

## ANÁLISIS DE LAS SERIES DE PROMEDIOS ANUALES DE HELIOFANÍA (DURACIÓN DE LA INSOLACIÓN) EN URUGUAY

**H. Grossi Gallegos y M. I. Spreafichi** – risol\_sanm@yahoo.com.ar  
Servicio Meteorológico Nacional, División Radiación Solar San Miguel  
Avda. Mitre 3100, (1663) San Miguel, Buenos Aires, ARGENTINA

### 1.2 Potencial Solar e Eólico

**Resumen.** *A lo largo de los últimos años se ha dedicado bastante trabajo al rescate, análisis y evaluación de los datos de heliofanía (también denominada horas de brillo solar) por ser uno de los parámetros más ligados a la irradiación solar que posee registros históricos de gran extensión y que están distribuidos con vastedad por todo el mundo. Su interés reside no sólo en la posibilidad de estimar la irradiación global a partir de correlaciones estadísticamente establecidas, como las de Ångström o Suehrcke (lo cual permitiría el trazado de cartas solares de carácter sudamericano), sino también para evaluar la evapotranspiración potencial (ETP) o para analizar la posible influencia del Cambio Climático Global (CCG) sobre el régimen solar, con las consecuencias que ello podría traer asociadas sobre la producción agrícola. En este trabajo, ya realizado en Argentina y por concretar en los países vecinos, se analiza la existencia de posibles tendencias en las series de promedios anuales de heliofanía correspondientes a 11 estaciones de la República Oriental del Uruguay utilizando los métodos recomendados por el Grupo de Trabajo en Fluctuaciones Climáticas de la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.), en particular, el test de Mann-Kendall, con niveles de significación del 5%. Para ello, como los valores considerados se obtienen a partir de mediciones de las horas quemadas por el Sol en la faja de papel de los heliógrafos y están afectados por un error del sistema que podría llegar a enmascarar los resultados del test, se tuvo en cuenta previamente una estimación de la incerteza introducida en la medición de la heliofanía efectiva realizada en las estaciones de la Dirección Nacional de Meteorología del Uruguay y se procedió a consistir la base de datos con un intervalo de confianza del 95%. Se discuten los resultados obtenidos en relación con el error de medición del parámetro.*

**Palabras clave:** *Heliofanía, Promedios Anuales, Series, Tendencias*

## 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años se ha dedicado bastante trabajo al rescate, análisis y evaluación de los datos de heliofanía (también denominada horas de brillo solar o de insolación) por ser uno de los parámetros más ligados a la irradiación solar que posee registros históricos de gran extensión y que están distribuidos con vastedad por todo el mundo.

Su interés reside no sólo en la posibilidad de estimar la irradiación global a partir de correlaciones estadísticamente establecidas (Ångström, 1924; Righini y Grossi Gallegos, 2003; Righini *et al.*, 2004) sino también para analizar la posible influencia del Cambio Climático Global (CCG) sobre el régimen solar (Grossi Gallegos y Atienza, 1995; Blázquez y Grossi Gallegos, 1996; Blázquez y Grossi Gallegos, 1997; Grossi Gallegos y Spreafichi, 2004) con las consecuencias que ello podría traer asociadas sobre el clima, en general, y sobre la producción agrícola, en particular (Grossi Gallegos y Magrin, 1993; Magrin *et al.*, 1997).

El instrumento recomendado para la medición de la duración de la insolación consiste en una esfera sólida de vidrio pulido que se comporta como una lente convergente montada de tal manera que en su foco se aloja la faja de registro diario. Se denomina heliógrafo del tipo Campbell-Stokes y

utiliza fajas de papel especificadas por el Servicio Meteorológico de Francia, las que fueron diseñadas de conformidad con la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.); las mismas tienen impresa una escala con un paso de media hora, siendo posible apreciar por un observador experimentado hasta décimos de hora.

