

ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL INCIDENTE EN SUPERFICIES INCLINADAS

Jaime Wright

Departamento de Física, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

RESUMEN

Se estimaron valores diarios medios mensuales de la radiación solar global incidente sobre un colector solar inclinado, orientado hacia el sur, con datos observados o estimados de la radiación solar global, directa o difusa, sobre una superficie horizontal en Limón, Palmar Sur, Santa Rosa y Fabio Baudrit. Asimismo, se estimaron valores horarios medios mensuales de la radiación global incidente sobre las inclinaciones 10 y 30°, con mediciones experimentales de la radiación global y directa en Heredia, durante el período de abril a junio de 1991.

Para lograr la máxima eficiencia posible de un colector solar, se utilizó un modelo isotrópico y se encontró que la inclinación óptima de un colector en los meses de setiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero, está entre los 5-30° y 0° en los demás meses del año; correspondiendo a diciembre y enero las mayores inclinaciones óptimas. Asimismo, se encontró con base en mediciones horarias de la radiación global y directa en Heredia, que la inclinación horaria de 0° es la óptima durante abril, mayo y junio de 1991.

En este trabajo se presentan curvas que se espera sean de utilidad en instalaciones de colectores solares o de paneles fotovoltaicos, en terrenos con pendientes variables en las regiones geográficas del Valle Central (representado por Fabio Baudrit), Pacífico Norte (representado por Santa Rosa), Pacífico Sur (representado por Palmar Sur) y del Atlántico (representado por Limón).

ABSTRACT

Monthly averages of daily global radiation incident upon a tilted southfacing surface, were computed from the available values of global, direct or diffuse solar radiation incident upon a horizontal surface for Limon, Fabio Baudrit, Palmar Sur and Santa Rosa. Also, there were computed monthly averages hourly values of global radiation for tilt angles of 10 and 30 degrees, with experimental data in Heredia over the period from April to June of 1991.

In order to obtain the maximum output from a solar energy system, it is found by using different models, that the collector optimum tilt angle has to be in the range 5-30 degrees, for September, October, November, December, January and February, and 0 degrees for the other months of the year; with higher angles in January and December. Also, it is found, by using experimental data in Heredia, that 0 degrees is the optimum hourly tilt angle for April, May and June.

The curves in this paper will be useful for large scale installations of solar collectors or photovoltaic panels in terrain with variable slopes in the geographic regions of the Central Valley (represented by Fabio Baudrit), North Pacific (represented by Santa Rosa), South Pacific (represented by Palmar Sur) and the Atlantic (represented by Limon).

INTRODUCCION

El conocimiento cuantitativo de la radiación solar incidente en superficies inclinadas, es un

prerrequisito para la estimación de varios dispositivos solares, diseñados para la conversión y útil aplicación de la energía solar. La radiación solar es usualmente reportada como la radiación global y difusa en un plano horizontal. Datos de radiación solar en un plano horizontal están disponibles en muchas localidades, pero raramente en superficies inclinadas. Por consiguiente, se requieren métodos para la estimación de los valores diarios y horarios de la radiación global en superficies inclinadas.

Con la finalidad de calcular la insolación diaria en una superficie inclinada, es necesario separar primero la componente difusa de la radiación global. El método de Page (1961) es ampliamente utilizado, y hay otras técnicas (Liu y Jordan 1960, Iqbal 1978, Barbaro et al. 1979, Wright 1988 y 1988b) sugeridas para la separación de la radiación difusa. Wright (1988b), al hacer comparaciones con las ecuaciones comúnmente utilizadas, encontró que la correlación de Page (1961) concuerda bien con los valores experimentales de la radiación global y difusa en Fabio Baudrit, Alajuela.

Diferentes modelos matemáticos se han desarrollado (Liu y Jordan 1962, Klucher 1979, Hay 1979 y Pérez et al. 1990) para la estimación de la radiación global en superficies inclinadas, con mediciones en superficies horizontales. La única diferencia de estos modelos radica en la valorización de la componente difusa del cielo. El modelo de Liu y Jordan (1962), utiliza la simplificada suposición de la distribución isotrópica de la radiación difusa, la cual es independiente de los ángulos cenital y acimutal. Este modelo fue verificado con mediciones experimentales en Blue Hill, Massachusetts, USA (Klein 1977) y en Dhahran, Arabia Saudita (Abdelrahman y Elhadidy 1986), con buena concordancia entre los valores estimados y observados. Este modelo isotrópico ha sido ampliamente utilizado en la estimación de la radiación global en superficies inclinadas, por muchos autores en todo el mundo (por ejemplo, Ahmad y Husain 1986, Chiou y El-Naggar 1986, Koronakis 1985, Abughres 1985, Gopinathan 1992).

