

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS VALORES DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL
OBTENIDOS POR LA RED SOLARIMETRICA EN LA ZONA DE LA PAMPA HUMEDA

H. Grossi Gallegos y R. Lopardo

Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales
Centro Espacial San Miguel - Av. Mitre 3100 -
1663 San Miguel - Buenos Aires

TITULO

En un trabajo anterior se discutió la validez de la extrapolación de datos obtenidos en las estaciones de la Red Solarimétrica en regiones homogéneas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos por Hay y Gelling en Canadá, remarcando en esa oportunidad la necesidad de verificarlos localmente. Para ello, y siguiendo el formalismo del trabajo de Gandin, este estudio se basa en la aplicación de los estadísticos característicos de los campos aleatorios.

Se analiza aquí la variabilidad espacial de los valores diarios de la radiación solar global en una zona en la que se suponen válidas las hipótesis de homogeneidad e isotropía espacial del campo de radiación. Se calcula la función estructural y se analiza su dependencia con la distancia entre estaciones para diferentes épocas del año, como así también el comportamiento estacional de la función de correlación. Se comparan los resultados con los obtenidos por otros autores del hemisferio norte y se da la cobertura brindada por la Red en la región para diferentes niveles de precisión.

INTRODUCCION

En los comienzos del Proyecto de relevo Solarimétrico de Argentina se fijaron prioridades para el posible uso y destino de la información (1): (a) estudio y diseño de aparatos para aprovechamiento de la energía solar; (b) diseño de vivienda; (c) estudios agronómicos y (d) estudios climatológicos.

El método seguido para la elección de los lugares de emplazamiento de las estaciones se basó en dos criterios básicos. Por un lado se tuvo en cuenta la densidad demográfica de los lugares de instalación,

ya que se pensó que el uso masivo de aparatos para el aprovechamiento de la energía solar tendría más posibilidades de verificarse en centros densamente poblados; y por otro lado se buscó la homogeneidad fitogeográfica y climatológica de las regiones para facilitar de esta manera la extrapolación—interpolación de los valores que se midieran.

La aproximación ideal para el planeamiento de una red de mediciones tendría que basarse en consideraciones económicas. Si la distribución de estaciones se conoce en una región, es posible entonces, en base a la información estadística de la estructura del campo de radiación, estimar el error que se comete en el conocimiento de dicho campo. Cuanta mayor sea el error, mayores serán las pérdidas causadas por el conocimiento insuficiente del valor del parámetro. Es obvio que el valor del error disminuirá si la densidad de estaciones aumenta, pero esto trae aparejado un aumento en la inversión inicial y en los costos de mantenimiento. El problema consiste entonces en determinar la densidad óptima de estaciones de la red de manera tal que resulten minimizados los costos y las pérdidas.

Los datos obtenidos en las estaciones de una red convencional no pueden satisfacer todas las necesidades de los usuarios porque en muchas regiones del mundo, sino en todas, las redes tienen baja densidad. Hoy en día, el usuario de la energía solar solicita habitualmente datos a nivel de mesoescala, la que puede ser considerada como la definida por una distancia horizontal de 10 a 100 km, vertical de 0 a 10 km y una escala de tiempo de 1 a 10 horas (2). Lo usual en estos casos es seleccionar un sitio que posea datos, que está cerca del lugar en cuestión o que es representativo del mismo, y darlos como referidos para el otro.

Proveer a un país de extensión considerable como Argentina con datos solares a nivel de mesoescala constituye un problema formidable. Existe una opción radicalmente opuesta que es la de utilizar imágenes de satélites geo-estacionarios para relevar en mesoescala la cubierta de nubes y, a través de correlaciones establecidas estadísticamente con datos de buena calidad obtenidos en tierra en lugares determinados, estimar la radiación solar incidente en los lugares en los cuales no existen estaciones de medición (3.4.5). Los modelos utilizados hasta el momento necesitan un mayor desarrollo y, fundamentalmente, el uso de datos de alta calidad obtenidos en tierra (6), como así también su ajuste para el hemisferio Sur (7).

Existe una opción intermedia que parece ser la más adecuada de las dos tecnologías. Se trata de usar las imágenes satelitarias, una vez ajustado el modelo, para relevar áreas con marcadas variaciones a nivel de mesoescala y que no tienen cobertura desde tierra, y para verificar procedimientos de interpolación-extrapolación que permitan extender espacialmente los datos obtenidos por la red de medición.

