

ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES DE PROMEDIOS ANUALES DE HELIOFANÍA EFECTIVA EN LA REGIÓN DEL RÍO DE LA PLATA EN RELACION A SUS TENDENCIAS Y POSIBLES CAMBIOS RECIENTES

H. Grossi Gallegos y M. I. Spreafichi*
Red Solarimétrica, Servicio Meteorológico Nacional
Avda. Mitre 3100, (1663) San Miguel, Buenos Aires, ARGENTINA
Telefax: (54-11) 4455 6762, E-mail: hgrossi@smn.gov.ar

RESUMEN: A partir de 1996 se realizaron estudios con las series de radiación solar de estaciones ubicadas en Argentina, analizando también el comportamiento de otras variables asociadas. El resultado fue descartar la existencia de tendencias significativas. Sin embargo, los estudios llevados a cabo a nivel mundial sugirieron una disminución en la radiación solar a nivel de superficie entre los 1950s y los 1980s (“global dimming”), con recuperación parcial en muchos lugares más recientemente (“solar brightening”). Como los datos de heliofanía cuentan en América del Sur con registros de mayor extensión que los de radiación solar, se analizan en este trabajo las series temporales de los promedios anuales de heliofanía obtenidos en Uruguay y en la región de Argentina cercana al Río de la Plata. Las tendencias halladas para las series completas no son significativas; sin embargo, en los primeros años del siglo XXI parece esbozarse un cambio creciente.

Palabras clave: heliofanía efectiva, tendencias, Río de la Plata.

INTRODUCCIÓN

El sistema climático terrestre se encuentra condicionado por forzantes externos, tanto naturales (variaciones en la radiación solar, cambios en la composición química de la atmósfera debidas al vulcanismo, alteraciones de la superficie terrestre, etc.) como antropogénicas (cambios en la composición química de la atmósfera que alteren el efecto invernadero natural y la capa de ozono, aumento de la concentración atmosférica de contaminantes sólidos y líquidos, etc.) que actúan en diferentes escalas temporales.

La posible variación de los valores de radiación solar sobre la superficie de la tierra se ha intensificado en los últimos años para poder atribuirle modificaciones en el balance radiativo y de ahí, efectos de cambio en el clima. Al margen de su influencia climática, los efectos directos de posibles cambios en la cantidad de radiación global recibida en la superficie terrestre serían de considerable importancia debido a que es ella la que provee de energía para la fotosíntesis y la evaporación, por lo que cualquier cambio significativo podría influenciar las fuentes de agua y alimentos del hombre.

En un trabajo publicado hace casi 20 años por Stanhill y Moreshet (1992) que volvieron a analizar desde el punto de vista del Cambio Climático las variaciones ya observadas por Stanhill (1983) a lo largo del período de medición de la Red Mundial de Radiación (*World Radiation Network, WRN*) integrada por 221 piranómetros a termopila, encontrando que eran grandes y estadísticamente significativos en muchos casos, superando la incerteza esperada en las mediciones (no se tuvo en cuenta entonces ninguna estación ubicada en América del Sur y sólo 10 en el hemisferio Sur, todas ubicadas al Este del meridiano de Greenwich).

Motivados por ello, Grossi Gallegos y Atienza (1995) realizaron un primer trabajo en Argentina en el que analizaron los promedios anuales de irradiación global diaria de 4 estaciones de la Red Solarimétrica que tenían más de 10 años de registro (se denomina irradiación a la radiación solar integrada en un período de tiempo). Posteriormente, Grossi Gallegos y Blázquez (1996) y Blázquez y Grossi Gallegos (1997) volvieron a analizar las series temporales de irradiación global, incorporando al estudio el comportamiento de otras variables. El resultado general fue que, teniendo en cuenta la incerteza de las mediciones, no era posible concluir la existencia de tendencia alguna en un nivel de significancia del 5%.

En los últimos años, motivados por la observación de un posible cambio en las tendencias encontradas en algunas regiones, se ha reforzado el interés en el estudio de las series temporales de radiación solar y de variables *proxy* tales como la heliofanía, habida cuenta de que es mucho mayor el número de registros de esta variable y de mayor extensión en el tiempo. Estos cambios observados dieron lugar al uso de los términos *solar dimming* y *solar brightening*, asociados respectivamente a la aparente disminución observada hasta las dos últimas décadas del siglo anterior y al aumento detectado recientemente, si bien tendría carácter regional. Las referencias a citar son más que abundantes, pero puede decirse que se dispararon y potenciaron a partir de los trabajos publicados por Wild (2009) y Wild *et al.* (2009) y que desembocaron en un proyecto de compilación de series de heliofanía y cobertura de nubes a nivel mundial (Sanchez-Lorenzo *et al.*, 2010). Localmente, los estudios relacionados con el comportamiento de las series temporales de heliofanía en la región fueron iniciados por Grossi Gallegos y Spreafichi (2004, 2006, 2007a, 2007b y 2008).