La orientación con respecto del Ecuador y la inclinación con respecto del suelo de un colector solar, son indiscutiblemente dos de los factores más importantes que deben considerarse al diseñar

un sistema solar. Comúnmente, el colector es orientado hacia el sur en el Hemisferio Norte, y luego la inclinación es ajustada para lograr la máxima recolección de la radiación solar incidente en el colector.

Hay un número de factores que afecta el valor del ángulo óptimo (esto es, el ángulo que debe inclinarse, la superficie del colector para captar la máxima cantidad de energía radiante posible). Si la atmósfera fuese completamente transparente, el ángulo óptimo sería igual a la latitud del lugar del colector; sin embargo, la atmósfera no es completamente transparente. En invierno los rayos solares deben atravesar mayor distancia a través de la atmósfera, reduciendo la cantidad de radiación recolectada. Otros factores que afectan el ángulo óptimo, incluyen la densidad de las nubes y el albedo superficial.

En los cálculos de los valores diarios medios mensuales de la radiación global en superficies inclinadas, se emplearon datos de insolación de las siguientes estaciones actinométricas de Costa Rica: Limón (lat. 10° 00' N., long. 83° 02' W., alt. 5 m., período: 1970-1972), Santa Rosa (lat. 10° 50' N., long. 85° 37' W., período: 1972-1974), Palmar Sur (lat. 8° 57' N., long. 83° 28' W., alt. 16 m., período: 1978-1979), Fabio Baudrit (lat. 10° 01' N., long. 83° 15' W., alt. 840 m., período: 1983-1985). Los datos de radiación global de Limón, Santa Rosa y Palmar Sur, fueron tomados con equipo del Instituto Meteorológico Nacional, mientras los datos de radiación global, directa o difusa de la Finca Experimental Fabio Baudrit y de la Universidad Nacional, fueron tomados con equipos de la Universidad de Costa Rica y de la Universidad Nacional, respectivamente.

MATERIALES Y METODOS

Los valores horarios de la radiación global y directa, fueron medidos por un período de tres meses en Heredia (lat. 10° 02' N., long. 84° 09' W., alt. 1.050 m). Se utilizó un piranómetro Eppley blanco y negro en las mediciones de los valores horarios de la radiación global. Los valores horarios de la radiación directa fueron medidos por un pirheliómetro Eppley normal incidente. El período de medición fue de abril a junio de 1991. El lapso

Cuadro 1

Constantes climáticas a, b y el coeficiente de correlación r, en la ecuación de regresión $K_D = a + b K_T$ (según Wright 1988a y 1988b)

Estación	a	b	r
Fabio Baudrit ¹	0.90	-0.98	0.97
Santa Rosa	0.85	-0.79	0.92
Palmar Sur	1.29	-1.64	0.96
Limón	0.78	-0.61	0.71

1. Basado en mediciones experimentales de la radiación global y difusa.

de medición de cada 30 segundos, fue integrado cada hora para obtener el valor horario. El pirheliómetro fue montado a una rastreadora solar automática. Los datos de salida de los radiómetros fueron almacenados automáticamente, por medio de un ordenador computarizado de datos (data logger).

Con la finalidad de obtener la radiación solar en superficies inclinadas, es necesario obtener primero las componentes directa y difusa. Si no existen datos disponibles de estas dos componentes, como en el caso de Limón, Santa Rosa y Palmar Sur, la componente difusa puede calcularse por las distintas curvas de regresión de la fracción difusa K_D (definida como: $K_D = Q_D/Q_T$, donde Q_D es la radiación difusa y Q_T es la radiación global) versus el índice de claridad K_T (definida como: $K_T = Q_T/Q_0$, donde Q_0 es la radiación extraterrestre), modelados por Wright (1988a y 1988b) con base en las relaciones de Barbaro et al. (1979) y Page (1961). La componente directa Q_B , puede calcularse por la diferencia entre Q_T y Q_D .