Por este motivo, el primer paso a dar en este sentido es estudiar la relación error-distancia existente entre las estaciones de la Red Solarimétrica en zonas homogéneas, comenzando con una de ellas conocida como la Pampa Húmeda, siendo el error de medición del sistema del 6%.

2. CARACTERISTICAS DE LA PAMPA HUMEDA.

La zona así conocida está localizada en la parte central-este de la Argentina y comprende zonas de cinco provincias: Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba y La Pampa. Se extiende entre los 30° y 34° de latitud Sur y los 58° y 65° de longitud Oeste (figura 1), cubriendo aproximadamente 550.000 km².

La mayor parte de esta región es plana, estando por debajo de los 200 m del nivel del mar; sólo las sierras de Córdoba (2.000 m) y las de La Ventana y Tandil en Buenos Aires (1.000 m y 500 m respectivamente) rompen su fisonomía. Está surcada por caudalosos ríos, como el Salado del Norte, el Salado del Sur y el Carcarañá, con numerosos afluentes; cuenta con un gran número de lagunas y canales y está limitada al Este por los ríos Paraná y de la Plata y al Sudeste por el Océano Atlántico.

La precipitación promedio toma valores entre los 600 y los 1.000 mm anuales, constituyendo la región una estepa gramínea desprovista de vegetación leñosa, excepto una franja muy estrecha sobre la ribera del Río de la Plata y del litoral atlántico, y otra en el Oeste, en la provincia de La Pampa, en donde existen bosques muy abiertos de 8 a 12 m de altura, integrados esencialmente por caldén, de hojas caducas, formando manchones (8,9). La temperatura media anual varía, de Sur a Norte, entre 15°C y 20°C.

PERIOD	$\bar{H}_M, MJ/m^2$	$\bar{H}_m, MJ/m^2$	$\bar{H}, MJ/m^2$	$100 \frac{\bar{H}_M - \bar{H}_m}{\bar{H}}$	$s_M, MJ/m^2$	$s_m, MJ/m^2$	$s, MJ/m^2$	$100 \frac{s_M - s_m}{s}$
NOV - DEC JAN - FEB	23.5	22.1	22.3	3.1	7.7	6.2	7.0	10.7
MAR - APR SET - OCT	18.0	15.5	16.6	7.5	6.8	5.6	6.3	9.4
MAY - JUN JUL - AUG	10.7	7.2	9.1	19.2	4.5	3.4	4.0	13.7
ANNUAL	17.8	14.7	16.2	9.5	8.7	7.6	8.1	6.7

Tabla 1. Características estacionales del campo de radiación en las 9 estaciones consideradas.

La Tabla 1 presenta las características estacionales del campo de radiación en las nueve estaciones de la zona, mostrando la magnitud del apartamiento de la homogeneidad propuesta en lo que sigue de este trabajo. En ella se encuentran los valores máximo y mínimo de la radiación media en las estaciones, \bar{H}_M y \bar{H}_m respectivamente, el valor promedio estacional de la radiación global en toda la región, \bar{H} , la semi-amplitud relativa de esta magnitud, $(\bar{H}_M - \bar{H}_m)/2\bar{H}$, los valores máximo y mínimo de la dispersión estándar de la muestra, respectivamente s_M y s_m , el valor promedio estacional de la dispersión standard en toda la región, \bar{s} , y la semi-amplitud relativa de estos valores, $(s_M - s_m)/2\bar{s}$.

3. ENFOQUE METODOLOGICO

En un trabajo anterior (10) se discutió la validez de la extrapolación de los datos obtenidos en las estaciones de la Red Solarimétrica en regiones homogéneas teniendo en cuenta los resultados obtenidos por Fay y Sucling (11) en Canadá, remarcando en esa oportunidad la necesidad de verificarlos localmente.

Para ello, y siguiendo el formalismo del trabajo de Gandin (12), este estudio se basa de basar en la aplicación de las características estadísticas de los campos aleatorios.