Los heliógrafos (también conocidos como heliofanógrafos) tienen por objeto medir la duración de la insolación (heliofanía efectiva). La O.M.M. se encargó de estudiar el principio de funcionamiento de este equipo, esencialmente la convergencia de los rayos solares sobre una faja de papel que provoca que ésta se quemé. Se encontró que esto ocurre cuando los valores de la radiación solar directa superan un umbral que presenta cierta variabilidad, dependiendo de la ubicación geográfica del instrumento, del clima y del tipo de faja utilizada. En promedio, ese valor se encontró que variaba de 100 a 200 W/m<sup>2</sup>, conviniéndose posteriormente en que el mismo fuera de 120 W/m<sup>2</sup> cuando se usan las fajas fabricadas a tal efecto (O.M.M., 1982); sin embargo, se han encontrado valores que van de 16 a 400 W/m<sup>2</sup> (Gueymard, 1993).

Por otra parte, uno de los objetivos planteados inicialmente en la Red Iberoamericana de Solarimetría -RISOL del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED, 2000) fue la recolección de datos solares existentes en la región para evaluarlos y compatibilizarlos para así tratar de llegar a un conjunto de cartas que describieran el comportamiento espacial y temporal de los promedios de la irradiación solar global. Finalizada la existencia de esta Red Temática se pudo verificar que eran realmente escasas las series de valores de irradiación global medidas y que su precisión era variada e incierta, mientras que los valores de heliofanía que se disponían constituían realmente una base importante y podrían permitir su evaluación y, de allí, estimar la distribución del recurso solar a través de alguna correlación conveniente.

Como paso previo a la integración de la información procedente de diferentes países se hace necesario evaluar el comportamiento temporal y espacial del parámetro en cada uno de ellos, sus condiciones de extrapolación (analizando la homogeneidad de las regiones y la cobertura brindada por el conjunto de estaciones) y la incerteza de los instrumentos utilizados, pues no todas las instituciones dedicadas a la medición de la heliofanía utilizan las mismas fajas.

Teniendo como objetivo comenzar este proceso de integración en América del Sur, la primera etapa a cubrir es la zona ubicada al Este de los Andes y del Altiplano, comenzando con Argentina, Uruguay, Brasil y Paraguay para poner a punto una metodología de trabajo. Existe algún antecedente de análisis del comportamiento espacial de la heliofanía en la Pampa Húmeda (Grossi Gallegos y Atienza, 1992) como así también de las series temporales a nivel nacional en Argentina (Grossi Gallegos y Spreafichi, 2004, 2006). En este trabajo se analiza el comportamiento temporal del parámetro en la República Oriental del Uruguay a fin de detectar la existencia de posibles tendencias, utilizando los métodos recomendados por el Grupo de Trabajo en Fluctuaciones Climáticas de la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.), en particular, el planteado originalmente por Mann en 1945 y que fuera reformulado por Kendall en 1948 (Kendall and Stuart, 1961).

## **2. MATERIALES Y METODOLOGIA**

Se analizaron los datos de insolación total mensual facilitados por la División Climatología Aplicada de la Dirección Nacional de Meteorología de la República Oriental del Uruguay adquiridos entre 1986 y 2005 en 11 de sus estaciones (ver Fig. 1 y Tab. 1). Los mismos fueron procesados, calculándose los promedios mensuales de heliofanía efectiva diaria.

Como los valores considerados se obtienen a partir de mediciones de las horas quemadas por el Sol en la faja de papel de los heliógrafos (a las que se identificará con la letra *n*), están afectados por el error del sistema que podría llegar a enmascarar los resultados del test. Por esta razón, debe tenerse en cuenta la incerteza introducida en la medición de la heliofanía efectiva realizada en las

estaciones uruguayas, suponiendo que el umbral de respuesta de las fajas utilizadas no cambió a través del tiempo.

