

DETERMINACION DE LA CORRELACION ENTRE LA DURACION RELATIVA DE LA INSOLACION Y LA RADIACION GLOBAL MEDIDA POR LA RED SOLARIMETRICA

H. GROSSI GALLEGOS\*, R. LOPARDO, G. ATIENZA,  
M. GARCIA y M. PERALTA

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales  
Centro Espacial San Miguel, Red Solarimétrica  
Avda. Mitre 3100, 1663 San Miguel, Buenos Aires

RESUMEN

El presente trabajo pretende ser una actualización de las relaciones halladas entre los promedios mensuales del cociente de la radiación global diaria y la extraterrestre, y los de heliofanía relativa, establecidas en Argentina hace más de diez años, introduciendo en esta oportunidad algunas correcciones en las variables a correlacionar. Se muestra una correlación general para toda la zona cubierta por la Red y, de manera alternativa, dos correlaciones para sendas zonas. Como conclusión, se recomienda el uso de esta metodología en los estudios de factibilidad de las aplicaciones de la energía solar en regiones no cubiertas por la Red Solarimétrica.

1. INTRODUCCION

Los datos obtenidos en las estaciones de una red solarimétrica convencional no pueden satisfacer todas las necesidades de los usuarios potenciales de la energía solar dada la relativamente baja densidad de las redes en prácticamente todas las regiones del mundo.

Se han hecho numerosos intentos para suplementar la base de datos observacionales con valores calculados; los modelos utilizados van desde aquéllos que tienen una fuerte base teórica y que demandan grandes cantidades de datos y requerimientos computacionales, como los de Hoyt (1) y Atwater y Ball (2), hasta aquéllos que se basan en simples correlaciones empíricas que demandan un menor volumen de datos y tiempo de computación, como los de Angstrom (3) y sus modificaciones.

En los últimos años, los satélites meteorológicos han ofrecido otra oportunidad de mejorar el conocimiento de la distribución de la radiación solar a nivel de mesoescala (4-

11) pero todavía es necesario mejorar la metodología para que se pueda transformar en una fuente rutinaria y rigurosa de datos de radiación.

Localmente, las correlaciones simples a que se hizo mención fueron establecidas hace más de diez años (12-14), permitiendo el trazado de las bien conocidas Cartas de Radiación Global (15), que fueran utilizadas por muchos años como única referencia vigente.

La elaboración preliminar de los datos de la Red Solarimétrica, obtenidos desde enero de 1979 hasta diciembre de 1982 en 25 de sus estaciones, permitió disponer de información sobre la variación espacio-temporal de la radiación solar global diaria medida sobre plano horizontal en Argentina (16).

Incorporando los valores diarios correspondientes al año 1983, lo que eleva el número de datos por encima de los 30.000, se elaboró recientemente un mapa con la distribución anual de la radiación solar, el que se presenta en la figura 1, con una resolución de  $0,5 \text{ kWh/m}^2$ .

El presente trabajo presenta una actualización de las relaciones halladas entre los promedios mensuales del cociente de la radiación global y la extraterrestre, y los de la heliofanía relativa, teniendo en cuenta que el gran número de estaciones que miden este último valor permitiría mejorar la cobertura ofrecida por la Red Solarimétrica.

2. CONSIDERACIONES PREVIAS

La dispersión que presentan los datos correlacionados linealmente a lo largo del año en todas las estaciones de la Red utilizadas en este trabajo puede verse en la figura 2, en la que se han representado en función del promedio mensual de la heliofanía relativa los promedios mensuales del índice de claridad  $H/H_0$  para las 25 estaciones que presentan ambos datos. El número de promedios mensuales utilizados fue de 1512 y los valores hallados para la

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

DETERMINACION DE LA CORRELACION ENTRE LA DURACION RELATIVA DE LA INSOLACION Y LA RADIACION GLOBAL MEDIDA POR LA RED SOLARIMETRICA

H. GROSSI GALLEGOS\*, R. LOPARDO, G. ATIENZA,  
M. GARCIA y M. PERALTA

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales  
Centro Espacial San Miguel, Red Solarimétrica  
Avda. Mitre 3100, 1663 San Miguel, Buenos Aires

RESUMEN

El presente trabajo pretende ser una actualización de las relaciones halladas entre los promedios mensuales del cociente de la radiación global diaria y la extraterrestre, y los de heliofanía relativa, establecidas en Argentina hace más de diez años, introduciendo en esta oportunidad algunas correcciones en las variables a correlacionar. Se muestra una correlación general para toda la zona cubierta por la Red y, de manera alternativa, dos correlaciones para sendas zonas. Como conclusión, se recomienda el uso de esta metodología en los estudios de factibilidad de las aplicaciones de la energía solar en regiones no cubiertas por la Red Solarimétrica.