Una relación de la forma de la Ec.(1) fue utilizada en la estimación de Q_D , esto es:

$$K_D = a + b K_T \quad (1)$$

Siendo a, b, constantes que dependen de la localidad y el clima de la estación. Los valores de a, b y el coeficiente de correlación r para Limón, Santa Rosa, Fabio Baudrit y Palmar Sur, se presentan en el Cuadro 1 (según Wright 1988a y 1988b).

La relación de Q_B con Q_T , puede también ser expresada como:

$$Q_B/Q_T = 1 - Q_D/Q_T \quad (2)$$

Con un valor de 1.353 w/m^2 para la constante solar, la radiación extraterrestre Q_0 (en unidades $\text{MJ/m}^2\text{-día}$) es calculada por la siguiente relación (Sellers 1965):

$$Q_0 = 37.210 (\text{dm/d})^2 (w \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin w) \quad (3)$$

donde: dm es la distancia media Tierra-Sol, en km; d es la distancia instantánea Tierra-Sol, km; w es el número de grados recorridos por el Sol en mediodía solar para una superficie horizontal = $\cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$, radianes; δ es la inclinación solar, grados. En el Cuadro 2, se dan los valores medios mensuales de la declinación solar δ .

Cuadro 2

Valores diarios medios mensuales de la declinación solar (δ)

Mes	Declinación solar (δ)
Enero	-20.9
Febrero	-12.9
Marzo	-2.0
Abril	9.6
Mayo	18.7
Junio	23.0
Julio	21.2
Agosto	13.8
Setiembre	2.9
Octubre	-8.7
Noviembre	-18.4
Diciembre	-23.0

Radiación solar en superficies inclinadas**a) Cálculos de valores diarios medios mensuales**

En los cálculos de los valores diarios medios mensuales de la radiación global en superficies inclinadas, se utilizó el modelo isotrópico desarrollado inicialmente por Liu y Jordan (1962) y descrito posteriormente por Klein (1977), el cual supone que la radiación global incidente en planos inclinados $Q(T,S)$, tiene una relación de la forma:

$$Q(T,S) = Q(B,S) + Q(D,S) + Q(r,S) \quad (4)$$

donde $Q(B,S)$ y $Q(D,S)$ representan, respectivamente, la radiación solar directa y difusa sobre una superficie inclinada, y $Q(r,S)$ es el valor de la radiación reflejada del entorno hacia la superficie del colector. Una forma más generalizada para representar este modelo isotrópico es:

$$Q(T,S) = R_b Q_b + 1/2(1 + \cos S) Q_D + 1/2(1 - \cos S) \sigma Q_r \quad (5)$$

donde σ es el albedo del suelo donde se encuentra el colector (un valor de 0.2 es utilizado en este trabajo); S es el ángulo de inclinación del colector con respecto de la horizontal. El factor de elevación de la radiación directa R_b , definida como $R_b = Q_{os}/Q_o$ (siendo Q_{os} , la radiación global media mensual incidente sobre la superficie de un colector inclinado, un ángulo S en el tope de la atmósfera, y calculado al mediodía de cada mes del año), y expresado por la siguiente forma (los detalles de la formulación de R_b , pueden ser expresados en Duffie y Beckman (1974) o en Iqbal (1983)).

$$R_b = \frac{\cos(\phi-S) \cos \delta \sin w_s + (\pi/180) w_s \sin(\phi-S) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin w + (\pi/180) w \sin \phi \sin \delta} \quad (6)$$

donde w_s es el número de grados recorridos por el Sol en mediodía solar para una superficie inclinada, radianes. Una expresión general está dada por:

$$w_s = \min [w, \cos^{-1}(-\tan(\phi-S) \tan \delta)] \quad (7)$$

«min» indica el valor más pequeño dentro del paréntesis.

b) Cálculos de valores horarios medios mensuales

El factor de elevación r_b , relaciona la radiación horaria directa diaria en una superficie inclinada $I_{b,s}$ con la radiación horaria directa diaria en una superficie horizontal $I_{b,o}$; esto es:

$$r_b = I_{b,s}/I_{b,o} = \frac{\cos(\phi - S) \cos \delta \cos h + \sin(\phi - S) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos h + \sin \phi \sin \delta} \quad (8)$$

donde h es el ángulo horario medido en el polo celestial, entre el meridiano del observador y el meridiano solar. Contando desde el mediodía solar, h cambia 15° por hora, siendo h positivo durante las mañanas y negativo durante las tardes.

