

CORRELACION ENTRE LA RADIACION SOLAR GLOBAL Y EL NUMERO DE DIAS CON PRECIPITACION PLUVIAL

Jaime Wright
Departamento de Física
Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

RESUMEN

Este trabajo mide el grado de asociación entre los datos experimentales de la radiación solar global y el número de días con precipitación en diez localidades de Costa Rica; con la finalidad de establecer relaciones para la estimación de la radiación solar global cuando no se cuenta con mediciones para un lugar dado.

Los resultados obtenidos son satisfactorios en todas las estaciones actinométricas analizadas en este estudio; en él se hace uso de una relación cúbica para la estimación de la radiación solar global, utilizando el número de días con precipitación.

Para futuros estudios se recomienda probar la aplicabilidad de este modelo estadístico en otras estaciones actinométricas de Costa Rica; esto permitiría la estimación de la radiación solar global en ausencia de mediciones; ello tiene la ventaja de que se puede aplicar a las numerosas estaciones que disponen de datos de precipitación en el país.

ABSTRACT

This work measure the grade of association between experimental data of global solar radiation

and number of days with precipitation in ten locations of Costa Rica; with the aim to establish relations for the estimation of the global solar radiation when these are not available.

The results obtained using a cubic relation are satisfactories for all the actinometric stations analyzed in this work, for the estimation of the global solar radiation using the number of days with precipitation.

It is recommended for future work, to prove the applicability of this statistical model in others actinometric stations of Costa Rica. This would allow one to estimate the global solar radiation in locations lacking with actinometric stations, but having the precipitation data.

INTRODUCCION

Las estaciones que miden la radiación solar en Costa Rica son muy pocas, considerando la gran variabilidad climática y orográfica del país, especialmente en lo concerniente a la nubosidad. Es necesario, por lo tanto, medir el grado de asociación entre la radiación solar, medida en estas estaciones y el parámetro meteorológico del número de días con precipitación, el cual se mide usualmente en un número mayor de estaciones. Estas relaciones estadísticas

con mediciones de radiación, permitirán, entonces, la estimación de la radiación solar en lugares donde ésta no se mide, a partir del concepto climático del número de días con precipitación.

Datos de los valores diarios medios mensuales de la radiación solar global en una localidad, son de uso significativo en el diseño de la mayoría de los equipos que utilizan energía solar. Actualmente las mediciones de insolación son generalmente realizadas en pocos lugares, debido al costo de los equipos requeridos y al cuidado que se necesita para su mantenimiento. Varios intentos, se han realizado para desarrollar relaciones estadísticas para estimar la insolación, basados en otros elementos climáticos, la mayoría de los cuales son medidas, usualmente, en muchas localidades. Angstrom (1924), usando la radiación solar en un día claro, sugirió la utilización del porcentaje de brillo solar, que depende de la nubosidad, como un parámetro para la estimación de la radiación. Lund (1968), correlacionó 9 años de observación de insolación con mediciones de temperatura, viento, nieve, horas de sol, nubosidad, presión y precipitación en Blue Hill, Massachusetts. El halló que las observaciones de las horas de sol, son el mejor medio de predicción de la insolación para todos los meses del año. Norris (1968), encontró una buena correlación entre la cantidad y el tipo de las nubes y la insolación. Wright (1980a y 1980b), aplicó correlaciones lineales entre la radiación solar y el número de horas de brillo solar, humedad relativa, número de días con precipitación y temperatura máxima; concluyó que la duración del brillo solar es el mejor medio de predicción de la radiación global en Costa Rica. Sin embargo encontró que en los restantes tres parámetros climáticos, el coeficiente de correlación lineal dió resultados pobres en cinco estaciones de las diez analizadas, lo que no permitió la aplicabilidad general en Costa Rica. Muy

pocos estudios se han realizado para hallar relaciones estadísticas entre la radiación solar y el número de días con precipitación (Wright, 1980a).

El objetivo de la presente investigación es establecer relaciones para la estimación de la radiación solar global, utilizando el número de días con precipitación pluvial como medio de predicción.