1. INTRODUCCION

Los datos obtenidos en las estaciones de una red solarimétrica convencional no pueden satisfacer todas las necesidades de los usuarios potenciales de la energía solar dada la relativamente baja densidad de las redes en prácticamente todas las regiones del mundo.

Se han hecho numerosos intentos para suplementar la base de datos observacionales con valores calculados; los modelos utilizados van desde aquéllos que tienen una fuerte base teórica y que demandan grandes cantidades de datos y requerimientos computacionales, como los de Hoyt (1) y Atwater y Ball (2), hasta aquéllos que se basan en simples correlaciones empíricas que demandan un menor volumen de datos y tiempo de computación, como los de Angstrom (3) y sus modificaciones.

En los últimos años, los satélites meteorológicos han ofrecido otra oportunidad de mejorar el conocimiento de la distribución de la radiación solar a nivel de mesoescala (4-

11) pero todavía es necesario mejorar la metodología para que se pueda transformar en una fuente rutinaria y rigurosa de datos de radiación.

Localmente, las correlaciones simples a que se hizo mención fueron establecidas hace más de diez años (12-14), permitiendo el trazado de las bien conocidas Cartas de Radiación Global (15), que fueran utilizadas por muchos años como única referencia vigente.

La elaboración preliminar de los datos de la Red Solarimétrica, obtenidos desde enero de 1979 hasta diciembre de 1982 en 25 de sus estaciones, permitió disponer de información sobre la variación espacio-temporal de la radiación solar global diaria medida sobre plano horizontal en Argentina (16).

Incorporando los valores diarios correspondientes al año 1983, lo que eleva el número de datos por encima de los 30.000, se elaboró recientemente un mapa con la distribución anual de la radiación solar, el que se presenta en la figura 1, con una resolución de  $0,5 \text{ kWh/m}^2$ .

El presente trabajo presenta una actualización de las relaciones halladas entre los promedios mensuales del cociente de la radiación global y la extraterrestre, y los de la heliofanía relativa, teniendo en cuenta que el gran número de estaciones que miden este último valor permitiría mejorar la cobertura ofrecida por la Red Solarimétrica.

2. CONSIDERACIONES PREVIAS

La dispersión que presentan los datos correlacionados linealmente a lo largo del año en todas las estaciones de la Red utilizadas en este trabajo puede verse en la figura 2, en la que se han representado en función del promedio mensual de la heliofanía relativa los promedios mensuales del índice de claridad  $H/H_0$  para las 25 estaciones que presentan ambos datos. El número de promedios mensuales utilizados fue de 1512 y los valores hallados para la

\* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.



Figura 1. Distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria sobre plano horizontal, kWh/m<sup>2</sup>

ordenada al origen y la pendiente de la recta ( $a=0,20$ ,  $b=0,55$ ) son similares a los de otro trabajo anterior ( $a=0,19$ ,  $b=0,55$ , ref. 13).

Existe una causa fundamental que puede explicar esta dispersión y es la variación espacio temporal de los coeficientes de ajuste. Para un lugar en particular, en este caso la estación de San Miguel, provincia de Buenos Aires, puede apreciarse en la Tabla I la variación temporal de los coeficientes  $a$  y  $b$  a que se hace mención, variación que no fuera considerada como significativa en uno de los trabajos antes citados (14).

La explicación de buena parte de esta dispersión fue atribuida por Hay (17) al aumento de la radiación transmitida motivado por las múltiples reflexiones entre la superficie de la Tierra y la atmósfera, proceso que se intensifica bajo condiciones de altos valores de albedo superficial.

Este proceso resulta del "scattering" de la radiación reflejada, incrementando la radiación global medida por aumento de la componente difusa.

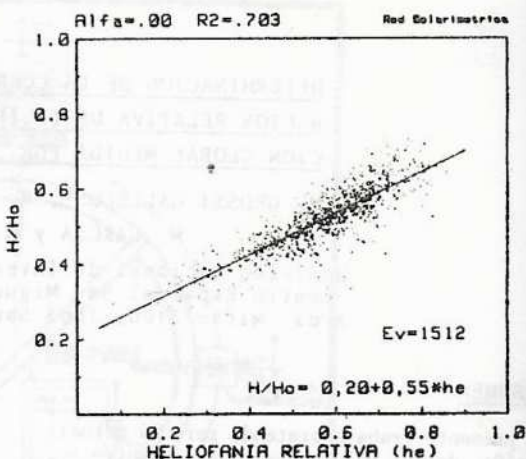


Figura 2. Regresión lineal del promedio mensual del índice de claridad sobre el promedio mensual de heliofanía relativa para 25 estaciones de la Red Solarimétrica sin considerar el albedo regional.