Si se indica con una línea sobre la magnitud su valor medio, la desviación del valor de la radiación global diaria, en un punto de coordenadas x, y , con respecto a su valor medio puede expresarse como:

$$H'(x, y) = H(x, y) - \bar{H}(x, y) \quad (1)$$

La varianza del elemento en el punto en cuestión será:

$$D_H(x, y) = \overline{H'^2(x, y)} \quad (2)$$

En base a este formalismo es posible definir la función estructural en dos formas alternativas: (3)

$$b_H^*(x_1, y_1, x_2, y_2) = \overline{[H(x_1, y_1) - H(x_2, y_2)]^2} \quad (4)$$

$$b_H(x_1, y_1, x_2, y_2) = \overline{[H'(x_1, y_1) - H'(x_2, y_2)]^2}$$

Las funciones estructurales de los parámetros meteorológicos no son generalmente homogéneas, siendo diferente la variación longitudinal de la latitudinal. Es preferible entonces estudiar la función estructural de la desviación con respecto a la media, que viene dada por la fórmula 4, y no la de los parámetros en sí, lo que nos dará una medida de la variabilidad de la radiación con la distancia.

Se debe tener en cuenta que los errores aleatorios en los datos básicos introducen un error sistemático en los valores de estas funciones. La suposición más simple, y generalmente satisfactoria, es que los errores en diferentes lugares no estén correlacionados entre sí ni con los valores medidos. Con esta suposición se puede mostrar que la función estructural se ve aumentada y toma la forma:

$$b_H(x_1, y_1, x_2, y_2) = b_H(x_1, y_1, x_2, y_2) + \sigma_H^2(x_1, y_1) + \sigma_H^2(x_2, y_2) \quad (5)$$

en donde σ_H es el error standard de la observación.

Si se supone además que el error de medición no depende de las coordenadas (12), este hecho puede utilizarse para estimar σ_H extrapolando la función estructural para una distancia nula, ya que en ese caso se reduce a:

$$b_H(0, 0, 0, 0) = 2\sigma_H^2 \quad (6)$$

En el caso de la Red Solarimétrica:

$$\sqrt{b_H(0, 0, 0, 0)} = 0,085 \text{ MJ/m}^2$$

Para describir la coherencia espacial del campo de radiación se usará además la función de correlación definida por:

$$\mu_H(x_1, y_1, x_2, y_2) = \frac{H'(x_1, y_1) \cdot H'(x_2, y_2)}{D_H(x_1, y_1) \cdot D_H(x_2, y_2)} \quad (7)$$

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Las estaciones consideradas se encuentran en la Tabla 2, en la que se indica a-

demás la distancia entre cada una de ellas, mientras que en la figura 1 se muestra la ubicación geográfica.

ESTACION	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rafaela	1	-	115	165	156	457	309	449	622	778
Paraná	2		-	178	86	509	234	345	609	688
Marcos Juárez	3			-	120	334	200	377	457	661
Oliveros	4				-	450	156	297	525	623
Villa Mercedes	5					-	455	629	338	788
Pergamino	6						-	183	422	523
San Miguel	7							-	523	358
Anguil	8								-	523
Balcarce	9									-

Tabla 2. Estaciones utilizadas en el estudio, con la distancia (km) entre cada una de ellas.

En primer lugar se calculó la función estructural en base diaria (cuya raíz cuadrada es también denominada por otros autores desviación standard de las diferencias diarias) promediada sobre todos los meses del año. En la figura 2 pueden verse los valores hallados para la raíz cuadrada de la función estructural en función de la distancia entre pares de estaciones; se ha incluido también el valor correspondiente al par San Miguel-Castelar, estación distante sólo 7 km y que operó regularmente durante un año a comienzos del sistema.

La curva hallada puede aproximarse por cuadrados mínimos por un polinomio de cuarto grado de la forma:

$$\sqrt{b}_\rho = 1,863 + 0,018\rho - 4,294 \times 10^{-5}\rho^2 + 5,866 \times 10^{-8}\rho^3 - 2,97 \times 10^{-11}\rho^4 \quad (8)$$

con la raíz cuadrada de la función estructural medida en μV y la distancia ρ en Km, la que puede ser utilizada para la determinación de los errores de interpolación o para determinar las distancias máximas entre estaciones para obtener un dado error de extrapolación en la zona.