MATERIALES Y METODOS

En el presente trabajo se utilizaron datos de los valores diarios medios mensuales de la radiación solar global (MJ/m² *día) y el número de días con precipitación. Se estimó como día con precipitación aquel en el que la lluvia fue ≥ 0.1 mm.). Estos datos fueron recolectados por el Instituto Meteorológico Nacional, para diez localidades de Costa Rica (Cuadro 1). En las Figuras 1 a 3 del anexo se indican los valores diarios medios mensuales de la radiación solar global y el número de días con precipitación.

Los datos de radiación solar global en Costa Rica se obtienen generalmente a partir de registros diarios efectuados en su mayoría por el Instituto Meteorológico Nacional y por el Instituto Costarricense de Electricidad, mediante el actinógrafo Robytch bimetalico. Se sabe que estos instrumentos no son los mejores para medir la radiación y necesitan mantenimiento y cuidado, frecuentemente. Tomando en cuenta que estos instrumentos se deterioran y pierden gran sensibilidad con el tiempo, en todos los cálculos se utilizaron los datos de períodos no mayores de tres años, después de la instalación de los instrumentos.

En la mayoría de las estaciones pluviométricas del país solamente se realiza una medición de la precipitación por día. Actualmente está establecido que en todas las estaciones pluviométricas la medición del agua recogida se realice desde siete horas (tiempo local) de dicho día, hasta las siete horas del día siguiente. Se procedió a relacionar los datos recolectados por las estaciones pluviométricas, porque son las que tienen la red de información más densa del país, con los de la radiación solar global.

Cuadro 1. Datos y registros utilizados en la estimación de la radiación solar global en Costa Rica.

Estaciones	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)	Registro utilizado
Volcán Irazú	9°53'	83°50'	3400	1972-1973
San José	9°58'	84°54'	1172	1972-1974
Fabio Baudrit	10°01'	83°15'	840	1970-1972
Buenos Aires	9°11'	83°20'	350	1972-1974
Santa Rosa	10°50'	85°37'	315	1972-1974
Nicoya	10°9'	85°27'	120	1971-1973
Palmar Sur	8°57'	83°15'	16	1978-1979
Limón	10°00'	83°03'	5	1970-1972
Puntarenas	9°58'	84°50'	3	1970-1972
Playa Panamá	10°35'	85°40'	3	1979

Un análisis de regresión con base al método de los mínimos cuadrados se elaboró para cada estación, utilizando 12 puntos, uno para cada mes. Se halló que una asociación cúbica de la forma de la Ec. (1) correlaciona mejor los datos de la radiación global y el número de días con lluvia, que una asociación de la forma lineal o cuadrada.

$$Q/Q_0 = a_0 + a_1*(p/P) + a_2*(p/P)^2 + a_3*(p/P)^3 \quad (1)$$

donde: a_0 , a_1 , a_2 y a_3 representan los coeficientes de regresión; Q es la radiación global en un plano horizontal para el período en cuestión; Q_0 es la radiación horizontal en el tope de la atmósfera; p es el número de días con lluvia del mes; P es el número de días del mes.

La variable dependiente es la frecuencia relativa del número de días con lluvia, siendo éste el cociente entre el número de días con lluvia en el mes (p) y el número de días del mes (P).

La radiación solar en una superficie horizontal en el tope de la atmósfera Q_0 , se obtuvo con la fórmula descrita por Klein (1976)

$$Q_0 = 24/\pi [I_0 (1+0.033 \cos (360n/365))] * [(\cos \delta \cos \delta \sin \omega_s + 2\pi W_s/360 \sin \delta \sin \delta)] \quad (2)$$

donde:

I_0 es la constante solar = 4873 KJ/m²*día; n es el día del año (donde: $n = 1$ para el 1 de enero y $n = 365$ para el 31 de diciembre); W_s es el ángulo horario de orto; δ es la declinación del sol = 23.45 sen (360 (284+n)/365); ϕ es la latitud del lugar. En el Cuadro 2 se dan los valores de Q_0 y para el paralelo 10°N de latitud.

