del mes}}{\text{días del mes}}$$

$R =$ Humedad Relativa

$\psi_{ij} =$ Factor Estacional ($i = 1,2,3; j = 1,2,3,\dots,12$)

donde:

$i =$ 1-Estaciones continentales, 2-Estaciones costeras, 3-Estaciones en montaña

$j =$ Se refiere al mes de enero, febrero...

$N =$ Ecuación (1-10) del apéndice A

El mismo Reddy propuso otra ecuación, un poco más sencilla que incluye la temperatura del aire:

$$H = K(0,6 + 0,02 \frac{\bar{n}}{N} - 0,04 \sqrt{R}) - R(4,3 - \sqrt{tm}) \quad (3-15)$$

$tm =$ Temperatura promedio diaria del aire.

Majundar *et al.* (1972) derivaron una ecuación para días claros y poca contaminación de gases y partículas. La fórmula relaciona la radiación solar con la masa de aire y el coeficiente de transmisión del vapor de agua; es decir:

$$(3-16)$$

donde:

$H_o =$ Es la intensidad de la radiación efectiva en la parte superior de la troposfera (1,91 langley/min).

$TW =$ Es el coeficiente de transmisión del vapor de agua.

$mr =$ Es la masa relativa de aire.

$=$ Es el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

Sabbagh *et al.* (1975) probaron una fórmula en varias localidades. La fórmula en dos formas fue:

$$1 \exp \phi^{1/3} / (1 - 1/T_{\text{máx}}) \quad (3-17)$$

$$H = 1,53 K \exp (\phi(D' - R^{1/3} / 100 - 1/T_{\text{máx}})) \quad (3-18)$$

con:

$\phi =$ Latitud en radianes

$=$ Número de horas de brillo solar/12

$D' =$ Número de horas de brillo solar/N

$R =$ Humedad relativa en porcentaje

$K =$ Factor de latitud ($\text{cal/cm}^2/\text{día}$)

Últimamente los modelos empleados tienden a ser más complejos utilizando índices de nubosidad. Así, en el 2002 Nalin K. *et al.* plantean un modelo para la estimación de la radiación solar global utilizando variables aleatorias difusas en un intervalo de tiempo determinado, involucrando factores geográficos y meteorológicos.

3.7.2. Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales

Los estudios de los datos de radiación solar disponible han mostrado que el promedio de la fracción Hd/H (Hd radiación difusa) es una función de K_t . La Figura 3.10 muestra las gráficas con la correlación original de Liu y Jordan (1960), Choudhury (1963), Stanhill (1966), Ruth y Chant (1976), Tuller (1976) y Collares-Pereira y Rabl. Se presentan diferencias, probablemente debido en parte a las dificultades instrumentales y en parte a efectos estacionales. Entre las correlaciones más empleadas, la de Collares-Pereira y Rabl se representa mediante la ecuación:

$$Hd/H = \begin{cases} 0,99 & \text{para } K_t \leq 0,17 \\ \left. \begin{aligned} &1,188 - 2,272 K_t + 9,473 K_t^2 \\ &-21,865 K_t^3 + 14,648 K_t^4 \end{aligned} \right\} & \text{para } 0,17 < K_t < 0,75 \\ -0,54 K_t + 0,632 & \text{para } 0,75 < K_t < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_t \geq 0,80 \end{cases} \quad (3-19)$$

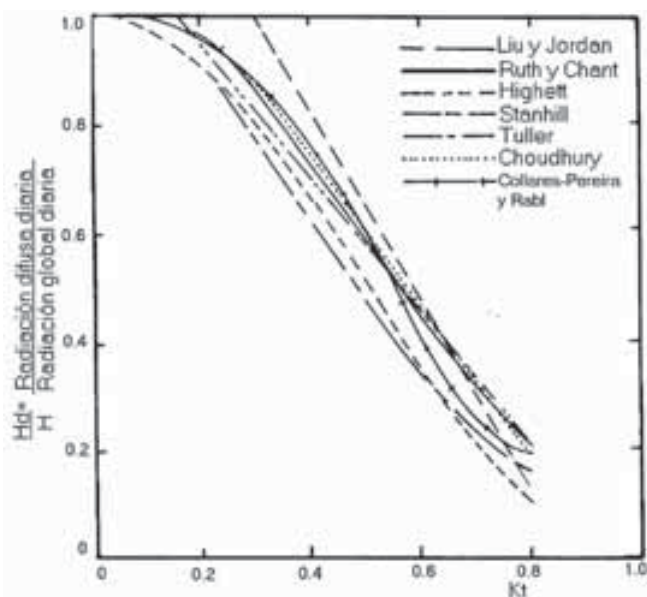


Fig. 3.10. Comparación de diferentes modelos de radiación difusa

Pc Jain (1984) propuso que para la radiación difusa

$$Hd = (Hd \text{ claro}) + (Hd \text{ nublado}) \quad (3-20)$$

con:

$$(Hd) \text{ claro} = \bar{\alpha} H_0 \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-21)$$

$$(Hd) \text{ nublado} = \bar{\beta} H_0 \left(1 - \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-22)$$

$(Hd) \text{ claro}$ = Promedio diario mensual de la radiación difusa incidiendo sobre una superficie horizontal durante las horas con cielo claro.

