

ESTIMAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A PARTIR DE LA INSOLACIÓN RELATIVA, LA OSCILACIÓN TERMOMÉTRICA Y LA PRECIPITACIÓN

José A. GUIJARRO

Instituto Nacional de Meteorología. Centro Meteorológico en Illes Balears, Palma de Mallorca

RESUMEN

Para estimar la radiación solar recibida en lugares o periodos en los que no existen medidas se suelen emplear expresiones que la calculan a partir de la insolación relativa o, si no se dispone de ésta, a partir de la temperatura o la precipitación. En este trabajo se ajustan, mediante análisis de regresión múltiple, algunas de estas ecuaciones a los datos de radiación solar diaria de los tres observatorios de Baleares que poseen medidas, y se contrastan posteriormente con un conjunto independiente de datos. Las ecuaciones que únicamente usan datos de temperatura y precipitación presentan errores típicos de 3,0 MJ/m² que, aunque claramente superiores a los de las ecuaciones en función de la insolación relativa (1,5 a 1,8 MJ/m²), resultan todavía útiles para evaluar la radiación solar recibida en zonas carentes de estos datos.

Palabras clave: Estima, Cálculo, Método, Radiación Solar, Insolación, Temperatura, Precipitación

ABSTRACT

The estimation of solar radiation in places or time periods lacking such data is usually performed with expressions that compute it from relative sunshine hours or, if these are not available, from temperature or precipitation. In this work, some of these equations are adjusted, through multiple correlation analysis, to the three Balearic observatories that have these measures, and tested against an independent data set. The equations that only use temperature and precipitation data are affected by root mean squared errors of 3.0 MJ/m² that, though clearly higher than those of the equations using relative sunshine hours (1.5 to 1.8 MJ/m²), are still useful to evaluate the solar radiation received in zones without these data.

Key words : Estimation, Method, Solar Radiation, Insolation, Sunshine Hours, Temperature, Precipitation, Rainfall

1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar recibida en un lugar (o irradiación solar del mismo) ha sido un elemento climatológico de gran importancia para estudios agronómicos y ambientales en general, y en los últimos años ha cobrado mayor importancia por su creciente uso como fuente alternativa de energía.

Sin embargo, el elevado precio del instrumental necesario hace que la densidad de los observatorios que realizan estas medidas sea bastante baja. Ello no es un gran problema en zonas llanas, donde la variación espacial de la radiación solar suele ser baja, pero cuando la orografía es más irregular pueden aparecer diferencias en la distribución de la nubosidad que se traduzcan en una elevada variabilidad de la irradiación solar de la superficie.

Conviene aclarar aquí que, en lo sucesivo, al hablar de radiación solar nos estaremos refiriendo a la radiación solar global (directa más difusa) recibida por una superficie horizontal libre de obstáculos, y su variabilidad se entenderá como la debida a factores meteorológicos únicamente (transparencia atmosférica). Las variaciones en la radiación solar incidente en una superficie debidas a la inclinación y orientación de la misma, así como a las sombras proyectadas por las elevaciones del terreno, se podrán calcular posteriormente a partir de los valores de radiación solar global en la horizontal y un perfil del horizonte del lugar.

Para estimar valores de radiación solar en ubicaciones sin datos se ha recurrido normalmente a utilizar la insolación relativa (relación entre las horas de sol efectivas y las máximas teóricamente posibles) como variable evaluadora de la influencia de la nubosidad en la radiación que llega al suelo. Una ecuación clásica que da buenos resultados es la propuesta por Prescott (PRESCOTT, 1940; BLACK *et al.*, 1954): $G = G_0 (a + b I_r)$, siendo G la radiación solar, G_0 la radiación que se tendría en ausencia de atmósfera, I_r la insolación relativa, y a y b constantes que varían según el observatorio de aplicación. Estas constantes se obtienen mediante análisis de regresión lineal entre los cocientes G / G_0 y los datos de insolación relativa, y los valores de G_0 se pueden calcular mediante expresiones adecuadas (KONDRATYEV, 1969; ONRUBIA *et al.*, 1976). Otros trabajos que relacionan la radiación solar con las horas de sol son los de BENNET (1968), CALVET (1976), SCHULZE (1976), ALMANZA y LÓPEZ (1978), RIETVELD (1978), BOISVERT *et al.* (1990), etc.