El error porcentual medio, denominado como MPE en el Cuadro 3, fue calculado por la siguiente relación:

$$MPE = [\sum(Q_e - Q) \times 100] / N \quad (3)$$

Los signos negativos de los errores individuales no son tomados en cuenta en la sumatoria de la Ecuación (3), por lo que se suman los valores absolutos en todos los errores individuales para calcular el valor medio de MPE.

El error en la raíz media cuadrática (RMSE) fue obtenido de la relación:

$$RMSE = ([\sum(Q - Q_e)] / N)^{1/2} \quad (4)$$

El error en la desviación media (MBE) fue obtenido de la relación

$$MBE = [\sum(Q - Q_e)] / N \quad (5)$$

donde Q y Q_e representan respectivamente, los valores estimados y observados de la radiación global; N es el número total de observaciones. Cuanto menor sea el RMSE, más precisa es la estimación. Un valor positivo de MBE indica una sobreestimación y uno negativo indica un subestimación.

RESULTADOS

Los valores obtenidos por los coeficientes a_0 , a_1 , a_2 y a_3 , el coeficiente de correlación r , el error de la raíz media cuadrática RMSE (Ec. (4)), el error de la desviación media MBE (Ec. (5)) y el error porcentual medio MPE (Ec. (3)) se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Valores medios mensuales de la radiación diaria en una superficie horizontal en el tope de la atmósfera, latitud 10°N (constante solar 4873 KJ*m²*hr⁻¹) en unidades de MJ/m² *día (recomendados por Klein, 1976).

Mes de mes	Número mes	Día del año	Día del Sol	Declinación Solar	Radiación
Enero	1	17	17	-21	31.65
Febrero	2	16	47	-13	34.20
Marzo	3	16	75	-2	36.50
Abril	4	15	105	9	37.47
Mayo	5	15	132	19	37.17
Junio	6	11	162	23	36.59
Julio	7	17	198	21	36.67
Agosto	8	16	228	13	37.09
Setiembre	9	15	258	2	36.67
Octubre	10	15	288	-10	34.70
Noviembre	11	14	318	-19	32.15
Diciembre	12	10	344	-23	30.72

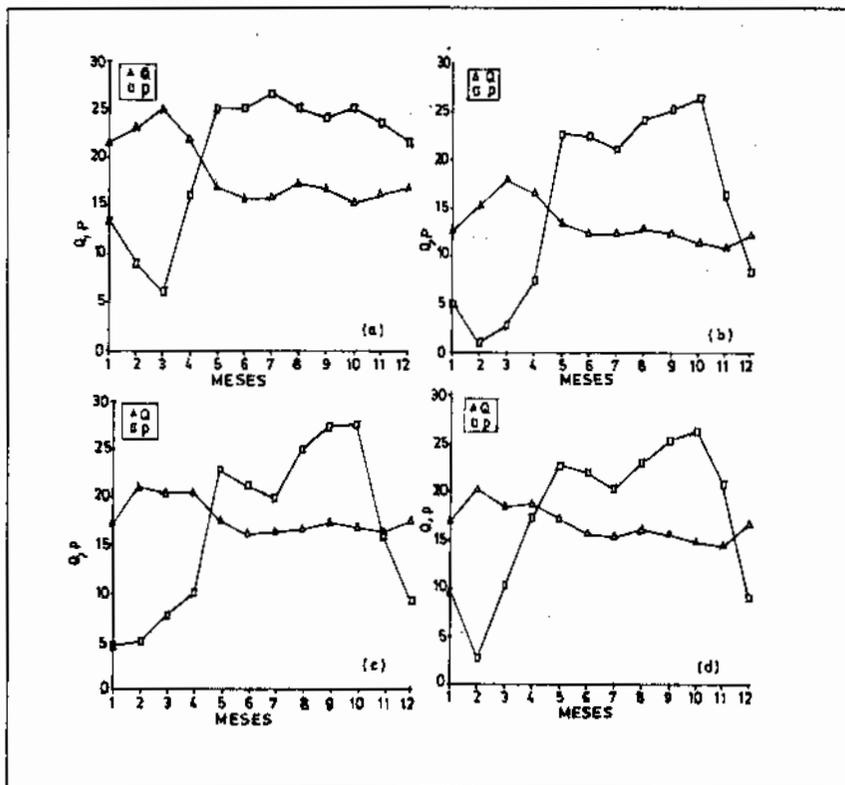


Fig. 1 (a, b, c, d).
Valores diarios medios mensuales de la radiación solar global Q, y el número de días con precipitación p. para (a) Volcán Irazú, (b) San José, (c) Fabio Baudrit, (d) Buenos Aires.