$(Hd) \text{ nublado}$ = Promedio diario mensual de la radiación difusa incidiendo sobre una superficie horizontal durante las horas con cielo nublado.

Por lo tanto:

$$(Hd) = H_0 \left[\bar{\beta} + (\bar{\alpha} - \bar{\beta}) \frac{\bar{n}}{N} \right] \quad (3-23)$$

Haciendo $a_1 = \bar{\beta}$ y $b_1 = \bar{\alpha} - \bar{\beta}$

Entonces

$$\frac{Hd}{H_0} = a_1 + b_1 \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-24)$$

con los datos de tres localidades se obtuvo:

	Macerata	Salisbury	Bulawayo
a1	0,29	0,36	0,345
b1	-0,125	-0,25	-0,23
Error	0,04	0,13	0,09

La ecuación (3-23) relaciona la radiación difusa y el brillo solar. Tiene la ventaja de no requerir la radiación global para estimar la radiación difusa.

En 1991 M. A. Elhadidy y D. Y. Abdel-Nabi encontraron una relación entre la radiación difusa, la radiación global y el índice de claridad:

$$\frac{Hd}{H} = 1,039 - 1,741 K_t^2 \quad (3-25)$$

En la Figura 3.11 se comparan las correlaciones de Collores-Pereira y Elhadidy; se observa buena concordancia entre los modelos, excepto para algunos valores de

K_p , siendo atribuidas las diferencias para $K_p > 0,65$ fundamentalmente a efectos estacionales.

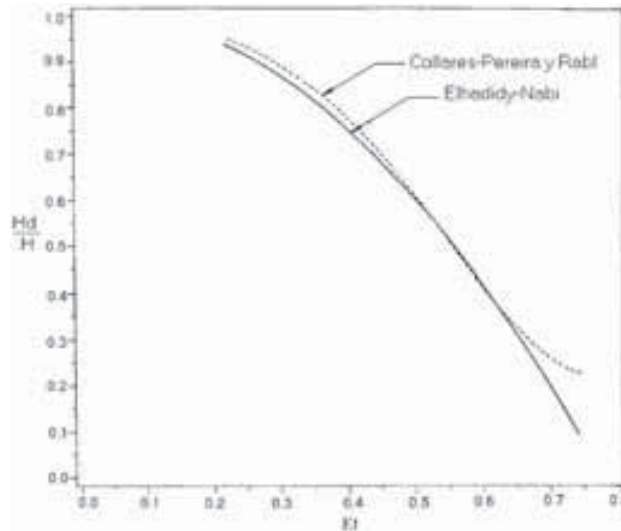


Figura 3.11. Correlación de la radiación difusa en función de K_p

3.7.3. Estimación de la radiación solar directa sobre superficies horizontales

Sharma y Pal (1965) propusieron la siguiente fórmula para el cálculo de la radiación directa sobre una superficie horizontal:

$$\frac{H_b}{H} = \left[\frac{CN}{(CN+K)} \right] \left[\frac{A \text{sen}^2 \beta}{(\text{sen}^2 \beta + c)} \right] \quad (3-26)$$

donde:

$$CN = \begin{cases} 0,0 \text{ a } 0,5 & \text{para días muy nublados} \\ 0,5 \text{ a } 0,7 & \text{para días ligeramente nublados} \\ 0,7 \text{ a } 1,1 & \text{para días claros} \\ 1,1 \text{ a } 1,3 & \text{para días muy claros} \end{cases}$$

K y A son constantes que varían ligeramente con la altitud solar como se muestra a continuación.