Esta ecuación se había ensayado anteriormente con éxito en Baleares, aplicándola a los tres observatorios de los que se dispone de medidas: Palma de Mallorca, Aeropuerto de Mahón y Aeropuerto de Ibiza (GUIJARRO, 1981 y 1997). De esta forma se pueden calcular datos estimados de radiación solar en tres observatorios más, todos ubicados en Mallorca, que tienen series de horas de sol efectivo: Aeropuerto de Palma, Sa Canova (Sa Pobla) y Puerto de Pollensa.

Sin embargo, observando la situación de estos observatorios en el mapa de la figura 1, se comprueba cómo las zonas con orografía más acusada (hasta 1440 m de altitud en la sierra de Tramuntana de Mallorca) permanecen al margen de los mismos, pudiendo darse condiciones de nubosidad, y por tanto de radiación solar, muy diferentes de unas vertientes a otras.

Para paliar este déficit de medidas diversos autores han relacionado los valores de radiación solar con otros parámetros meteorológicos, como la humedad (FITZPATRICK y NIX, 1970), temperatura (BRISTOW y CAMPBELL, 1984; RICHARDSON, 1985; MEZA y VARAS, 2000), precipi-

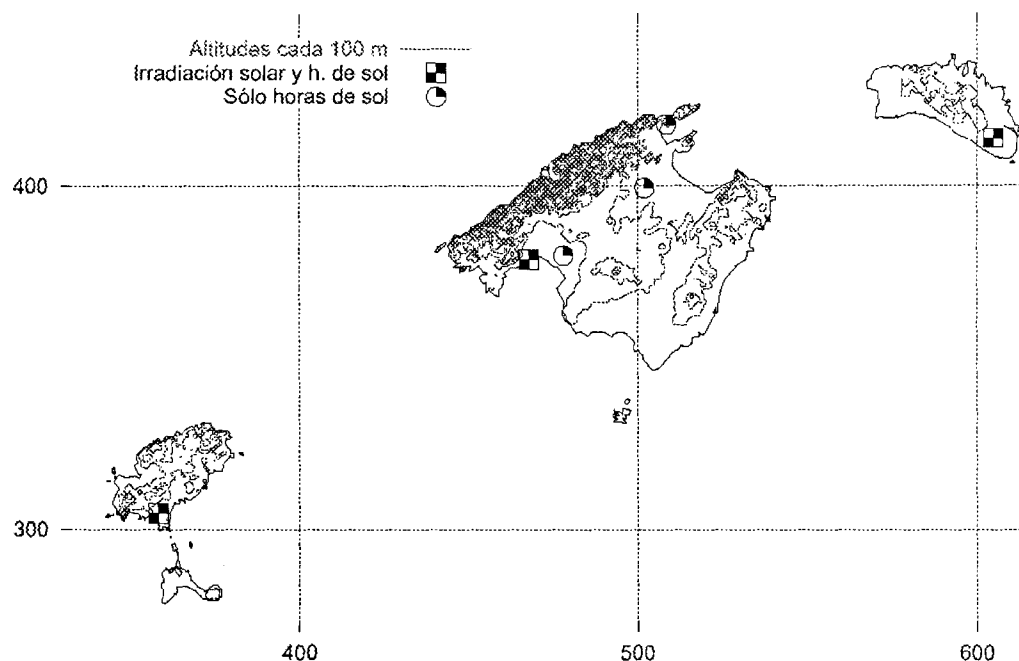


Fig. 1: Situación de los observatorios que miden radiación solar y horas de insolación.

tación (McCASKILL, 1990), o una combinación de varios de ellos (HOOK y McCLENDON, 1992; KUYE y JAGTAP, 1994; LIU y SCOTT, 2001).