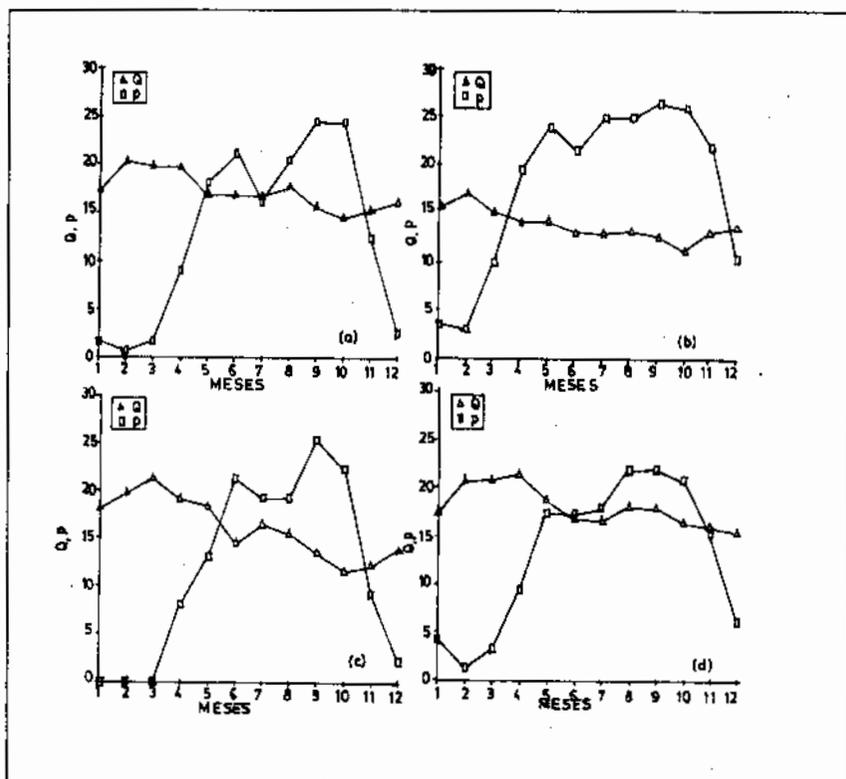


Fig. 2 (a, b, c, d).
Valores diarios medios mensuales de la radiación solar global Q, y el número de días con precipitación p. para (a) Nicoya, (b) Palmar Sur, (c) Playa Panamá, (d) Puntarenas.