Tabla 1. Estaciones uruguayas de medición de la heliofanía

Nombre	Latitud S [°]	Longitud W [°]	Altura [m.s.n.m.]
Artigas	30.4	56.51	120.88
Carrasco	34.83	56.00	32.88
Colonia	34.46	57.84	22.84
Mercedes	33.25	58.07	17.01
Melo	32.37	54.19	100.36
Paso de los Toros	32.80	56.53	75.48
Paysandú	32.35	58.03	61.12
Rivera	30.90	55.54	241.94
Rocha	34.49	54.31	18.16
Salto	31.43	57.98	44.00
Treinta y Tres	33.22	54.39	46.4

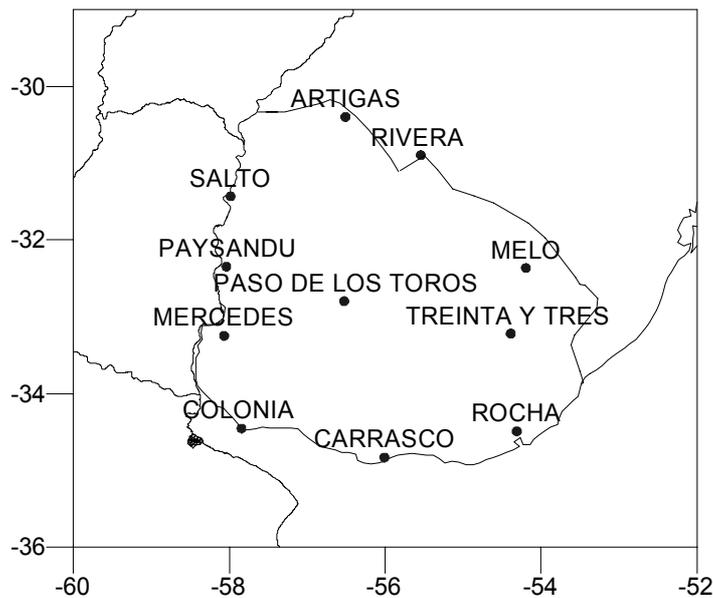


Figura 1. Ubicación geográfica de las estaciones analizadas.

## 2.1. Estimación del error en los promedios mensuales de heliofanía

Para estimar estadísticamente el error del sistema suele usarse la metodología propuesta por Gandin (1970) para analizar las condiciones de extrapolación de variables meteorológicas, para lo cual introduce la función estructura  $b_n$ , metodología ya utilizada en varios países (ver, por ejemplo, Suckling and Hay, 1976) y en Argentina para analizar los datos de irradiación solar global (Grossi Gallegos y Lopardo, 1985) y de heliofanía relativa (Grossi Gallegos y Atienza, 1992) en la Pampa

Húmeda, suponiendo que la misma es una región homogénea y que ambos parámetros varían de manera isotrópica.

La incerteza en la medición introduce un error sistemático en el valor de esta función, suma de los errores cometidos en cada una de las estaciones, que debe adicionarse a la función estructura; la suposición más simple es que dichos errores en diferentes lugares no están correlacionados entre sí o con los valores medidos, ni que dependen de las coordenadas; como mostró Gandin en el trabajo citado, esto nos permitiría estimar la incerteza introducida en la medición si extrapolamos la función estructura a distancia cero a partir de la expresión:

$$b_n(0,0,0,0) = 2\sigma_n^2 \quad (1)$$

donde  $\sigma_n$  es el error de observación.

Con el fin de independizarse de los valores absolutos de heliofanía Raichijk *et al.* (2006) consideraron conveniente utilizar la modificación introducida por Hay y Suckling (1979) en la definición del coeficiente de variabilidad de Pearson:

$$C_v = \frac{b_n^{1/2}}{0.5(n_1 + n_2)} \times 100\% \quad (2)$$

donde los valores ubicados en el denominador indican los promedios de la heliofanía en las mismas localidades para las cuales se calcula la función estructura.

El uso de la función estructura en la Eq. (2), que juega el rol de un desvío estándar, implica sólo un nivel de confianza del 67%. Niveles más altos de confianza pueden alcanzarse multiplicando los coeficientes obtenidos por el valor de Z apropiado, tal como 1.644 para el 90%. Suckling (1983) observó que, aunque los valores de las anomalías no estén normalmente distribuidos, la aproximación utilizada en la definición del coeficiente de variabilidad se comporta como tal cuando se la convierte al nivel de confianza del 90%.