Como quiera que en Baleares, aparte de los observatorios que miden horas de sol, solamente hay 5 con medidas de humedad (todos ellos en Mallorca), en este trabajo nos restringiremos al estudio de las relaciones de la radiación con la temperatura y la precipitación (además de la insolación relativa a efectos de comparación), dado que lo que se intenta es mejorar en lo posible la resolución espacial de la climatología de la radiación, y disponemos de 37 estaciones termopluviométricas (25 en Mallorca, 5 en Menorca, 6 en Ibiza y 1 en Formentera).

2. METODOLOGÍA

Primeramente se recopilaron, de los archivos del Centro Meteorológico en Illes Balears, los datos diarios simultáneos de radiación solar global, insolación relativa, oscilación termométrica (diferencia entre las temperaturas extremas diarias) y precipitación en 3 ficheros (uno por cada observatorio considerado). Los periodos que abarcan están limitados por los de funcionamiento de los sensores de radiación, por lo que el número de datos disponibles es distinto para cada observatorio.

Tabla 1: OBSERVATORIOS Y NÚMERO DE DÍAS CON DATOS SIMULTÁNEOS DE RADIACIÓN, INSOLACIÓN, OSCILACIÓN TERMOMÉTRICA Y PRECIPITACIÓN

Observatorio	Periodo	Número de días con datos		
		regresión	control	total
Palma Portopí	1976-00	4062	1353	5415
Aeropuerto de Menorca	1976-90	2030	676	2706
Aeropuerto de Ibiza	1982-89, 1994-98	2728	909	3637

Como se aprecia en la tabla 1, para cada observatorio se utilizarán tres datos de cada cuatro para los análisis de regresión, mientras que el otro 25 % servirá de control, para contrastar la bondad de los ajustes con un conjunto independiente de datos.

En la relación de datos de precipitación aparece con cierta frecuencia un valor no numérico, lp , que significa que se observó precipitación pero en cantidad inapreciable. Puesto que la resolución de los datos es de 0,1 mm, una cantidad inapreciable sería cualquiera inferior a 0,05 mm (que se redondearía a 0,1), por lo que se procedió a substituir todos los lp por el valor 0,03.

Las relaciones entre la radiación y las demás variables se analizaron mediante regresión lineal múltiple. Sin embargo, algunas de las ecuaciones propuestas en la literatura no son lineales. Tal es el caso, por ejemplo, de la expresión hallada por BRISTOW y CAMPBELL (1984):

$$G = G_0 a (1 - e^{-bO_t^c})$$

donde O_t es la oscilación termométrica, G y G_0 las radiaciones solar global y en ausencia de atmósfera, y a , b y c las constantes de ajuste.

Podemos ver que cuando O_t es muy grande, $e^{-bO_t^c}$ tiende a 0, y por tanto $a = G / G_0$ representa la fracción de radiación solar que alcanzaría el suelo en condiciones de máxima transparencia atmosférica. Tras añadir a los ficheros anteriores los valores calculados de G_0 , se estudiaron los máximos valores de dicha fracción en nuestros observatorios, y se adoptó el valor $a = 0,8$. Entonces, y llamando G_r (radiación relativa) a los cocientes G / G_0 , podemos transformar la ecuación anterior en:

$$1 - G_r / 0,8 = e^{-bO_t^c}$$

con lo que, tomando logaritmos dos veces, tenemos:

$$\ln(1 - G_r / 0,8) = -bO_t^c \quad \ln(-\ln(1 - G_r / 0,8)) = \ln b + c O_t$$

que ya es de la forma $y = a + b x$.