El mismo autor propuso una modificación semi-empírica incorporando el efecto de la reflexión múltiple (18); de esta manera, la radiación global que se recibiría en superficie antes de que ocurriera la interacción viene dada por:

$$H' = H(1 - \alpha_r [\beta_o (n/N) + (1 - n/N) \alpha_c]) \quad (1)$$

en donde  $\alpha_c$  y  $\beta_o$  toman valores constantes de 0,60 y 0,25 respectivamente.

El coeficiente de albedo al que se hace mención aquí es más bien un albedo "regional" y no "puntual" ya que el proceso de múltiple reflexión involucra superficies que pueden estar bastante distantes del sitio de medición.

Los valores promedio de albedo medidos en las seis estaciones del Servicio Meteorológico Nacional y presentados en un trabajo de Kurlat y otros (19) se pueden ver en la Tabla II; éstos fueron medidos en todos los casos en superficies cubiertas por pasto, con nieve en escasísimas ocasiones.

Otra fuente de dispersión, aunque menos significativa, está relacionada con las características operacionales del heliofanógrafo de Campbell-Stokes utilizado en las estaciones de medición, el cual no responde por debajo de un umbral que puede asociarse con una altura solar de 5°. Es así que la posible duración del día debería ser calculada por:

$$N' = \frac{2}{15} \arccos \left( \frac{\cos 85^\circ - \text{sen} \phi \text{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta} \right) \quad (2)$$

TABLA I

Estación	Período	$H/H_0$	a	b	r'
San Miguel (B.A.) 34°33'S, 58°43'O	anual	0,50	0,21	0,51	0,951
	verano (N-D-E-F)	0,54	0,17	0,58	0,928
	invierno (M-J-J-A)	0,46	0,18	0,57	0,948
	equinoccio (M-A-S-O)	0,51	0,24	0,47	0,929

Variación temporal de las constantes de la regresión lineal para una ubicación espacial determinada.

TABLA II

Mes	En	Fe	Ma	Ab	Ma	Ju	Ju	Ag	Se	Oc	No	Di	Prom
Tucumán	0,17	0,16	0,14	0,16	0,20	0,17	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,17	0,16
Pilar	0,19	0,20	0,18	0,17	0,18	0,22	0,20	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
Mendoza	0,18	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,20	0,21	0,20	0,21	0,18	0,19	0,19
S.Martín	0,19	0,20	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,21	0,19	0,20	0,20
B.Aires	0,17	0,18	0,19	0,20	0,19	0,20	0,18	0,18	0,20	0,19	0,18	0,16	0,19
Neuquén	0,22	0,25	0,25	0,21	0,22	0,24	0,19	0,23	0,25	0,25	0,24	0,22	0,23

Valores promedio de albedo ( $\bar{\alpha}$ )

### 3. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Analizando en la bibliografía los posibles valores de albedo compatibles con las zonas vecinas a la mayor parte de las estaciones de la Red Solarimétrica (exceptuando las de la Antártida), éstos pueden oscilar entre 0,15 y 0,35, presentando variaciones a lo largo del año (y aún a lo largo del día).

En consecuencia, el primer paso fue corregir los valores de heliofanía y de radiación teniendo en cuenta las modificaciones sugeridas por Hay, considerando tres valores de albedo "regional", constantes para todo el año, calculándose en cada caso el coeficiente de correlación como medida del ajuste. Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla III.

Teniendo en cuenta el mapa presentado en la figura 1 se dividió el país en dos grupos de estaciones: las de la región noroccidental,

con promedio anual de energía solar diaria mayor de 5 kWh/m<sup>2</sup> (a alturas mayores de 500 metros), con 269 promedios mensuales, y aquéllas con energía menor que ese valor, con 1243 promedios mensuales. Es un agrupamiento arbitrario, tan válido como el que resultaría de considerar la región encerrada por el nivel de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> o una diferenciación por alturas.

Repitiendo el tratamiento considerado con cada una de las dos regiones, los resultados se pueden resumir en las Tablas IV y V y visualizar el aspecto gráfico en las figuras 3 y 4.