Los valores horarios medios mensuales de la radiación global en una superficie inclinada $I(T,S)$, están compuestos por las siguientes componentes:

$$I(T,S) = I(b,S) + I(d,S) + I(r,S) \quad (9)$$

donde $I(b,S)$ y $I(d,S)$ representan, respectivamente, los valores horarios de la radiación directa y difusa en una superficie inclinada, y $I(r,S)$ es el valor horario de la radiación reflejada incidente en la superficie inclinada del colector. Una forma más generalizada de esta expresión es:

$$I(T,S) = r_b I_{b,o} + \frac{1 + \cos S}{2} I_{d,o} + \frac{1 - \cos S}{2} \sigma I_{r,o} \quad (10)$$

En la Ec. (10), $I_{b,o}$, $I_{d,o}$ y $I_{r,o}$, se representan, respectivamente, los valores horarios de la radiación directa, difusa y global en una superficie horizontal. Sin embargo, r_b puede ser evaluado en el punto medio del ángulo horario h , considerando una hora como un período suficientemente corto.

RESULTADOS

En la estimación de la radiación solar global diaria media mensual en diferentes superficies inclinadas $Q(T,S)$, se escogieron ángulos S de 0 a 60° , con un intervalo de 5° . En las Figs. 1 a 3, aparecen

Cuadro 3

Valores horarios de la irradiancia difusa sobre un plano horizontal durante los meses abril, mayo y junio de 1991, en Heredia, Costa Rica, en unidades KJ/m²-hr

<i>Hora local</i>	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
Abril	1209	1192	1215	936	922	848	762	680	493
Mayo	1020	1118	1165	1301	878	1567	1617	850	1033
Junio	1512	1275	1353	1558	1289	262	428	635	685

Cuadro 4

Valores horarios medios mensuales de la irradiancia global en Heredia, Costa Rica, para las inclinaciones de a) 0°, b) 10° y c) 30°, durante el año 1991, en unidades KJ/m²-hr

Cuadro 4(a)

<i>Hora local</i>	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
Abril	2452	3100	3532	3668	3744	3298	2729	1980	1249
Mayo	2394	3020	3470	3996	4007	2693	2394	2214	1973
Junio	2412	2488	2934	3528	3762	1332	1404	1260	1098

Cuadro 4(b)

<i>Hora local</i>	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
Abril	2399	3051	3540	3631	3708	3264	2695	1948	1218
Mayo	2260	2893	3349	3872	3873	2635	2346	2122	1879
Junio	2299	2383	2825	3408	3621	1270	1339	1206	1046

Cuadro 4(c)

<i>Hora local</i>	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
Abril	2154	2762	3224	3305	3379	2971	2445	1757	1081
Mayo	1860	2459	2892	3373	3335	2378	2133	1809	1589
Junio	1959	2041	2442	2966	3109	1058	1122	1031	891