En cuanto a los datos de temperatura, se suele usar la diferencia entre la máxima y la mínima (oscilación termométrica diaria) como indicador de la intensidad de los intercambios radiativos que ha habido entre la superficie terrestre y el "cielo" (atmósfera terrestre y espacio exterior). Sin embar-

go la oscilación de la temperatura también depende, por un lado, de otras variables que modifican los términos del balance energético, como el viento (que no se analiza en este trabajo porque también se mide en pocos observatorios), y por otro, de las condiciones topográficas del lugar. Así, en amplias depresiones del terreno la oscilación termométrica tiende a ser mayor, al favorecerse tanto la acumulación de aire frío durante la noche como la concentración de radiación solar reflejada de los alrededores durante el día. En cambio, en las cimas o dorsales de las colinas el mayor intercambio de flujo de calor sensible entre el suelo y el aire suaviza considerablemente los contrastes termométricos entre el día y la noche. (En la montaña mallorquina tenemos un ejemplo de ello en las oscilaciones termométricas medias anuales de Lluc, 11,0°C, en un valle amplio, y en la cima del pico de Alfàbia, 5,5°C).

Esta influencia topográfica local en los valores de la oscilación termométrica no tendrá ningún efecto en su mayor o menor regresión con la radiación, pero puede hacer que los coeficientes de la ecuación de ajuste sean de escasa aplicabilidad a lugares con distintas condiciones topográficas, por lo que aquí se propone usar oscilaciones termométricas *tipificadas* (O_{II}), obtenidas sustrayendo a cada oscilación su valor medio y dividiendo por su desviación típica.

Los datos de precipitación también se suelen transformar, bien logarítmicamente, por radicación, o incluso en forma de variable binaria (presencia o ausencia de precipitación: McCASKILL, 1990). En el caso de la transformación logarítmica se ha asignado aquí el valor -7 a los días sin precipitación (que correspondería, utilizando la base e , a una precipitación aproximada de una milésima de mm), por considerarlo suficientemente alejado del valor -3,5 de los días con precipitación inapreciable ($\ln(0,03)$).

Así pues, se procedió a complementar los datos originales con otros derivados, hasta totalizar las siguientes 15 variables:

1. Radiación solar global, G
2. Insolación relativa, I_r
3. Oscilación termométrica, O_r
4. Precipitación, P_r
5. $\ln G$
6. Radiación solar en ausencia de atmósfera, G_0
7. $\ln G_0$
8. Radiación solar relativa, G_r
9. $\ln G_r$
10. $G_{2l} = \ln (-\ln (1-G_r / 0.8))$
11. $\ln O_r$
12. Oscilación termométrica tipificada, O_{II}
13. $\ln O_{II}$
14. $\ln P_r$
15. Presencia (1) o ausencia (0) de precipitación, K_{Pr}

Después se procedió a efectuar sendos análisis de regresión múltiple utilizando como variables dependientes la radiación solar global (1), la radiación solar relativa (8), sus respectivas transformaciones logarítmicas (5 y 9), y la doble logarítmica de la ecuación de Bristow y Campbell (10). El resto de las variables constituyó el conjunto de predictores (variables independientes), aunque la insolación relativa (2) sólo se usó en dos de los análisis.

Una consecuencia de que las distintas ecuaciones obtenidas estimen variables diferentes es que el coeficiente de determinación múltiple (R^2) no puede servir como criterio de evaluación de aquéllas. Por ello, para comparar la bondad de las ecuaciones lo que se hizo fue aplicarlas a los conjuntos de datos que se reservaron para ello y, tras deshacer las transformaciones, obtener valores estimados de la radiación (\hat{G}), que se compararon con los observados calculando las desviaciones $\hat{G} - G$.

El principal criterio para evaluar las ecuaciones fue entonces el error típico (raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las desviaciones), aunque también se prestó atención al sesgo de las estimaciones (desviaciones medias).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ecuaciones que estimaban directamente la radiación global (G) dieron peores resultados que las que estimaban la radiación relativa (G/G_0), y la estima de los logaritmos de esta última no mejoraron los resultados. Del resto de relaciones ensayadas se presentan en la tabla 2 los resultados de las cinco ecuaciones más relevantes.