* Personal del CONICET

MATERIALES Y MÉTODO

Para analizar el comportamiento temporal de la heliofanía a fin de detectar la existencia de posibles tendencias, Grossi Gallegos y Spreafichi (2006) utilizaron los métodos recomendados por el Grupo de Trabajo en Fluctuaciones Climáticas (Dzerdzeevskii *et al.*, 1965).

Los valores considerados se obtienen a partir de mediciones de las horas quemadas por el sol en la faja de papel de los heliógrafos (horas a las que se identificará con la letra n) leídas por cada observador, las que están afectados por el error de medición 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, suponiendo que el umbral de respuesta de las fajas utilizadas no cambió a través del tiempo. De acuerdo con Raichijk *et al.* (2006a) los promedios mensuales de heliofanía obtenidos en las estaciones uruguayas son estimados con un error de 5,85 %, mientras que los promedios mensuales de las estaciones argentinas están afectados por un error de 7,04 % (Raichijk *et al.* 2006b) debido, en principio, a que utilizan fajas diferentes. Se seleccionaron las estaciones ubicadas en las cercanías de la región del Río de la Plata y 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 de la recta de tendencia general en más de $\pm 1,96\sigma$, compatible con el nivel de significación del test a emplear (límites que se ampliaron teniendo en cuenta el error de determinación de la heliofanía).

RESULTADOS

De acuerdo con los resultados del nivel de probabilidad obtenidos con el test, la hipótesis nula puede ser rechazada si el valor hallado es menor (o igual) que el nivel de significación (en este caso, $p=0,05$); en vista de los valores hallados (Grossi Gallegos y Spreafichi, 2007a), 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 adquiridos entre 1986 y 2005 en las 11 estaciones del Uruguay que se listan en la Tabla 1.

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	46,40

Tabla 1: Listado y ubicación de las estaciones uruguayas de medición de la heliofanía consideradas.

En estas series no se pudo determinar la existencia de un “abrillantamiento temprano” a partir del final del siglo anterior ni a los comienzos del siglo XXI. A fin de tener en cuenta la importancia relativa de las variaciones observadas en las series temporales se calculó la desviación porcentual relativa con respecto a las medias respectivas en el período bajo estudio. En la Figura 1 se muestran algunos ejemplos de 6 de las series que presentan mayor cantidad de puntos luego de aplicado el proceso de consistencia y depuración.

En Argentina se consideraron las estaciones que se listan en la Tabla 2. Los promedios mensuales de la heliofanía efectiva posteriores a octubre de 1967 ya habían sido consistidos por el Departamento de Climatología del SMN por la condición de que los valores diarios no superaran el valor de la astronómica (esto es, que la heliofanía relativa no fuera superior a 1), además de verificar los valores dudosos de las planillas con las libretas de observación. Para la última década se detectaron valores irregulares en los años 1991 a 1993 en algunas estaciones debido a la utilización de fajas erróneamente impresas provistas a los observadores; al no poder identificar su utilización, se decidió no tenerlos en cuenta en general para la preparación de las Estadísticas Climatológicas de la década, si bien los valores no fueron eliminados del Banco de Datos. En este trabajo, al calcular las rectas generales de tendencia y aplicar la metodología de selección se analizaron los dos casos: con y sin la inclusión de los promedios de los años 1991 a 1993. Los resultados obtenidos sin tener en cuenta los años 1991 a 1993 se indican en la Tabla 2, junto con los otros datos de las estaciones consideradas. Repitiendo los cálculos con la inclusión de los años excluidos, los resultados obtenidos para las series completas modifican sólo las tendencias de San Miguel (que pasa a tener una pendiente negativa, significativa al nivel del 5%), y de Castelar (que pasa a ser significativa al nivel del 1%). Por otra parte, el hecho de cortar la serie temporal en el 2000 mostraría sólo en Aeroparque y Gualeguaychú un posible cambio en las tendencias al agregarle los otros 5 años.