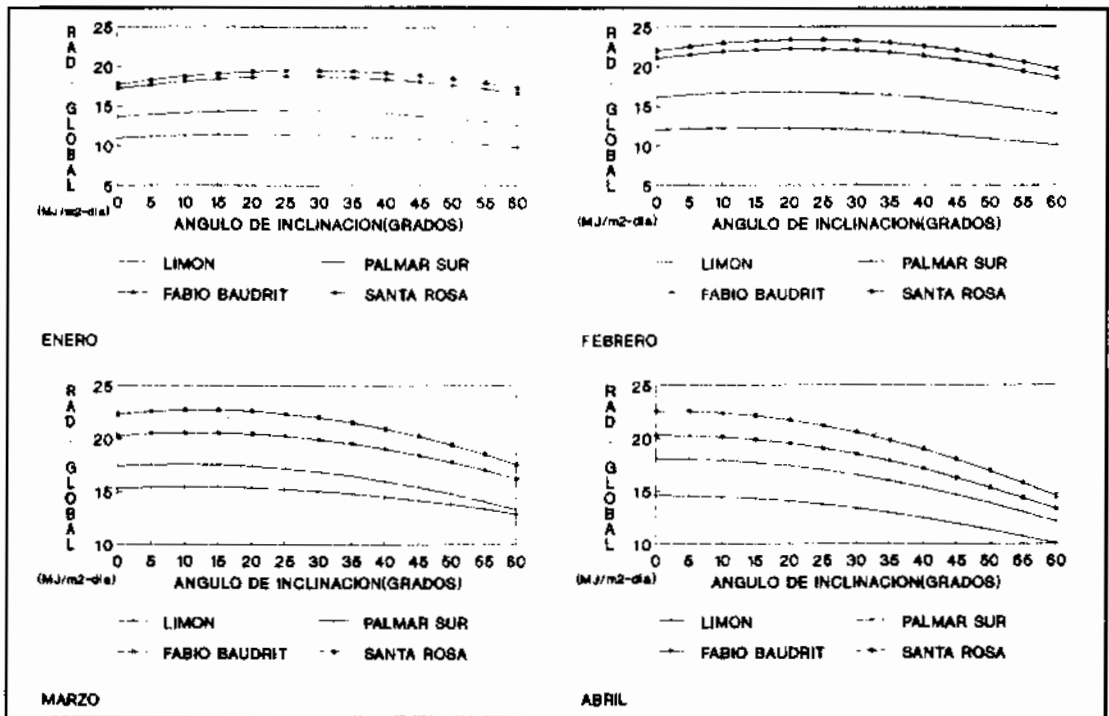


Fig. 1. Variación de la radiación solar global diaria media mensual con el ángulo de inclinación de un colector durante el período de enero a abril.

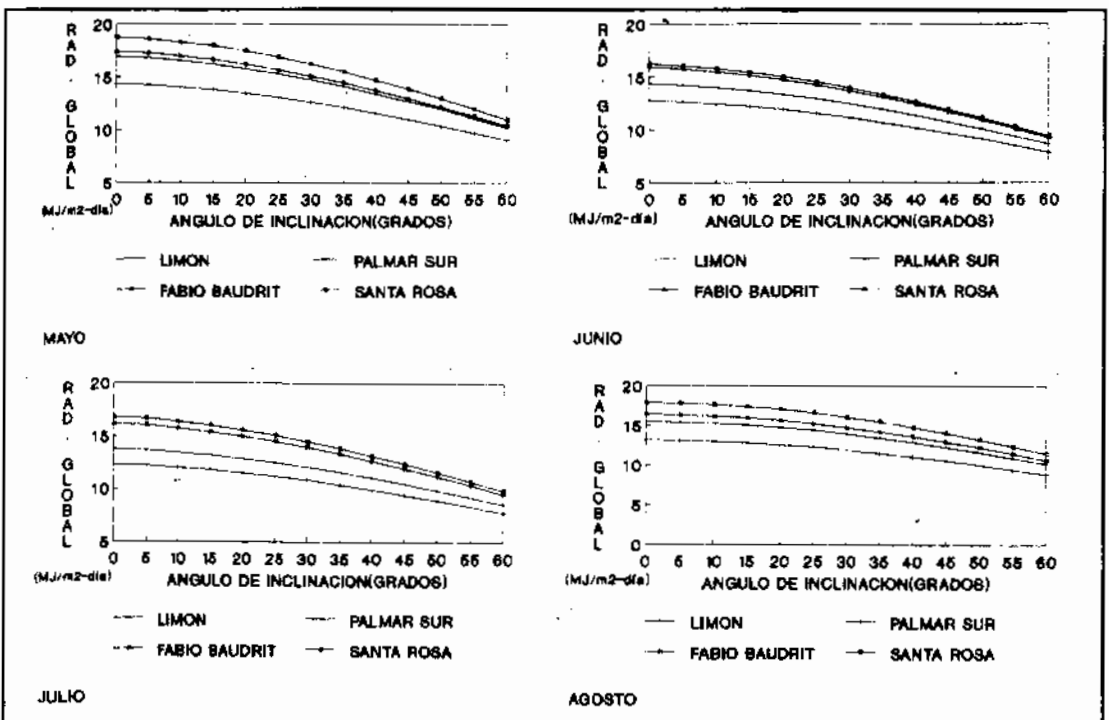


Fig. 2. Variación de la radiación solar global diaria media mensual con el ángulo de inclinación de un colector durante el período de mayo a agosto.