Tabla 2. ERRORES TÍPICOS DE LAS DISTINTAS ECUACIONES AL CONTRASTARLAS CON OBSERVACIONES INDEPENDIENTES EN LOS TRES OBSERVATORIOS UTILIZADOS

Ecuación	Errores típicos (MJ/m^2)		
	Palma	A. Menorca	A. Ibiza
I: $G_r = f(I_r)$	1.51	1.80	1.73
II: $G_{2t} = f(O_t)$	3.75	3.36	3.49
III: $G_r = f(G_0, O_t, P_r)$	3.15	2.94	3.03
IV: $G_r = f(I_r, G_0, O_t, P_r)$	1.42	1.74	1.68
V: $G_r = f(G_0, O_{tt}, P_r)$	3.03	2.97	2.97

La ecuación I es la clásica de tipo Prescott, $G = G_0 (a + b I_r)$, recalculada aquí con los mismos datos que las demás a efectos de comparación. Los coeficientes obtenidos para Palma, A. de Menorca y A. de Ibiza son, respectivamente, $a = 0.22, 0.27$ y 0.28 , y $b = 0.52, 0.44$ y 0.47 .

Las dos siguientes son la de Bristow y Campbell, con una doble transformación logarítmica y función únicamente de la oscilación termométrica, y la ajustada a todas las variables independientes disponibles excepto la insolación relativa. Se observa que el ajuste de esta última es mejor que el de la ecuación II.

En esta ecuación III resultaron seleccionados como predictores, en los tres observatorios, los logaritmos de la oscilación termométrica y de la precipitación, mientras que la oscilación termométrica (sin transformar), la precipitación, la radiación sin atmósfera, y la versión binaria de la precipitación sólo resultaron significativas en alguno de los observatorios. (El nivel de significación requerido en todos los análisis fue el de $\alpha = 0,01$, si bien la mayoría de las variables escogidas resultaron también significativas al nivel de 0,001).

La ecuación IV es similar a la III, pero incluyendo también a la insolación relativa como variable predictora. Se trata de comprobar si la inclusión de la temperatura y la precipitación mejora los resultados de la ecuación clásica. Se observa que esta mejora es relativamente pequeña (unas centésimas de MJ/m²) y, en todo caso, el propósito de una ecuación como ésta sería el de servir para completar las lagunas de datos en las series de radiación de cada observatorio, y no el de aumentar la resolución espacial de la radiación global.

Para esto último es para lo que se ha obtenido la ecuación V, que no es sino una versión de la III con dos peculiaridades. La primera consiste en haber sido ajustada a los datos de los tres observatorios conjuntamente, para dotarla de la máxima generalidad. Y la segunda en haber suprimido la oscilación termométrica (y su logaritmo) como posibles variables predictoras, dejando únicamente la variante tipificada de ese parámetro (O_{II}), con objeto de que las estimas dependan lo menos posible de la influencia de las condiciones topográficas sobre la oscilación de temperatura, como se ha expuesto anteriormente.

Hay que reseñar que en ninguno de los tres observatorios el método de regresión múltiple había seleccionado a O_{II} en la ecuación III, habiéndose decantado en su lugar por O_I (sólo en Palma) y su logaritmo (en los tres lugares). Sin embargo esto se puede explicar por la similitud que presentan las medias (de 7,2 a 7,9 C) y desviaciones típicas (de 2,0° a 2,3°C) de O_I en los tres observatorios. De hecho, al aplicar esta ecuación generalizada a los datos independientes de cada estación, los errores típicos no se diferencian significativamente de los obtenidos con la ecuación III (aun contando ésta con coeficientes adaptados a cada observatorio).