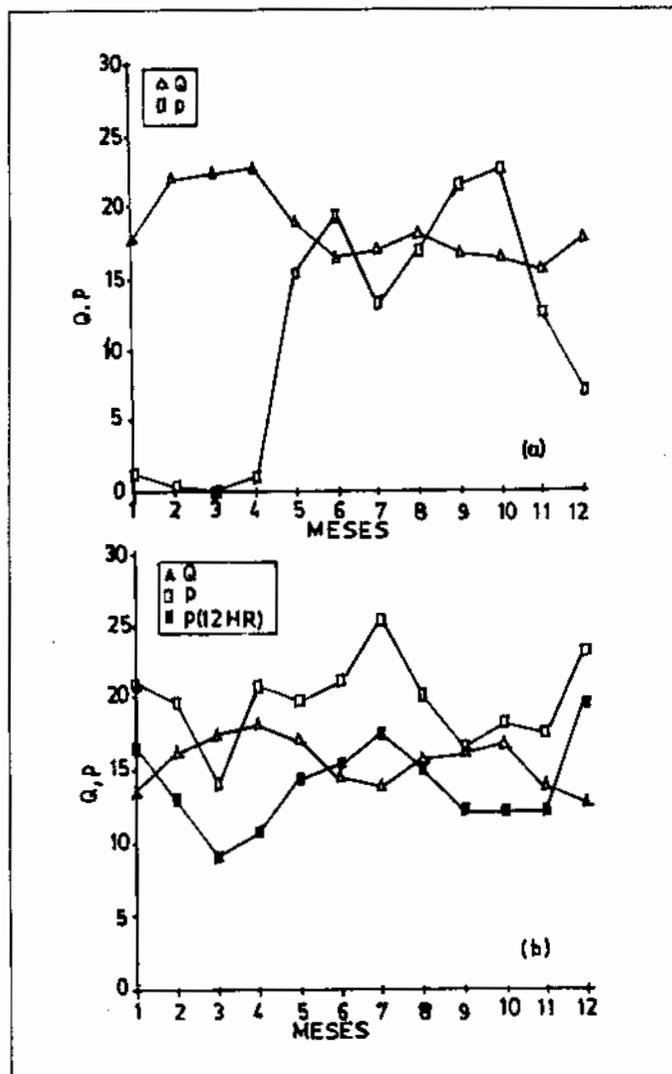


Fig. 3 (a,b).

Valores diarios medios mensuales de la radiación solar global Q , y el número de días con precipitación p , para (a) Santa Rosa, (b) Limón.

Gráficas de la radiación global relativa mensual, Q/Q_0 , en función de la frecuencia relativa del número con lluvia, p/P , se ilustran en las Figs. 4 a 6, en las que se representan las distintas líneas de regresión correspondientes a diferentes lugares de Costa Rica. En las Figs. 4 a 6 se observa que la dispersión de los valores mensuales alrededor de la curva de regresión es variable en las distintas estaciones. Las mayores dispersiones corresponden a las estaciones de Limón (Figs. 6a y 6b). Playa Panamá (Fig. 4c) y Puntarenas (Fig. 4d); estaciones que se encuentran al nivel del mar y sobre la costa. El coeficiente de correlación de

las tres estaciones mencionadas alcanzaron valores de 0.62 y 0.73 para Limón, 0.82 para Playa Panamá y 0.80 para Puntarenas. El mayor coeficiente de correlación, de las estaciones actinométricas analizadas en este estudio, alcanzó a 0.96 en la estación Fabio Baudrit.

Las Figs. 6b (Limón) y 6c (Fabio Baudrit) muestran que a mayor número de días con lluvia corresponde un aumento en la radiación global. Por ejemplo en la estación Fabio Baudrit cuando p/P es mayor que 0.8 Q/Q_0 empieza a aumentar; esto no parece razonable; sin embargo, en los meses de setiembre y octubre se da el caso de que la radiación global es alta cuando existe muchos días con lluvia (Fig. 1c). Aplicando la Ec. (1) a la estación Fabio Baudrit se demuestra que: cuando p/P tiende a uno, Q/Q_0 tiende a 0.50.

En el cuadro 3, en nueve estaciones de las 10 analizadas, los coeficientes de correlación son mayores que 0.80, lo que da un coeficiente de determinación mayor del 64. Este es un resultado comparable a los obtenidos por la fórmula de Angström (Wright, 1980a), con la ventaja de que se puede aplicar a las numerosas estaciones que disponen de datos de precipitación.

En la estación de Limón que está situada al nivel del mar y sobre la costa, el valor porcentual del coeficiente de correlación es pobre (62%) para el caso de lluvias que ocurren entre 7 a.m. y 7 a.m. del día siguiente; sin embargo, para lluvias que ocurren entre 6 a.m. y 6 p.m. del mismo día el valor porcentual del coeficiente de correlación se incrementó en 11 puntos (73%); esto indica que en Limón parte de las lluvias ocurren también en las noches y la nubosidad del día no corresponde a la lluvia, como se ilustra en la Fig. 3b.