### 4. CONCLUSIONES

Esta primera aplicación de las correcciones sugeridas por Hay, llevada a cabo con vistas a mejorar la correlación relativa de la insolación y del índice de claridad, permite ser optimista en cuanto a los resultados a obtener.

TABLA III

$\alpha_r$	a	b	r
0,00	0,20	0,55	0,838
0,15	0,19	0,50	0,849
0,25	0,17	0,49	0,856
0,35	0,16	0,49	0,862

Resumen de los resultados de la regresión lineal en las 25 estaciones.

TABLA IV

$\alpha_r$	a	b	r
0,00	0,16	0,65	0,819
0,15	0,14	0,59	0,829
0,25	0,13	0,59	0,833
0,35	0,11	0,58	0,839

Resumen de los resultados de la regresión lineal para la zona con energías diarias mayores que 5 kWh/m<sup>2</sup>.

TABLA V

$\alpha_r$	a	b	r
0,00	0,21	0,53	0,847
0,15	0,19	0,48	0,858
0,25	0,18	0,48	0,865
0,35	0,16	0,47	0,872

Resumen de los resultados de la regresión lineal para zona con energías diarias menores que 5 kWh/m<sup>2</sup>.

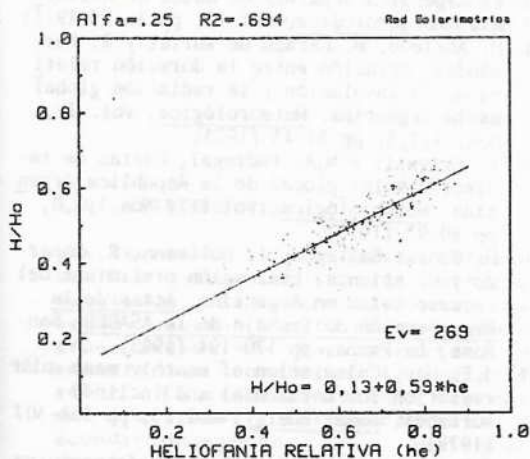


Figura 3. Regresión lineal del promedio mensual del índice de claridad sobre el promedio mensual de heliofanía relativa para las estaciones del NO con  $H > 5 \text{ kWh/m}^2$  para un valor de albedo "regional" de 0,25.

Surge como recomendación inmediata la conveniencia de utilizar, para cada ubicación geográfica, los valores apropiados de albedo "regional", teniendo en cuenta su variación mensual.

Asimismo, también sería útil realizar una zonificación más fina, teniendo en cuenta la uniformidad climatológica de cada unidad, lo cual lleve probablemente a la detección de alguna dependencia de las constantes de la correlación con la altura (20).

La metodología que aquí se ha sugerido no sólo mejorará la cobertura proporcionada por la Red Solarimétrica sino que también facilitará los estudios de factibilidad de aplicaciones de la energía solar que se vienen llevando a cabo en nuestro país.

#### 5. NOMENCLATURA

- H radiación solar total diaria incidente sobre una superficie horizontal,  $\text{MJ/m}^2$
- H' radiación solar total diaria incidente sobre una superficie horizontal antes de la ocurrencia de la reflexión múltiple,  $\text{MJ/m}^2$
- H<sub>0</sub> radiación solar diaria incidente sobre una superficie horizontal a tope de atmósfera,  $\text{MJ/m}^2$
- a ordenada en el origen de la regresión estadística de primer orden, adimensional
- b pendiente de la regresión estadística de primer orden, adimensional
- n heliofanía absoluta (horas de insolación), h
- N longitud astronómica del día, h

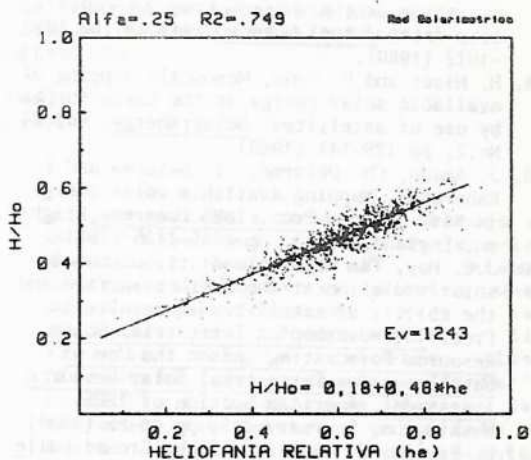


Figura 4. Regresión lineal del promedio mensual del índice de claridad sobre el promedio mensual de heliofanía relativa para las estaciones con  $H < 5 \text{ kWh/m}^2$  para un valor de albedo "regional" de 0,25.