Los resultados muestran que, aún para pequeñas distancias, el error cometido al extrapolar valores diarios de radiación global puede resultar alto; esto puede mejorarse utilizando valores promedio sobre un mes. Al hacerlo con aquellas estaciones que tenían suficiente estadísticas se hizo evidente que la estación N° 2, ubicada en la orilla oriental del ancho Río Paraná, se apartaba considerablemente del comportamiento general, indicando la no validez en esa zona de la hipótesis de uniformidad en el campo de radiación para cortas distancias; sin embargo, esa condición se recupera para distancias mayores de 600 km.

Descartándola entonces, se han representado en la misma figura 2 los valores calculados; se puede ver allí que el error de los valores extrapolados no excedería en ningún caso, en el rango de distancias indicado, el nivel de imprecisión de la propia medición a un nivel de confianza del 6%. Cabe recordar que, para un error de medición del 6%, la diferencia esperada entre dos mediciones hechas en el mismo lugar es de 8,5%; en este caso, para el valor medio de la radiación en la zona, ese nivel es de

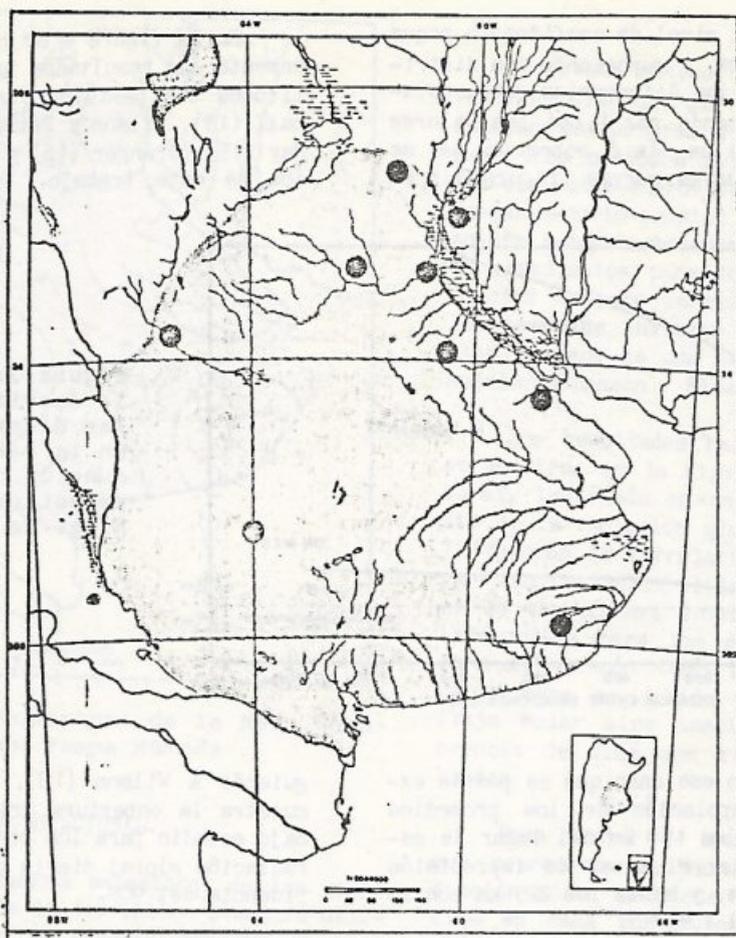


Figura 1; Ubicación geográfica de la región con las estaciones

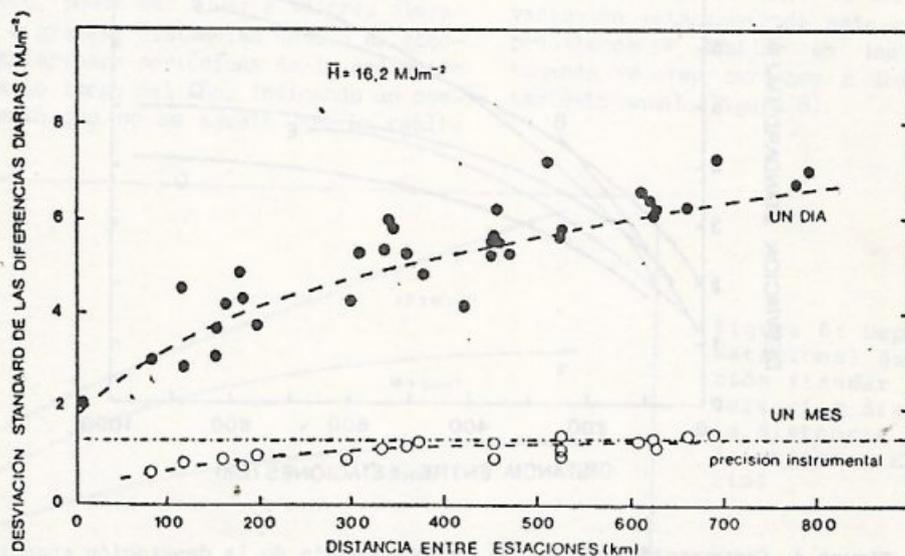


Figura 2: Variación de la desviación standart de las diferencias diarias en la Pampa Húmeda en función de la separación entre estaciones Nivel de confianza : 67%.