En cuanto a la precipitación, resulta curioso que sus tres parámetros contribuyan significativamente a esta ecuación, que adopta la forma:

$$G = G_0 (0.4265 + 0.002 G_0 + 0.0452 O_{II} - 0.0023 P_r - 0.00149 \ln P_r - 0.0323 K_{Pr})$$

En la figura 2 se puede observar la nube de puntos obtenida al comparar los datos estimados al aplicar esta ecuación a los datos de prueba de las tres estaciones con los realmente observados. La parte más densa de la nube de puntos se ajusta bien a la recta identidad ($y = x$), pero también se observan desviaciones considerables. No obstante, dado el bajo sesgo de las estimas (0,01 MJ/m² en Palma, 0,06 en Menorca y -0,38 en Ibiza) en promedios de 10 días los errores típicos bajan a valores de entre 1,08 (Palma) y 1,42 MJ/m² (Menorca), y los mensuales hasta 0,75 (Palma) a 1,12 MJ/m² (Menorca). En la figura 3 se puede comparar la distinta magnitud de los errores de la radiación estimada en Palma para valores diarios y promedios mensuales.

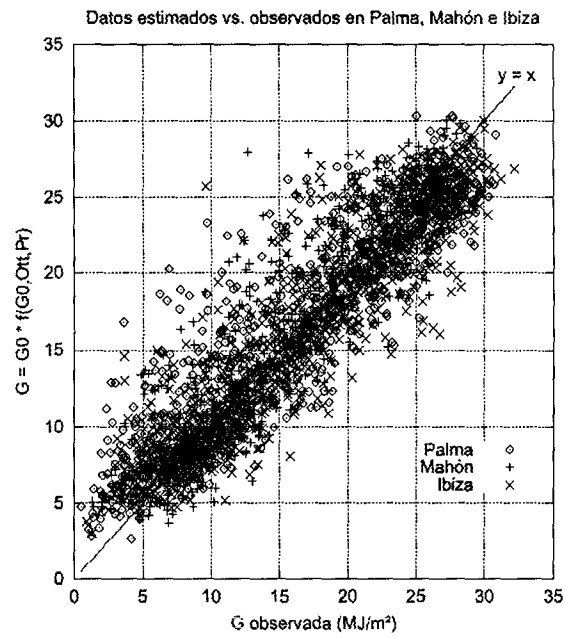


Fig. 2: Comparación de los datos estimados mediante la ecuación generalizada con los observados en los tres observatorios utilizados.

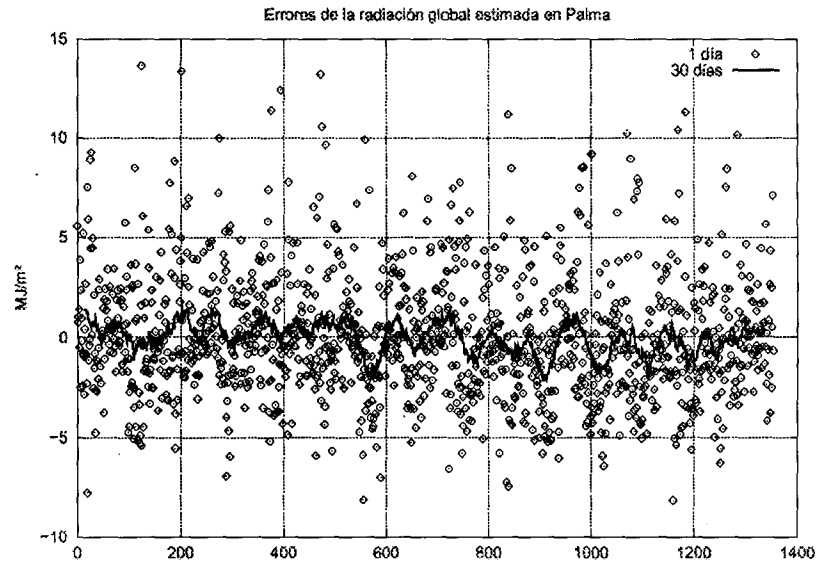


Fig. 3: Errores en la estima de la radiación global diaria de Palma de Mallorca, con medias móviles de 30 días. (Ecuación general para Baleares, aplicada a datos independientes).

3. CONCLUSIÓN

Mediante la expresión hallada se pueden estimar datos de radiación solar en 37 estaciones de Baleares (25 en Mallorca, 5 en Menorca, 6 en Ibiza y 1 en Formentera), en lugar de sólo las 6 que cuentan con medidas de la misma o de insolación relativa.