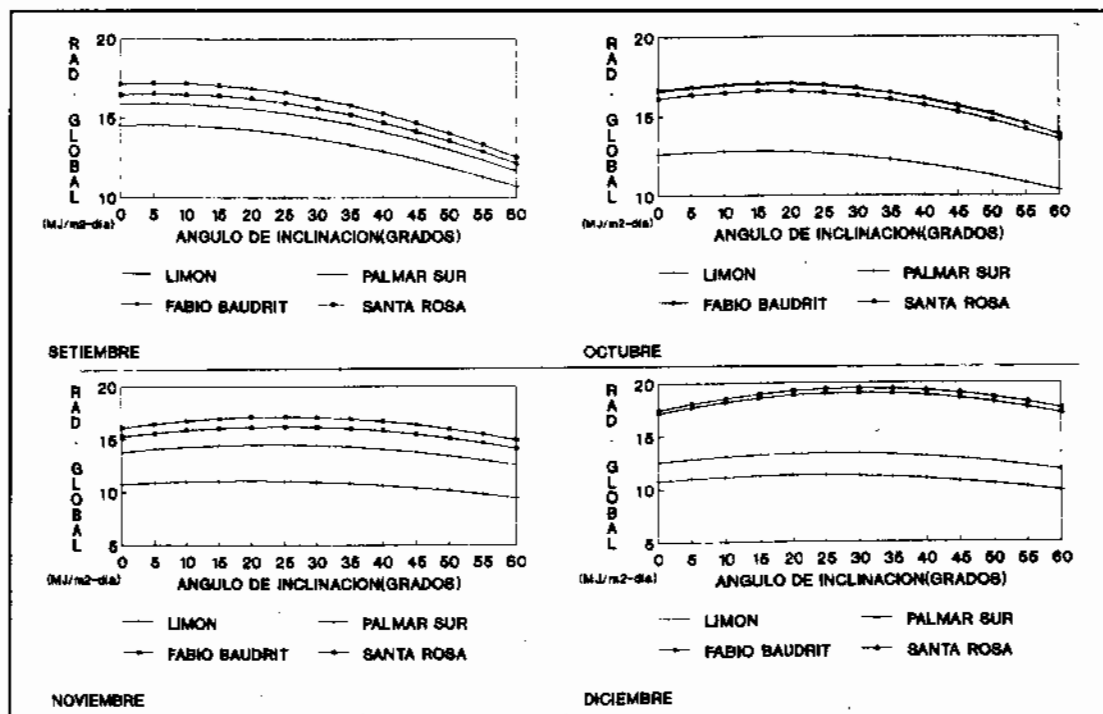


Fig. 3. Variación de la radiación solar global diaria media mensual con el ángulo de inclinación de un colector durante el período de setiembre a diciembre.

los valores diarios medios mensuales de la radiación global, calculados por el modelo isotrópico desarrollado por Liu y Jordan (1962) y descrito posteriormente por Klein (1977), para Limón, Palmar Sur, Fabio Baudrit y Santa Rosa. Los valores diarios medios mensuales de la radiación difusa para las estaciones de Limón, Palmar Sur y Santa Rosa, fueron previamente calculados por Wright (1988a y 1988b) con base en las relaciones de Barbaro et al. (1979) y Page (1961). La componente directa fue calculada por la diferencia entre la radiación global y la difusa.

Los valores máximos de $Q(T,S)$ aparecen en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, en Limón, Fabio Baudrit y Santa Rosa, para S entre 20 a 30°; asimismo, valores máximos de $Q(T,S)$ aparecen para S entre 0 a 10° en los demás meses del año. Enero y diciembre son los meses en que deberá inclinarse más el colector ($S=30^\circ$) para obtener el máximo rendimiento posible, como se demuestra en las Figs. 1 a 3. Para la estación actinométrica de Palmar Sur, la mayor

inclinación del colector deberá ser de 20°, en los meses de noviembre, diciembre y enero.

La radiación global y directa en una superficie horizontal, recolectada cada 30 segundos, en el período de abril a junio de 1991, fue integrada cada hora para obtener la radiación horaria diaria $I(T,S)$. Se escogieron ángulos S de 0 a 30°, con un intervalo de 10°. Los valores de la radiación difusa $I_{d,o}$, obtenidos por la diferencia entre los valores horarios de la radiación global $I_{r,o}$ y directa $I_{b,o}$ en un plano horizontal en Heredia, aparecen en el Cuadro 3.