De esta manera, obtuvieron una relación lineal entre el coeficiente de variabilidad y la distancia entre estaciones que, multiplicada por 1.644 y extrapolada a una distancia nula, les permitió concluir que los promedios mensuales de heliofanía obtenidos en las estaciones uruguayas son estimados con un error de 5.85%.

## 2.2. Aplicación del test de Mann-Kendall

Se calcularon en primer lugar los promedios anuales para los años que tenían completos los registros mensuales, con lo cual la muestra se redujo, y se analizaron las series históricas restantes. Se eliminaron además todos aquellos promedios que se apartaban del promedio general en más de  $\pm 1.96\sigma$ , compatible con el nivel de significancia del test a emplear (límites que se flexibilizaron teniendo en cuenta el error de determinación de la heliofanía).

En la Tab. 2 se listan, para las estaciones consideradas, las pendientes y ordenadas halladas en las series, presentándose algunos resultados estadísticos obtenidos (nivel de probabilidad del test de pendiente nula, valor medio de los valores anuales y coeficiente de variabilidad de Pearson).

En la Fig. 2 se presentan algunas de las series de promedios anuales de heliofanía que fueron consideradas en este trabajo. Los años incompletos por falta de promedios mensuales y la depuración introducida en el tratamiento de los datos produjeron las discontinuidades que se ven en los gráficos.

Tabla 2. Estaciones consideradas, pendientes halladas, niveles de probabilidad del test, valores medios anuales y coeficiente de variabilidad.

Nombre	Pendiente [horas/año]	Ordenada [horas]	p-level	Heliofanía promedio [horas]	C <sub>v</sub>
Artigas	-0,006	18,659	0,882	6,9	0,04
Carrasco	0,006	-5,929	0,589	6,6	0,03
Colonia	-0,001	8,627	0,857	7,0	0,03
Mercedes	-0,006	18,895	0,891	7,1	0,03
Melo	0,003	0,179	0,961	6,8	0,04
Paso de los Toros	-0,023	52,801	0,352	7,0	0,06
Paysandú	-0,019	44,372	0,298	7,2	0,04
Rivera	0,006	-5,593	0,586	6,7	0,06
Rocha	-0,019	43,592	0,222	6,5	0,05
Salto	0,017	-26,961	0,222	7,0	0,04
Treinta y Tres	0,006	-5,121	0,102	6,5	0,05