N' longitud del día para ángulo cenital menor o igual que  $85^\circ$ , h

r coeficiente de correlación de Pearson, adimensional

$\alpha_r$  albedo "regional", adimensional

$\alpha_c$  albedo de la base de nubes, adimensional

$\alpha$  albedo superficial, adimensional

$\delta$  declinación,  $^\circ$

$\phi$  latitud,  $^\circ$

$\beta_0$  coeficiente de retrodispersión, adimensional

#### 6. REFERENCIAS

1. D.V. Hoyt, A model for the calculation of solar global insolation. *Solar Energy*, vol. 21, No. 1, pp 27-35 (1978).
2. M.A. Atwater and J.T. Ball, A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. *Solar Energy*, vol. 21, No. 3, pp 163-170 (1978).
3. A. Angstrom, Solar and terrestrial radiation. *Q.J.Roy.Met.Soc.*, vol. 50, pp 121-126 (1924).
4. D.V. Hoyt, The radiation and energy budget of the Earth using both ground-based and satellite-derived values of total cloud cover. NOAA Tech-Rep. ERL 362-ARL, 124 p (1976).
5. T.H. Vonder Haar and J.S. Ellis, Determination of the solar energy microclimate of the United States using Satellite data. *Final Report*, NASA Grant NAS5-22372, Colorado State University, 68 p (1978).
6. J. Tarpley, Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J.Appl.Meteor.*, vol. 18, pp 1172-1181 (1979).
7. C. Gautier, G. Diak and S. Masse, A simple physical model to estimate incident solar

- radiation at the surface from GOES satellite data. J. Appl. Meteor., vol 19, pp 1005-1012 (1980).
8. H. Hiser and H. Senn, Mesoscale mapping of available solar energy at the Earth's surface by use of satellites. Solar Energy, vol. 24 No. 2, pp 129-141 (1980).
  9. J. Amado, Ch. Delorme, Cl. Delorme and P. Raberanto, Mapping available solar energy in West Africa. Proc. ISES Congress, Brighton, England, vol. 3, pp 2485-2489 (1981).
  10. J.E. Hay, The mesoscale distribution of solar radiation at the Earth's surface and the ability of satellites to resolve it. Proc. 1st Workshop on Terrestrial Solar Resource Forecasting and on the Use of Satellites for Terrestrial Solar Resource Assessment, American Section of ISES, Washington, February 2-5, pp 76-85 (1981).
  11. L. Frulla, D. Gagliardini, H. Grossi Gallegos y R. Lopardo, Determinación de la radiación solar global mediante el satélite geo-estacionario GOES: comparación con mediciones hechas desde Tierra. A presentar en el V Simposio Nacional de Análisis de Imágenes satelitarias, Buenos Aires, 26-30 de noviembre de 1984.
  12. M.C. de Kurlat y R. Fernández, Radiación solar global en la Argentina. Acta Scientifica N° 19, ONFCSM, 55 p (1970).
  13. E.S. Crivelli y H. Abeledo, Posibilidades de trazar cartas de radiación global en la Argentina a partir de datos de heliofotografía. Meteorológica, vol. II, pp 86-93 (1977).
  14. H. Abeledo, M. Carazo de Kurlat y R. Fernández, Relación entre la duración relativa de la insolación y la radiación global en la Argentina. Meteorológica, vol. IV, Nos. 1, 2, 3, pp 31-43 (1973).
  15. E. Crivelli y M.A. Pedregal, Cartas de radiación solar global de la República Argentina. Meteorológica, vol. III, Nos. 1, 2, 3, pp 80-97 (1972).
  16. H. Grossi Gallegos, I. Nollmann, R. Lopardo y G. Atienza, Evaluación preliminar del recurso solar en Argentina. Actas de la 8va. Reunión de Trabajo de la ASADES, San Rosa, La Pampa, pp 179-194 (1983).
  17. J.E. Hay, Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. Solar Energy, vol. 23, pp 301-307 (1979).
  18. J.E. Hay, A revised method for determining the direct and diffuse components of the total short-wave radiation. Atmosphere, vol. 14, No. 4, pp 278-287 (1976).
  19. M.I.C. de Kurlat, E.S. Crivelli y R. Fernández, Medidas de radiación en la Argentina. Acta Scientifica N° 30, ONFCSM, 82 p (1977).
  20. F. Neuwirth, The estimation of global and sky radiation in Austria. Solar Energy, vol. 24, pp 421-426 (1980).