El Cuadro 4 presenta los valores horarios medios mensuales de la irradiancia global $I(T,S)$ en Heredia, para las inclinaciones de a) 0°, b) 10° y c) 30°. Los valores máximos de $I(T,S)$ aparecen en la inclinación de 0°, como se demuestra en el Cuadro 4(a), y los valores mínimos en la inclinación de 30° (Cuadro 4(c)). Por consiguiente, la inclinación óptima horaria debería ser de 0°, para todo el día solar, entre los meses de abril a junio, como era de

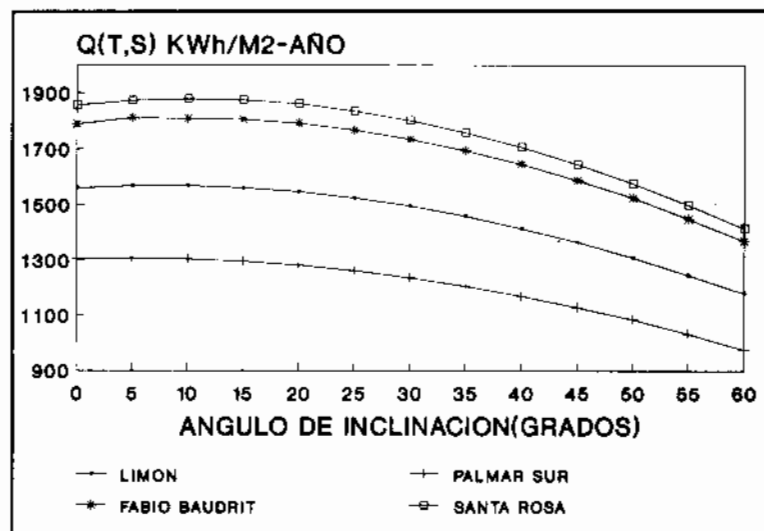
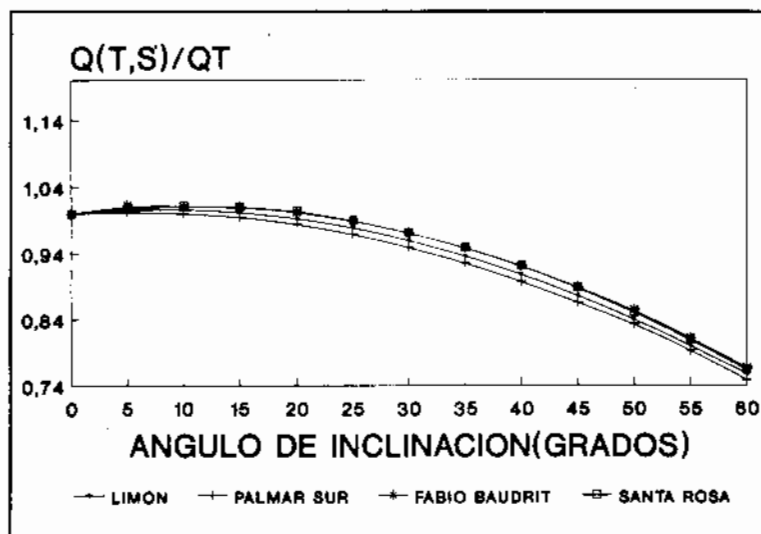


Fig. 4. Valores medios anuales de la radiación solar global con el ángulo de inclinación de un colector.

Fig. 5. Cociente entre la radiación solar global media anual en superficies inclinadas y la radiación solar global media anual en una superficie horizontal versus el ángulo de inclinación de un colector.



esperarse, ya que la inclinación óptima diaria es también 0, para las cuatro estaciones analizadas previamente. Los valores máximos de $I(T,S)$ se presentan entre las 12 y 13 horas para $S = 0^\circ$, cuyos máximos para abril, mayo y junio son, respectivamente: 3744 KJ/m²-hr, 4007 KJ/m²-día y 3762, como se demuestra en el Cuadro 4(a).

En la Fig. 4 aparecen los valores medios anuales de $Q(T,S)$, para diferentes superficies inclinadas en Limón, Palmar Sur, Santa Rosa y Fabio Baudrit. Se observa en esta figura, que los valores

anuales de $Q(T,S)$ arriba de 1.700 KWh/m²-año, se presentan en Santa Rosa y Fabio Baudrit con S en las inclinaciones 0 a 30°. Palmar Sur y Limón presentan valores medios anuales de $Q(T,S)$ por debajo de 1700 KWh/m²-año, como era de esperarse, porque estas estaciones presentan mayor nubosidad y precipitación que las otras.