Los valores porcentuales del RMSE en las diez estaciones actinométricas analizadas en este estudio, no sobrepasaron el 5%, lo que indica que el número de días con precipitación es un excelente estimador de la radiación global en Costa Rica.

Los valores porcentuales del MBE oscilaron entre +1.9 en el Volcán Irazú y -0.7 en la estación

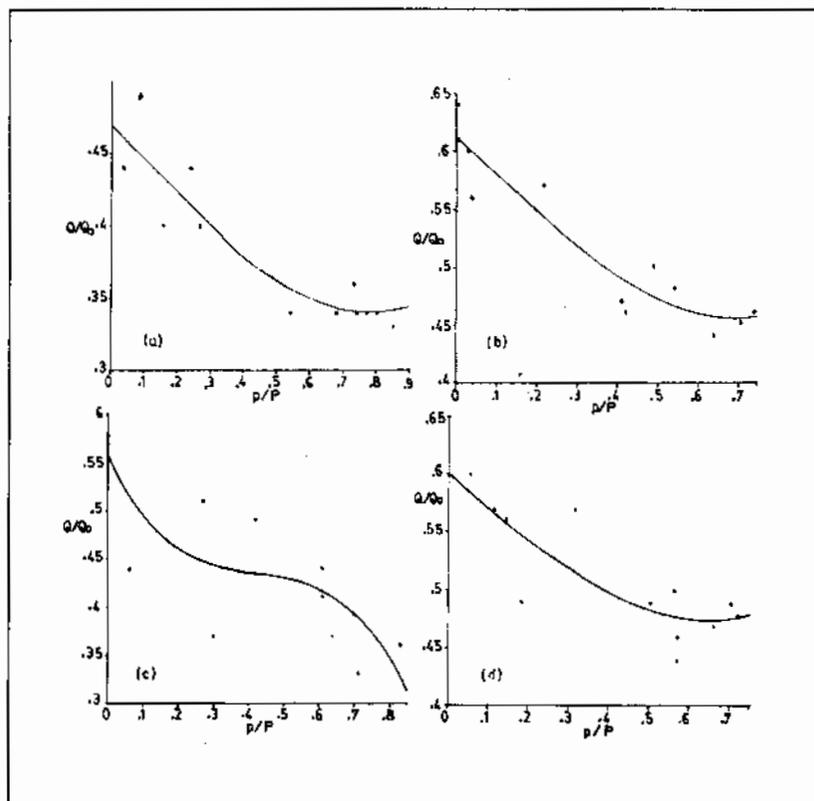


Fig. 4 (a, b, c, d).
Cociente entre la radiación solar global diaria media mensual en el suelo Q , y la radiación extraterrestre Q_0 ; ambas en una superficie horizontal, en función de la frecuencia relativa del número de días con lluvia p/P , para (a) San José, (b) Santa Rosa, (c) Playa Panamá, (d) Puntarenas.