Los valores diarios presentan errores típicos de 3 MJ/m², pero el bajo sesgo de las estimaciones hace que los errores típicos de los promedios mensuales disminuyan hasta valores comprendidos entre 0,75 y 1,12 MJ/m².

Para interpolar lagunas en las series de datos de radiación sigue siendo preferible emplear la regresión con la insolación relativa, sin que la adición de la oscilación termométrica y la precipitación produzca mejoras apreciables en las estimas.

4. REFERENCIAS

- ALMANZA, R. y LÓPEZ, S. (1978): "Total solar radiation in Mexico using sunshine hours and meteorological data". *Solar Energy*, 21, 441-448.
- BENNET, I. (1968): "Correlation of daily insolation with daily total sky cover, opaque sky cover and percentage of possible sunshine". *Solar Energy*, 12, 391-393.
- BLACK, J.N., BONYTHON, C. y PRESCOTT, J.A. (1954): "Solar radiation and duration of sunshine". *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 80, 231.
- BOISVERT, J.B., HAYHOE, H.N. y DUBE, P.A. (1990): "Improving the estimation of global solar radiation across Canada". *Agric. and Forest Meteorology*, 52, 275-286.
- BRISTOW, K. y CAMPBELL, G.S. (1984): "On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature". *Agric. and Forest Meteorology*, 31, 159-166.
- CALVET, C. (1976): « Rayonnement global et duree de l'insolation au Maroc. *La Météorologie*, 5, 171-175.
- FITZPATRICK, E.A. y NIX, H.A. (1970): "The climatic factor in Australian grassland ecology". En MILTON MOORE, R. (Ed.): "*Australian Grasslands*". Australian Nat. Univ. Press, Canberra, pp. 3-26.
- GUIJARRO, J.A. (1981): "Primeras medidas de irradiación solar en Palma de Mallorca. Relación con la insolación". *Bol. Soc. Hist. Nat. Bal.*, 25, 31-38.
- GUIJARRO, J.A. (1997): "Irradiación solar en Baleares". *Boletín Mensual Climatológico* (I. Baleares), 54, 121-128.
- HOOK, J.E. y McCLENDON, R.W. (1992): "Estimation of solar radiation data missing from long-term meteorological records". *Agron. J.*, 84, 739-742.
- KONDRATYEV, K.Y. (1969): "*Radiation in the atmosphere*". Acad. Press, 912 pp.
- KUYE, A. y JAGTAP, S.S. (1994): "Correlation of solar radiation with climatological data for Port Harcourt, Nigeria". *Int. Jour. Climatol.*, 14, 815-825.

- LIU, D.L. y SCOTT, B.J., (2001): "Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations". *Agric. and Forest Meteorology*, 106, 41-59.
- McCASKILL, M.R. (1990): "An efficient method for generation of full climatological records from daily rainfall". *Aust. J. Agric. Res.*, 41, 595-602.
- MEZA, F. y VARAS, E. (2000): "Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature". *Agric. and Forest Meteorology*, 100, 231241.
- ONRUBIA, J., MARTINEZ, J.A. y TEJERINA, F. (1976): "Estudio alternativo del cálculo de la radiación solar sobre una superficie horizontal en el límite de la atmósfera". *II Asamb. Nac. Geodes. Geofís.*, pp. 877-892.
- PRESCOTT, J.A. (1940): "Evaporation from a water surface in relation to solar radiation". *Trans. R. Soc. S. Austr.*, 64, 114-118.
- RICHARDSON, C.W. (1985): "Weather simulation for crop management models". *Trans. ASAE*, 28, 1602-1606.
- RIETVELD, M.R. (1978): "A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine". *Agric. and Forest Meteorology*, 100, 231241.
- SCHULZE, R.E. (1976): "A physically based method of estimating solar radiation from sun-cards". *Agric. and Forest Meteorology*, 16, 85-101.