1,38 MJ/m². Si el nivel de confianza requerido fuera del 90%, y suponiendo una distribución normal de las diferencias entre estaciones, multiplicando por 1,644 los valores promediados sobre un día ó sobre un mes se obtendrían las nuevas curvas (figura 3); se

En la figura 4 se han comparado los resultados hallados en otras latitudes del hemisferio norte por Atwater Ball (13), Wilson y Petzold (14), Suckling Hay (15), Granger (16) y Pivovarova (17) con los de este trabajo. Por otra parte

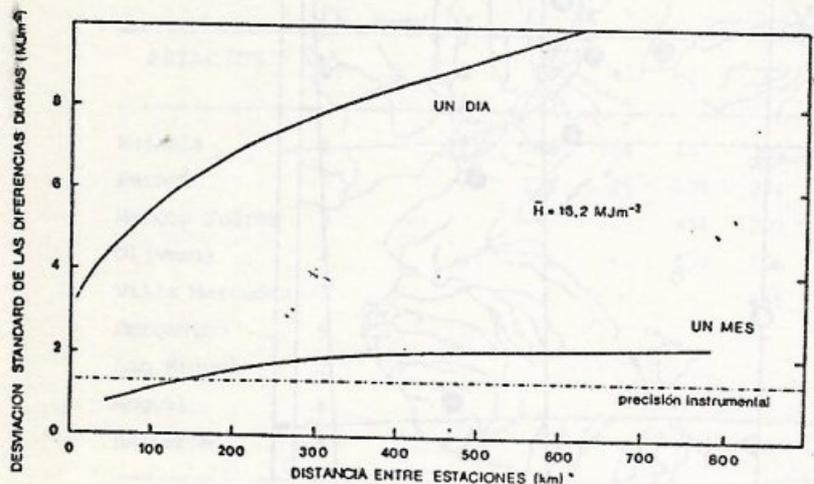


Figura 3: Variación de la desviación estándar de las diferencias diarias en la Pampa Húmeda en función de la separación de estaciones. Nivel de confianza del 90%.

puede observar en ese caso que se podría extender la extrapolación de los promedios mensuales hasta los 150 km del lugar de medición sin exceder el nivel de imprecisión de las mediciones, y hasta los 225 km con un error inferior al 10%.

guiendo a Wilson (18), en la figura 4 muestra la cobertura brindada en la zona bajo estudio para los promedios mensuales de radiación global diaria con un nivel de confianza del 90%.

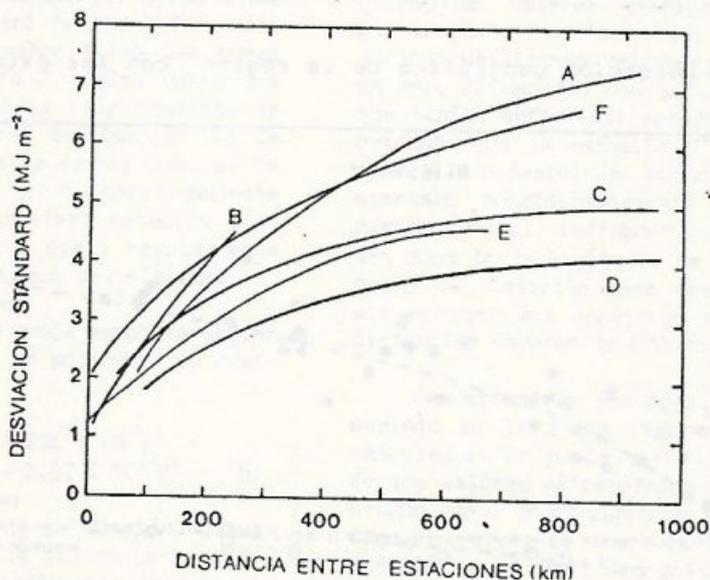


Figura 4. Comparación gráfica de la dependencia de la desviación estándar de las diferencias diarias con la distancia obtenida por diferentes autores: Atwater y Ball (A), Wilson y Petzold (B), Suckling y Hay (C), Granger (D), Pivovarova (E) y este trabajo (F).