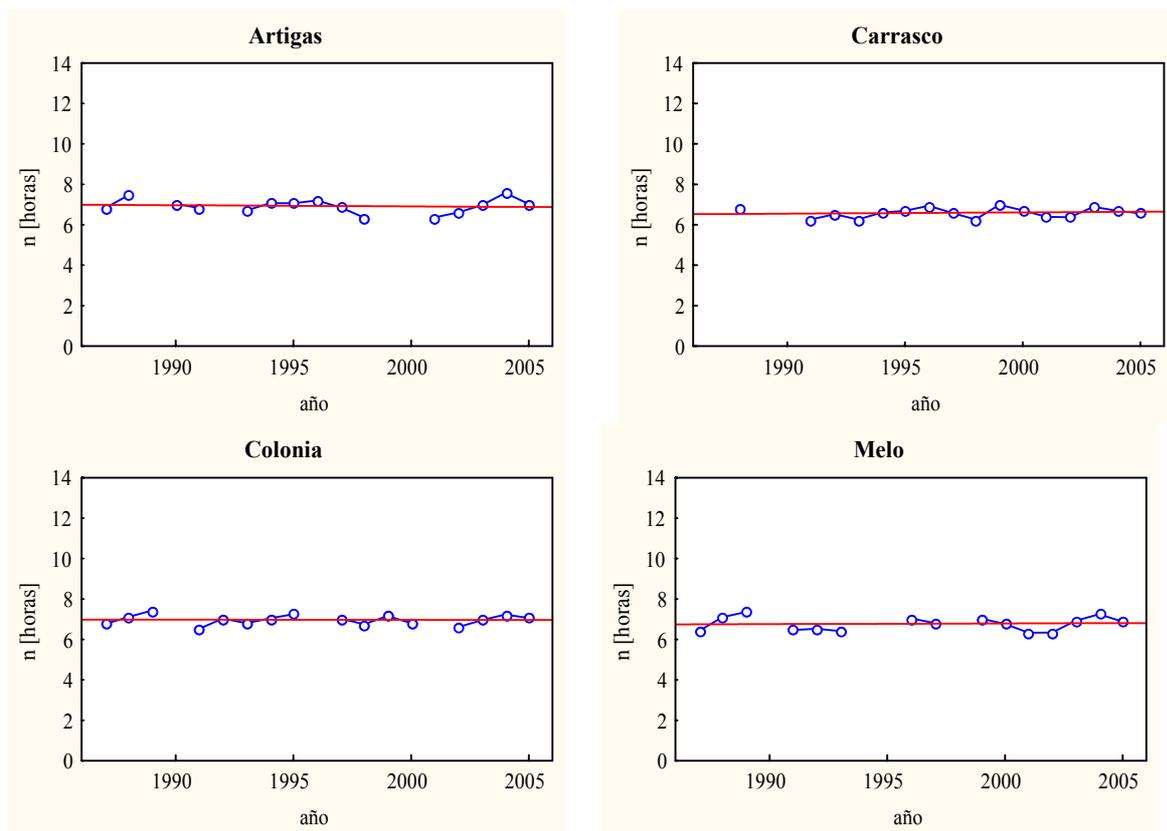


Figura 2. Ejemplos de series temporales de heliofanía efectiva.

### 3. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del nivel de probabilidad obtenidos con el test, la hipótesis de pendiente nula puede ser rechazada si el valor hallado es menor (o igual) que el nivel de

significación (en este caso,  $p=0.05$ ); por lo tanto, ninguna de las estaciones uruguayas de medición de heliofanía muestra en sus series históricas tendencia significativa al 5%.

Por lo tanto, puede descartarse la existencia de tendencias temporales en los promedios anuales, permitiendo de esta manera calcular los valores medios sobre esta base limitada de años para ser utilizados como representativos del parámetro, si bien restaría analizar de la misma manera el comportamiento de las series de promedios mensuales de heliofanía para así aplicar las correlaciones establecidas con los promedios de la irradiación solar global que se mencionaron inicialmente.

### ***Agradecimientos***

Los autores desean hacer presente su agradecimiento de las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional, por haber tramitado y facilitado, una vez obtenida, la información utilizada, y a las de la Dirección Nacional de Meteorología de la República Oriental del Uruguay, sin cuyo aporte no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