Tabla 3.1
Constantes para Estimar la Radiación Solar Directa

Altitud solar (Grados)	A	K
10	1,7500	0,8820
20	1,8885	1,0750
30	2,0290	1,2450
40	2,1159	1,3350
50	2,1703	1,3900
60	2,2074	1,4280
70	2,2279	1,4530
80	2,2423	1,4630
90	2,2542	1,4750

β se obtiene de la ecuación:

$$\text{sen } \beta = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \cos W \cos \delta \cos \phi \quad (3-27)$$

Numan en 1975 propuso una relación entre la radiación global y la radiación directa:

$$H_b = 1,6163 H - 798,45 \text{ sen } \beta \quad (3-28)$$

Pc Jain (1984) expresó la radiación directa sobre una superficie horizontal en función de la radiación extra-terrestre y el número de horas de brillo solar:

$$H_0 = \gamma \frac{\bar{n}}{N} H_0 \quad (3-29)$$

y halló el valor de γ para 3 localidades:

	Macerata	Salisbury	Bulawayo
γ	0,75	0,64	0,665

3.7.4. Modelo multivariado para el brillo solar

El modelo de Ångström modificado depende de la existencia de series históricas para el brillo solar, de manera que sin información de brillo no sería posible determinar la irradiancia sobre un lugar en particular. Partiendo de consideraciones físicas, el brillo solar y la radiación se pueden determinar en función de las variables meteorológicas de un lugar, fuertemente

correlacionadas con el comportamiento de la radiación solar.

La diferencia de temperatura (entre la temperatura máxima y mínima durante el día) y la humedad son ejemplos de dependencia con la irradiancia diaria; en un día con condiciones despejadas, en la madrugada se presentan temperaturas bajas, y en horas de la tarde temperaturas altas, en tanto que la humedad desciende como consecuencia de la evaporación ocasionada por la energía del Sol. Al contrario, en días nublados la diferencia de temperaturas es menor debido al efecto invernadero de las nubes, que aun cuando impiden que entre la radiación también impiden que salga y la humedad puede alcanzar valores altos. El país cuenta con un número apreciable de estaciones que monitorean continuamente temperatura y humedad, razón por la cual en el presente trabajo se calcula el brillo solar como función de la humedad y la diferencia de temperaturas:

$$n = \alpha \Delta T + \beta Hr + \gamma \quad (3.30)$$

donde α, β, γ son coeficientes que se determinan a través de análisis de regresión lineal múltiple; ΔT es la diferencia de temperatura (temperatura máxima menos la temperatura mínima diarias) y Hr es la humedad relativa promedio diaria. Cada estación que cuente con medidas continuas de brillo, temperaturas y humedad puede entonces ser modelada como se muestra en la Figura 3.12.

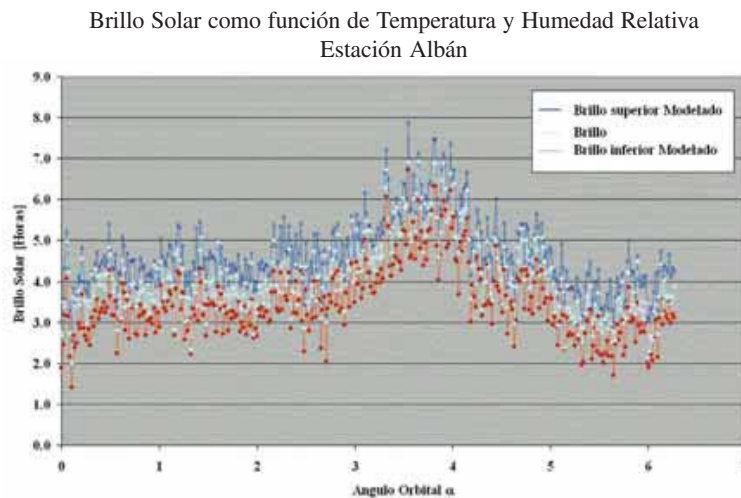


Figura 3.12. Brillo solar para cada día del año, modelo multivariado

3.7.5. Estimación de la radiación solar global sobre superficies inclinadas

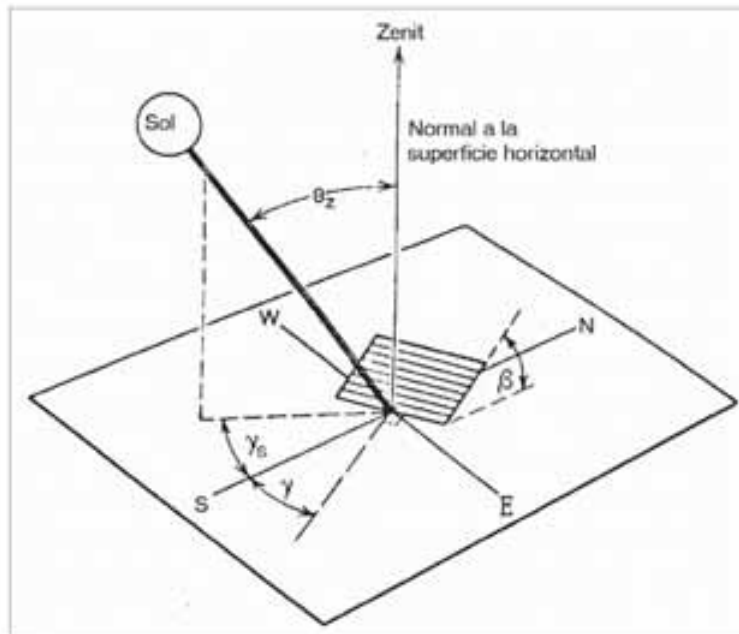


Figura 3.13. Radiación solar sobre superficies inclinadas

La radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada $\bar{H}(\beta)$, Figura 3.13, puede calcularse como:

$$\bar{H}(\beta) = \bar{R}\bar{H} \quad (3-31)$$

donde \bar{H} es la radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal y:

$$\bar{R} = \frac{(\bar{H} - \bar{H}d)/\bar{H}Rb + (\bar{H}d/\bar{H})(1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2}{(1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2} \quad (3-32)$$

donde:

$\bar{R}b$ = Razón obtenida del promedio diario mensual de la radiación sobre una superficie inclinada y el promedio diario mensual de la radiación sobre la superficie horizontal.

β = Inclinación de la superficie

$\bar{H}d$ = Radiación solar difusa

r = Reflectancia de la superficie

La radiación global diaria promedio mensual sobre superficies inclinadas puede ser calculada como:

$$\bar{H}(\beta) = (\bar{H} - \bar{H}d)\bar{R}b + \bar{H}d \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + \bar{H}r \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \quad (3-33)$$

$\bar{R}b$ puede ser estimada aproximadamente como la razón entre radiación fuera de la atmósfera terrestre sobre una superficie inclinada y la radiación fuera de la atmósfera sobre una superficie horizontal. Para $\bar{R}b$ se han desarrollado fórmulas para superficies en el hemisferio norte inclinadas y orientadas hacia el Sur y para superficies en el hemisferio sur inclinadas y orientadas hacia el Norte.

3.7.6. Superficies en el hemisferio norte, inclinadas y orientadas hacia el Sur

Para superficies que se hallan en el hemisferio norte, inclinadas con cualquier ángulo, pero dirigidas hacia el Sur, \overline{Rb} se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \operatorname{sen}(\phi - \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + (\pi/180) \omega_s \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi} \quad (3-34)$$

donde ω_s' es el ángulo de puesta del Sol sobre una superficie inclinada; y su valor es el menor entre los dos ángulos ω_s y $\arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)$

$$\omega_s' = \min[\arccos[-\tan \phi \tan \delta], \arccos[-\tan(\phi - \beta) \tan \delta]] \quad (3-35)$$

3.7.7. Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el Norte

Para superficies que se hallan en el hemisferio sur, inclinadas con cualquier ángulo, pero dirigidas hacia el norte, \overline{Rb} se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \operatorname{sen}(\phi + \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + (\pi/180) \omega_s \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi} \quad (3-36)$$

$$\omega_s' = \min[\arccos(-\tan \phi \tan \delta), \arccos(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta)] \quad (3-37)$$

BIBLIOGRAFÍA

1. Duffie, J. A. y Beckwan, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & sons, 761p, 1980.
2. Elhadidy M. A y Abdel-Nabi D. Y. Diffuse Fraction of Daily Global Radiation at Dhahran. Saudi Arabia, 6p, 1991.
3. Iamap. Revised Introduction Manual on Radiation Instruments and Measurements. WMO/TD-N° 149. Ginebra: WCRP Publications Series N° 7, 1986. 134p.
4. Jain, P. C. A Model for Diffuse and Global Irradiation on Horizontal Surfaces. Trieste (Italy), 1990. 8p.
5. Louche, A.; Notton, G.; Poggi, P., y Simonnot G. Correlations for Direct Normal and Global Horizontal Irradiation on a French Mediterranean Site. Ajaccio, France. 1991. 6p.
6. Sayigh, A. A. M. Solar Energy Engineering. New York: Academic Press, 1977. 476p.
7. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Recent Advances in Pyranometry. Norrköping, Sweden. 1984. 387p.
8. World Meteorological Organization. Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source. Geneva: World Meteorological Organization Technical Note N° 172, WMO- N° 557, 1981. 298p.
9. World Climate Research Programme (WCRP). Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements, WMO/TD No. 149, 1986. 140p.
10. World Climate Research Programme (WCRP). Baseline Surface Radiation Network (BSRN), Operation Manual (Versión 1.0), WMO/TD No. 879, 1998. Anexo B.
11. Nalin K. Gautam y N. D. Kaushika, "A Model for the Estimation of Global Solar Radiation Using Fuzzy Random Variables", American Meteorological Society, diciembre de 2002.