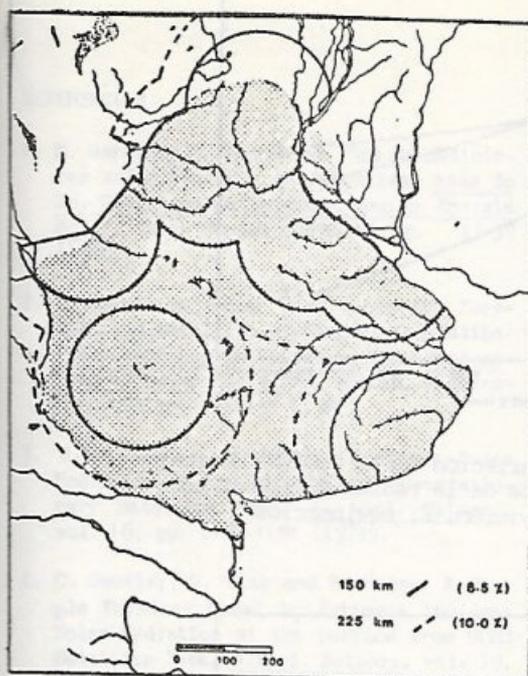


Figura 5: Cobertura de la Red Solarimétrica en Pampa Húmeda

5. DEPENDENCIA ESTACIONAL.

La dependencia estacional de los valores medios y de la desviación standard obliga a estudiar la función estructural para las diferentes épocas del año. En el caso de la función de correlación es ésta una condición esencial ya que, si se evalúa para el año entero, puede dar lugar a valores elevados aún a grandes distancias debido al efecto de variaciones periódicas de la radiación global a lo largo del año, indicando un comportamiento que no se ajusta con la realidad.

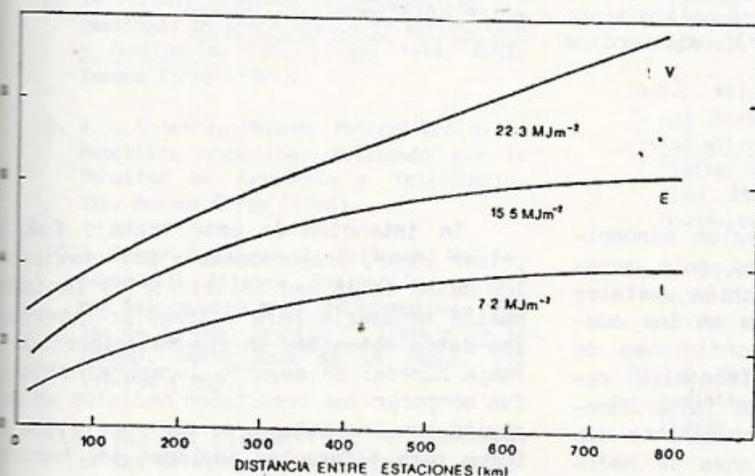


Figura 6: Dependencia estacional de la variación standard de las diferencias diarias con la distancia (V:verano; I:invierno; E:equinoccio)

Por este motivo, se han calculado para valores diarios el comportamiento de la función estructural y de la de correlación para tres períodos del año: verano (noviembre-diciembre-enero-febrero), invierno (mayo-junio-julio-agosto) y equinoccios (marzo-abril-septiembre-octubre). En general, la estadística para los meses de los equinoccios difiere considerablemente de la de los meses de invierno y verano, y la de ellos lo hace la una de la otra, como ya lo señalaran Hanson y Flowers (19).