En la Fig. 5 se presenta el cociente entre la radiación solar global media anual en superficies inclinadas y la radiación solar global media anual en una superficie horizontal, $Q(T,S)/Q_T$, versus el

ángulo de inclinación S . Se observa que el cociente $Q(T,S)/Q_T$ es mayor para las inclinaciones más pequeñas; esto es, de 0 a 20°, y tiende a disminuir abruptamente después de los 20°. El mayor valor de $Q(T,S)/Q_T$ se encuentra alrededor de 10°, que es parecido al valor de la latitud de Costa Rica, lo anterior indica que un ángulo óptimo medio anual igual a la latitud del lugar donde se encuentra la estación, es recomendable para Costa Rica.

CONCLUSIONES

Se estimaron los valores horarios y diarios medios mensuales de la radiación solar global en superficies inclinadas, empleando el modelo isotrópico de Liu y Jordan (1962). Para muchas localidades están disponibles los valores diarios medios mensuales de la radiación global en una superficie horizontal, pero raramente valores dia-

rios y horarios de la radiación global, directa o difusa, particularmente en Costa Rica. En esta circunstancia la utilización de los métodos de Barbaro et al. (1979) y de Page (1961) dan confianza para utilizar sus formulaciones. Sin embargo, los resultados más precisos son los experimentales que se obtuvieron para Heredia y Fabio Baudrit.

Los ángulos de inclinaciones óptimas en los meses secos y lluviosos son $25 \pm 5^\circ$ y 0° , respectivamente. Un ángulo óptimo muy parecido a la latitud del lugar, recolecta la máxima energía promedio anual, para las cuatro estaciones actinométricas analizadas en este estudio.

Los resultados presentados en este trabajo pueden ser una útil referencia en futuras instalaciones de celdas fotovoltaicas o de colectores solares en Limón, Palmar Sur, Alajuela y Santa Rosa.

REFERENCIAS

- Abdelrahman, M.A. and M.A. Elhadidy, 1986. Comparison of calculated and measured values of total radiation on tilted surfaces in Dhahran, Saudi Arabia. *Solar Energy*, 37(3):239-243.
- Abughres, S.M., 1985. Monthly average daily insolation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Wind and Technology*, 2(2):119-130.
- Ahmad F. and S.A. Husain, 1986. Computation of monthly average hourly and daily solar radiation incident on a flat tilted surface at Karachi, Pakistan. *Solar Wind and Technology*, 3(4):329-333.
- Barbaro, S.S., C. Coppolino, C. Leone and E. Sinagra, 1979. An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation. *Solar Energy*, 22(3):225-228.
- Chiou, J.P. and M.M. El-Naggar, 1986. Optimum slope for solar insolation on a flat surface tilted toward the equator in Heating season. *Solar Energy*, 36(5):471-478.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman, 1974. *Solar Energy Thermal Processes*. Wiley, New York.
- Gopinathan, K.K., 1992. Estimation of hourly global and diffuse solar radiation from hourly sunshine duration. *Solar Energy*, 48(1):3-5.
- Hay, J.E., 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar Energy*, 23:301-307.
- Hottel, H.C. and W.A. Woertz, 1962. Performance of flat-plate solar heat collector. *Transactions ASME*, 64, 91.
- Iqbal, M., 1978. Estimation of monthly average of the diffuse component of total insolation on a horizontal surface. *Solar Energy*, 20, 101-105.
- , 1983. *An Introduction to solar radiation*. Academic Press, Toronto, Canada.
- Klein, S.A., 1977. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 19, 325.
- Klucher, T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, 23:111-114.
- Koronakis, P.S., 1986. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens Basin Area. *Solar Energy*, 36(3):217-225.
- Liu, J.K. and R.C. Jordan, 1960. The inter-relationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, 1-9.
- , 1962. Daily insolation on surface tilted towards equator. *Transactions ASHRAE E*, 67, 529.
- Page, J.K., 1961. The estimation of monthly mean values of daily total shortwave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40° N- 40° S. Proceedings of UN Conference on New Source of Energy, Paper N° 98.

Pérez, R., P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky and R. Stewart, 1990. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44:271-289.

Sellers, W.D., 1965. *Physical Climatology*. University of Chicago Press, Chicago. 272 pp.

Wright, J., 1988a. Aplicaciones del modelo atmosférico de Barbaro et al. para la estimación de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 12(1-2):89-108.

———, 1988b. Estimación de los promedios diarios y mensuales de la radiación difusa en un plano horizontal en Alajuela, Costa Rica. *Uniciencia*, 5(1-2):39-46.