### **REFERENCIAS**

- Ångström, A. 1924. Solar and terrestrial radiación, Q. J. R. Meteorol. Soc., vol 50, pp.121-125.
- Blázquez, M. L. Grossi Gallegos, H. 1996. Estudio de variables meteorológicas en la estación San Miguel, provincia de Buenos Aires. Informe de avance, Actas de la XIX Reunión de Trabajo de la ASADES, tomo I, pp. 04.1-04.4, Mar del Plata, Argentina.
- Blázquez, M. L. Grossi Gallegos, H. 1997. Resultados del estudio del comportamiento estadístico de la radiación solar y otras variables meteorológicas asociadas, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 1, n. 1, pp. 189-192.
- Gandin, L. S. 1970. The planning of meteorological station networks, Tech. Note No. 111, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO-No. 265.TP.149, 135 p.
- Grossi Gallegos, H. Lopardo, R. 1988. Spatial variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the Argentine Pampa Humeda, Solar Energy, vol. 40, n. 5, pp. 397-404.
- Grossi Gallegos, H. Atienza, G. 1992. Análisis del comportamiento espacial de los datos de radiación solar en la Pampa Húmeda argentina, Memoria del IV Congreso Interamericano y I Iberoamericano de Meteorología, Cáceres y Salamanca, España, Tomo I, pp. 216-220.
- Grossi Gallegos, H. Magrin, G. 1993. Evaluación de la influencia de la calidad de los datos de radiación solar global en los pronósticos de cosecha, Actas del 7mo. Congreso Latinoamericano de Energía Solar - 16a. Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, La Plata, Buenos Aires, Argentina, tomo I, pp. 243-250.
- Grossi Gallegos, H. Atienza, G. 1995. Variación secular de la radiación solar global en la Argentina primeros resultados. Actas de la 18va. Reunión de Trabajo de la ASADES, San Luis, Argentina, tomo I, pp. 4.15-4.22.
- Grossi Gallegos, H. Spreafichi, M. I. 2004. Análisis de los datos de heliofanía en el sur de Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 6, n. 2, pp. 11.19-11.24 versión CD-ROM.
- Hay, J. E. Suckling, Ph. 1979. An assessment of the networks for measuring and modelling solar radiation in British Columbia and adjacent areas of Western Canada. Canad. Geographer, vol. XXIII n. 3, pp. 223-237.
- Kendall M.G. and Stuart A., 1961, The advanced theory of statistics, vol. 2, fourth edition. C. Griffin and Co. Ltd, London, England.
- Magrin, G.O. Travasso, M.I. Diaz, R. Rodriguez, R. 1997. Vulnerability of the agricultural systems of Argentina to climate change, Climate Research vol. 9, pp. 31-36.

- Raichijk, C. Grossi Gallegos, H. Righini, R. 2006. Análisis de los datos de heliofanía en la República Oriental del Uruguay. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 8, n. 2, versión CD-ROM (enviado para su publicación).
- Righini, R. Grossi Gallegos, H. 2003. Aproximación a un trazado de nuevas cartas de irradiación solar para Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente vol. 7, n. 2, pp. 11.07-11.11 versión CD-ROM.
- Righini, R. Grossi Gallegos, H. Raichijk, C. 2004. Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (heliofanía). Energías Renovables y Medio Ambiente vol. 14, pp. 23-31.
- Sukling, Ph. Hay, J. E. 1976. The spatial variability of daily values of solar radiation for British Columbia and Alberta, Canada, Climatological Bulletin, No. 20, pp. 1-7, McGill University.
- Suckling, Ph. W. 1979. Extrapolation of Solar Radiation Measurements: Meso-scale Analyses from Arizona and Tennessee Valley Authority Regions, J.Clim. and Appl. Meteor., vol. 22, pp. 488-494.

## ANALYSES OF THE ANNUAL AVERAGE SERIES OF SUNSHINE HOURS IN URUGUAY

**Abstract.** *Throughout the last few years a good deal of work has been devoted to the recovery, analysis and evaluation of sunshine hours data for it is one of the parameters most closely linked to solar irradiation and has extended historical records which are vastly distributed all over the world. The interest for such data lies not only in the possibility of estimating global irradiation from statistically established correlations, such as those by Ångström or Suehrcke, which would allow the design of South American solar charts as well as the evaluation of potential evapotranspiration (ETP) and the analysis of the Climate Global Change (Cambio Climático Global, CCG) possible influence on the solar regime with the consequences all this might have on the agricultural production. In this work, which has already been performed in Argentina and is soon to materialize in neighboring countries, an analysis being carried out of possible trends that might be found in the sunshine hours annual averages corresponding to 11 stations in the Uruguayan Republic using the methods recommended by the Work Group on Climate Fluctuations of the World Meteorological Organization (WMO), particularly the Mann-Kendall test, with 5% significance levels. For that purpose, since the considered values are found from the measurements of Sun burned hours on the heliograph paper strips and are influenced by a system error which could even mask the results of the test, an estimate was previously taken into account of the uncertainty introduced into the effective sunshine hours measurement performed at the Uruguayan Meteorological National Directorate and thus a data base was developed consisting with a 95% confidence interval. The results achieved are discussed in relation to the error in the parameter measurement.*

**Key words:** Sunshine Hours, Annual Averages, Series, Trends.