Los resultados hallados en esta región se muestran en la figura 6 (función estructural, indicando en cada caso el valor medio de la radiación global), y en la figura 7 (función de correlación). Se puede observar que la variabilidad espacial es menor en la temperatura invernal, tomando valores intermedios para los equinoccios y máximos para el verano. Como bien lo señalará Hay (20), ésto es debido no sólo al reducido flujo solar sino también a la mayor ocurrencia de días con cielos totalmente nublados.

Para tratar de atenuar la dependencia que representa la variabilidad con la radiación solar se puede dividir las diferencias en cada punto por el correspondiente promedio de los valores medios de la radiación medida en cada par de estaciones. De esta manera, Hay y Suckling (11,15) construyeron el coeficiente de variabilidad; la variación estacional de este coeficiente es prácticamente similar en los tres casos, tomando valores cercanos a los del comportamiento anual (Figura 8).

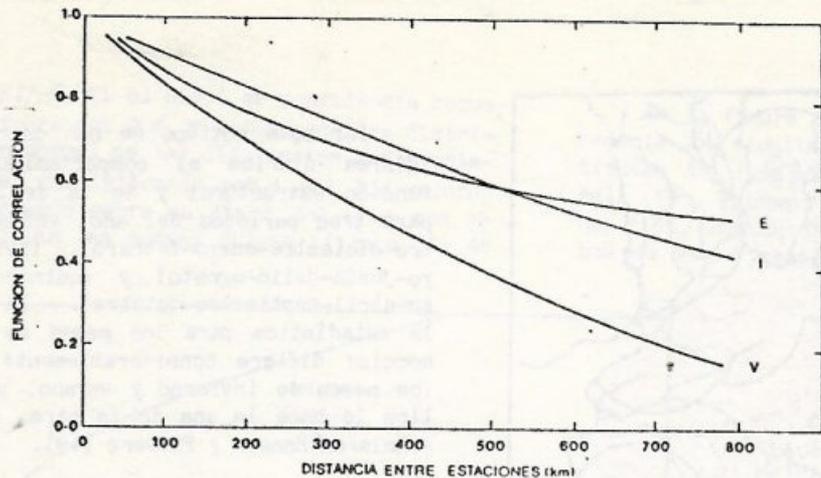


Figura 7. Dependencia estacional de la variación de la función de correlación de los valores diarios de la radiación global con la distancia (V: verano, I: invierno, E: equinoccios).

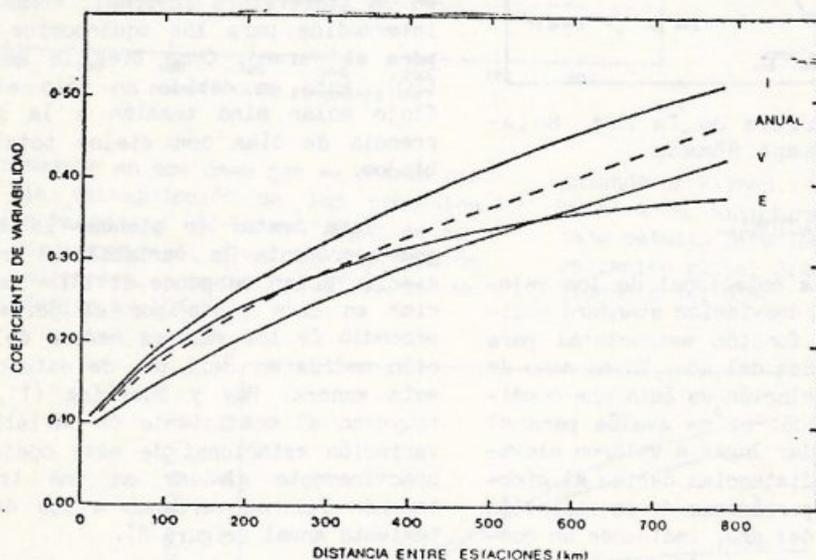


Figura 8. Dependencia estacional de la variación del coeficiente de variabilidad con la distancia entre estaciones (V: verano, I: invierno, E: equinoccios).

6. CONCLUSION

Si bien existen en la región noroccidental y occidental de nuestro país zonas de complicada orografía, también existen varias zonas bien diferenciadas en las cuales es posible suponer las condiciones de homogeneidad e isotropía horizontales requeridas para este estudio. La Pampa Húmeda es una de ellas y cuenta actualmente con un número razonable de estaciones de medición con buena extensión de los registros, si bien se ve en la figura 5 la necesidad de ubicar por lo menos una estación más en el centro de la provincia de Buenos Aires.