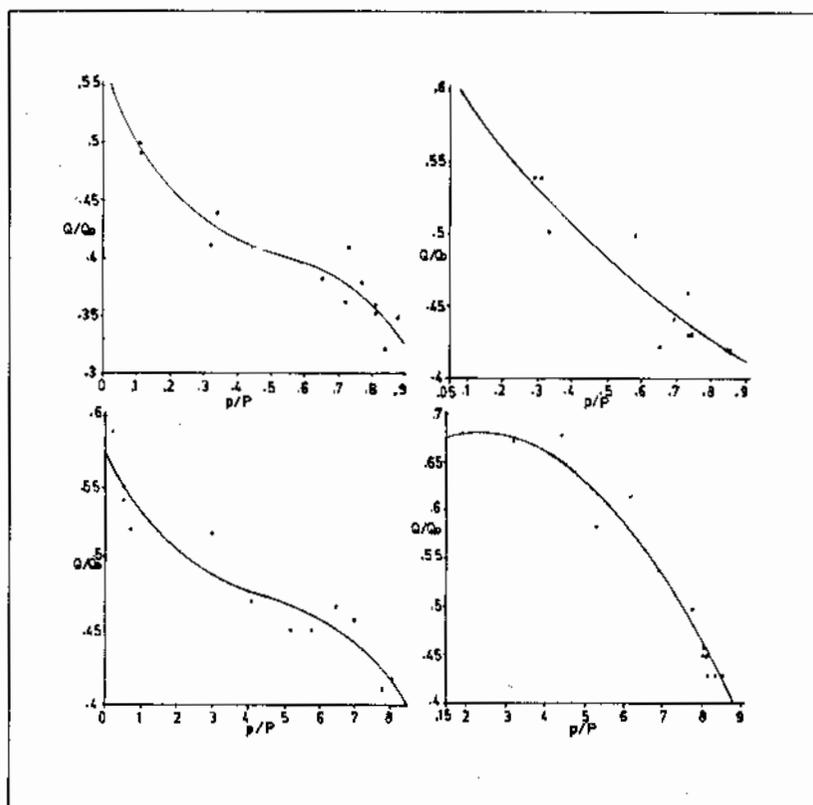


Fig. 5 (a, b, c, d).
Cociente entre la radiación solar global diaria media mensual en el suelo Q , y la radiación extraterrestre Q_0 ; ambas en una superficie horizontal, en función de la frecuencia relativa del número de días con lluvia p/P , para (a) Palmar Sur, (b) Buenos Aires, (c) Nicoya, (d) Volcán Irazú.

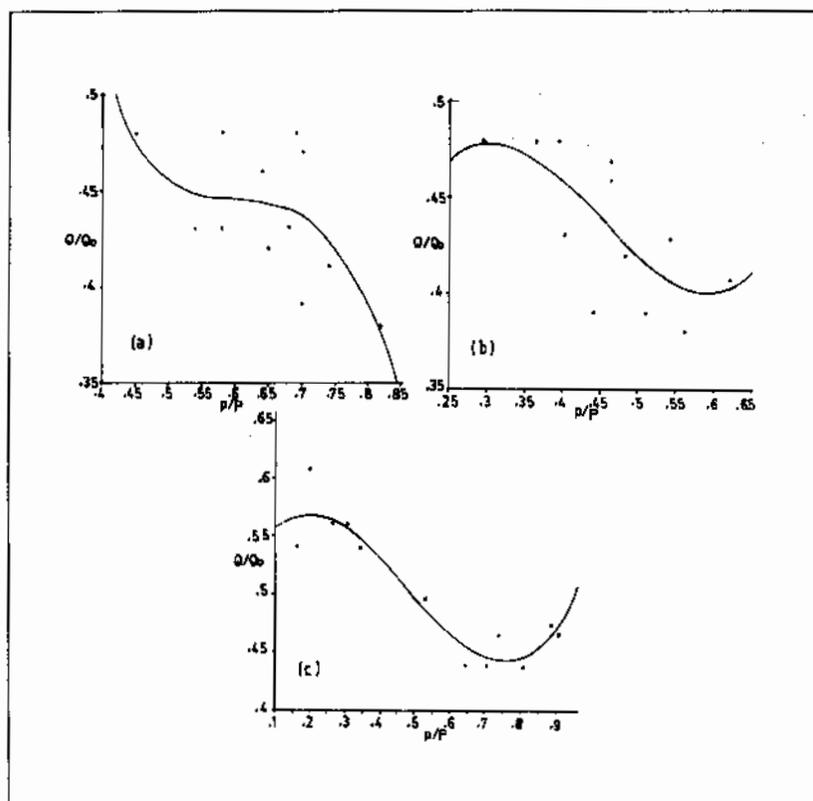


Fig. 6 (a, b, c).

Cociente entre la radiación solar global diaria mensual en el suelo Q , y la radiación extraterrestre Q_0 ; ambas en una superficie horizontal, en función de la frecuencia relativa del número de días con lluvia p/P , para (a) Limón, (b) Limón (12 hr), (c) Fabio Baudrit.