La intención de este trabajo fue, en primer lugar, proporcionar a los usuarios de los datos de la Red Solarimétrica la información necesaria para extrapolar-interpolar los datos obtenidos en las estaciones de la Pampa Húmeda; en segundo lugar, el objetivo fue comparar los resultados hallados en esta región con los datos a conocer por otros sectores para diferentes regiones del hemisferio norte.

REFERENCIAS

1. M. García y R. Fernández, Red de mediciones solarimétricas en Argentina. Atas do 2o. Congresso Latino-americano de Energia Solar, Joao Pessoa, Brasil, pp. 43-59 (1978).
2. R. Hulstrom, Solar user needs for forecast and satellite mapping of insolation. Proc. Workshop on Satellites and Forecasting of Solar Radiation, ASISES, Washington, USA pp. 131-133 (1981).
3. J.D. Tarpley, Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. J. Appl. Meteor., vol. 18, pp. 1172-1181 (1979).
4. 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).
5. C. Espoz and A. Brizuela, Application of Remote Sensing and Agrometeorological Methods for Crop Assessment in the Pampa Humeda. FAO Fellowship Program Report-ARG 81/002, 112 p (1982).
6. R. Balm, Summary of Satellite Forecasting Workshop. Proc. Workshop on Satellites and Forecasting of Solar Radiation, ASISES, Washington, USA, pp. 138-142 (1981).
7. L. Frulla, D.A. Gacliardini, H. Grossi Gallegos y R. Lopardo. Comparación entre la determinación de la radiación solar global mediante el satélite geo-estacionario GOES y las mediciones de la Red Solarimétrica. Actas de la 10ra. Reunión de Trabajo de la ASADES, Neuquén (1985).
8. L. Parodi, Regiones Fitogeográficas Argentinas. En Enciclopedia de Agricultura y Jardinería, Vol. I, pp. 1-14, ACME, Buenos Aires (1959).
9. A.J. Cabrera, Esquema Fotográfico de la República Argentina. Publicado por la Facultad de Agronomía y Veterinaria, UBA, Buenos Aires (1966).
10. 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, Santa Rosa de La Pampa, pp. 179-194 (1983).
11. J. Hay and Ph. Suckling, An assessment of the networks for measuring and modeling solar radiation in British Columbia and adjacent areas of Western Canadá. Canad. Geographer, vol. XXIII (3), pp. 223-237 (1979).
12. L.S. Gandin, The planning of meteorological station networks. Tech. Note No. 111, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO-No. 265. TP. 149, 135 p. (1970).
13. M.A. Atwater and J.T. Ball, Intra regional variations of solar radiation in the Eastern United States. J. Appl. Meteor., vol. 17, pp. 1116-1125 (1978).
14. R.G. Wilson and D.E. Petozoid, Daily solar radiation differences between stations in Southern Canadá: A preliminary analysis. Climatological Bulletin, No. 11, pp. 15-22, Mc Gill University (1972).
15. Ph. Suckling and J.E. Hay. The spatial variability of daily values of solar radiation for British Columbia and Alberta, Canadá. Climatological Bulletin, No. 20, pp. 1-7, Mc. Gill University (1976).
16. O.E. Granger. Climatology of global solar radiation in California and a interpolation technique based on orthogonal functions. Solar Energy, vol. 24, pp. 153-168 (1980).
17. Z.I. Pivovarova, Radiation characteristics of the climate of the USSR. GIRO-METEORIZDAT, Leningrad, 335 p (1977). Resultados publicados en "Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source", Tech. Note No. 172, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO-No. 557, 298 p. (1981).
18. R.G. Wilson, Radiation network assessment and design. Proc. 1st. Canadian Solar Radiation Data Workshop, pp. 105-117 (Edited by J.E. Hay and T.K. Won), Canadian Atmospheric Environment Service, Downsview (1980).
19. K. Hanson and E. Flowers, Variability of solar radiation. Sunworld, vol. 6(1), pp. 12-15 (1982).
20. J.E. Hay, Mesoscale variability of solar radiation at the Earth's surface. Solar Energy, vol. 32(3), pp. 425-434 (1984).