Fabio Baudrit, lo que indica que existe una pequeña sobreestimación de la radiación global en el Volcán Irazú y una pequeña subestimación en Fabio Baudrit. Por lo general los valores del MBE presentados en el cuadro 3 son muy pequeños, ya que sus valores son inferiores al $\pm 2\%$, lo que indica que se da un equilibrio entre los valores sobreestimados (signos positivos) y subestimados (signos negativos) de la radiación global para las diez estaciones actinométricas analizadas en este trabajo.

En general existe una buena concordancia entre los valores estimados y observados de la radiación global; los valores obtenidos por el error porcentual medio (ilustrado como MPE en el Cuadro 3) dan resultados satisfactorios en todos los casos, ya que sus valores oscilan entre 3.1 y 10.0, correspondiendo a la estación Fabio Baudrit el menor valor y a Playa Panamá el mayor valor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha obtenido una correlación no lineal (forma polinomial de tercer grado) entre la radiación solar y el número de días con precipitación, con un resultado comparable con el método de Angström, utilizado por Wright (1980a) en algunas estaciones actinométricas de Costa Rica.

Los valores obtenidos del RMSE, MBE y r son satisfactorios, lo que indica que el número de días con lluvia es un buen medio de predicción de la radiación global en Costa Rica.

Se recomienda seguir probando la aplicabilidad de este modelo estadístico en otras estaciones actinométricas; esto permitiría la estimación de la radiación global en lugares en los que no existen datos actinométricos, con la ventaja de que se puede aplicar a las numerosas estaciones que disponen de datos de precipitación en el país.

Cuadro 3. Valores de los coeficientes de regresión a_0 , a_1 , a_2 y a_3 en la ecuación $Q/Q_0 = a_0 + a_1 (p/P) + a_2 (p/P)^2 + a_3 (p/P)^3$ y con base en la frecuencia relativa de días con lluvia y la radiación solar global, r es el coeficiente de correlación; RMSE es el error de la raíz media cuadrática, MBE es el error de la desviación media; y MPE es el error porcentual medio.

Estación	a_0	a_1	a_2	a_3	r	RMSE	MBE	MPE
Puntarenas	0.5980	-0.2065	-0.0230	-0.1124	0.80	0.030	0.011	4.4
Nicoya	0.5735	-0.4062	0.6179	-0.3828	0.92	0.022	0.010	4.0
Buenos Aires	0.6053	-0.2761	0.0899	-0.0083	0.95	0.019	0.006	3.7
Palmar Sur	0.5629	-0.6755	1.0310	-0.5932	0.92	0.023	0.013	5.1
Volcán Irazú	0.6749	0.1257	-0.5504	-0.1359	0.96	0.034	0.019	5.9
Fabio Baudrit	0.5596	0.2112	-1.1510	0.8872	0.93	0.020	-0.007	3.1
San José	0.4699	-0.2032	-0.0541	0.1313	0.92	0.020	0.004	4.0
Playa Panamá	0.5553	-0.6348	1.1800	-0.7837	0.82	0.050	0.013	10.0
Santa Rosa	0.6113	-0.2151	-0.1022	0.1617	0.92	0.028	0.014	4.2
Limón	0.5109	-0.3935	0.8155	-0.5878	0.62	0.029	-0.003	6.1
Limón (12 hr)	0.4699	0.1438	-0.6186	0.4172	0.73	0.027	0.008	5.4

LITERATURA CITADA

- Angstrom, A.K. 1924. Solar and Atmospheric Radiation. J.R. Meteorol. Soc. 50: 121.
- Klein, S.A. 1976. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. Solar Energy 19: 325.
- Lund, I.A. 1968. Relationship between insolation and other surface weather observation at Blue Hill, Massachusetts. Solar Energy 12: 95.
- Norris, D.J. 1968. Correlation of solar radiation with clouds. Solar Energy 12: 107.
- Wright, J. 1980a. Estimación de la radiación solar global en Costa Rica utilizando horas de sol y otros datos meteorológicos. Revista Geográfica de América Central 11-12: 157-166.
- Wright, J. 1980b. Correlación lineal entre la radiación solar global y algunos parámetros climáticos en Costa Rica. Revista Geográfica de América Central 11-12: 167-172.