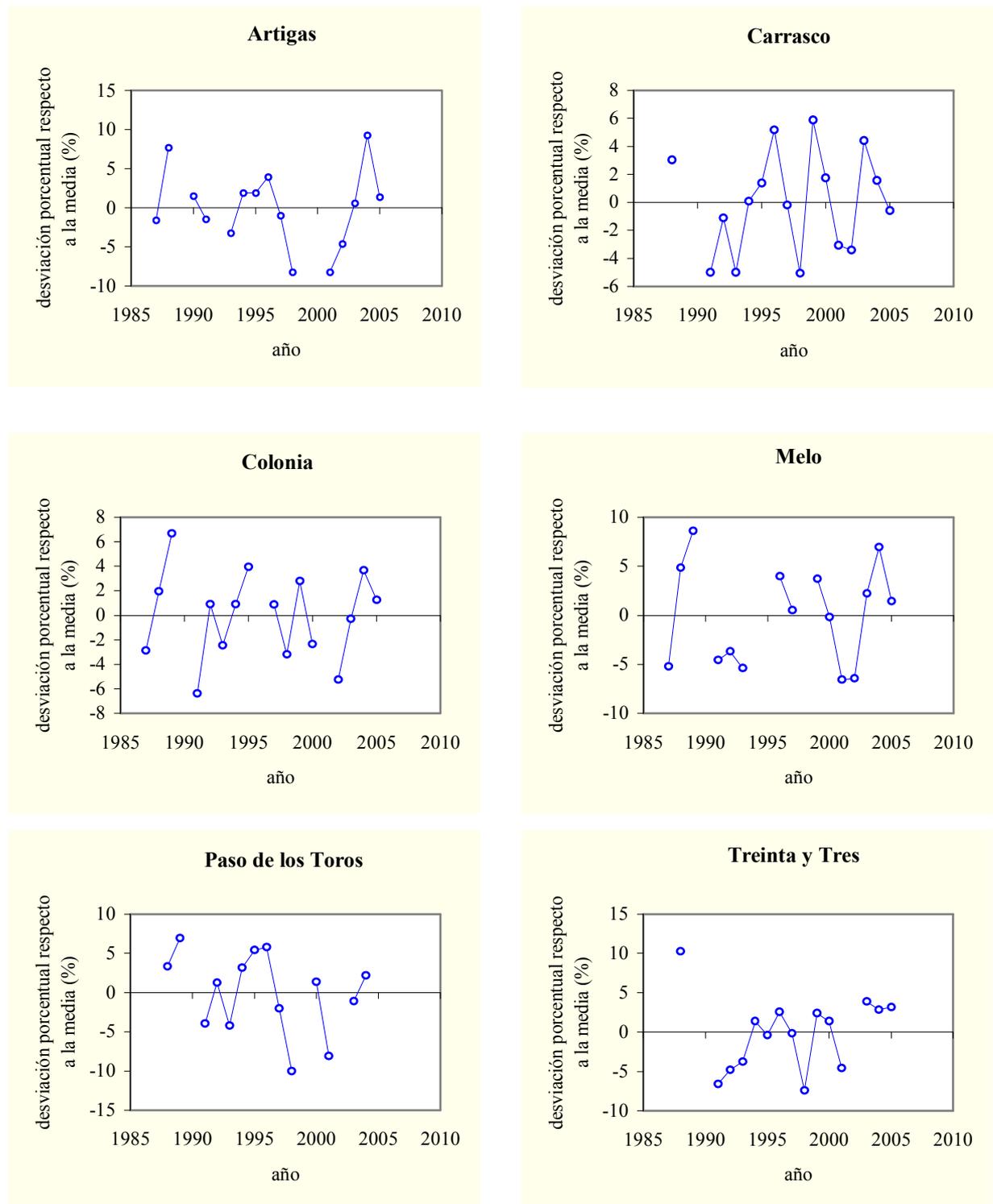


Fig. 1: Ejemplos del comportamiento de las series temporales de la desviación porcentual relativa de la heliofanía efectiva con respecto a la media en algunas estaciones uruguayas.

Si se estima el error generado por la sensibilidad de las bandas (Raichijk *et al.*, 2006b) sobre los valores medios calculados a lo largo del período completo de análisis 1965-2005, los resultados obtenidos se modifican en algunos casos: el error enmascara (E) la significación o no la enmascara (NE). Con esta consideración, el comportamiento es similar al de las estaciones del lado uruguayo prácticamente en todos los casos. En la Figura 2 se representa de manera conjunta la evolución temporal de los promedios anuales de la heliofanía efectiva de ambas orillas del Río de la Plata, incluyendo las correspondientes rectas tendencia que tienden a mostrar el comportamiento evidenciado. Si bien las estaciones uruguayas muestran entre sí un comportamiento similar, del lado argentino se diferencia marcadamente la estación Ezeiza; pero cabe consignar que se ubica en una zona baja, de niebla abundante, cuyos datos merecen menor confianza que los otros por tratarse del aeropuerto internacional y poder presentar diferencias locales.

Latitud S [°]	Longitud W [°]	Altura m.s.n.m.	Nombre	Período	Significancia al 2000	Período	Significancia al 2005	Efecto del error
31,83	60,52	78	Paraná INTA	1965-2000	S (-)	1965-2005	S (-)	E
32,92	60,78	25	Rosario Aero	1961-2000	S (-)	1961-2005	S (-)	E
33,00	58,62	21	Guauguaychú Aero	1962-2000	S (-)	1962-2005	NS	NE
33,68	59,68	28	San Pedro INTA	1967-2000	S (-)	1967-2005	S (-)	E
34,34	58,25	6	Aeroparque	1961-2000	NS	1961-2005	S (+)	E
34,55	58,73	26	San Miguel	1957-2000	NS	1957-2005	NS	E
34,58	58,48	25	Buenos Aires	1962-2000	NS	1962-2005	NS	E
34,40	58,39	22	Castelar	1964-2000	NS	1961-2004	S (-)	E
34,82	58,53	20	Ezeiza Aero	1965/2000	NS	1965-2005	NS	E

Tabla 2: Listado y ubicación de las estaciones argentinas de medición de la heliofanía consideradas, sin la inclusión de los registros de los años 1991-1993. Pendientes significativa negativa (S-), significativa positiva (S+) y no significativa (NS).

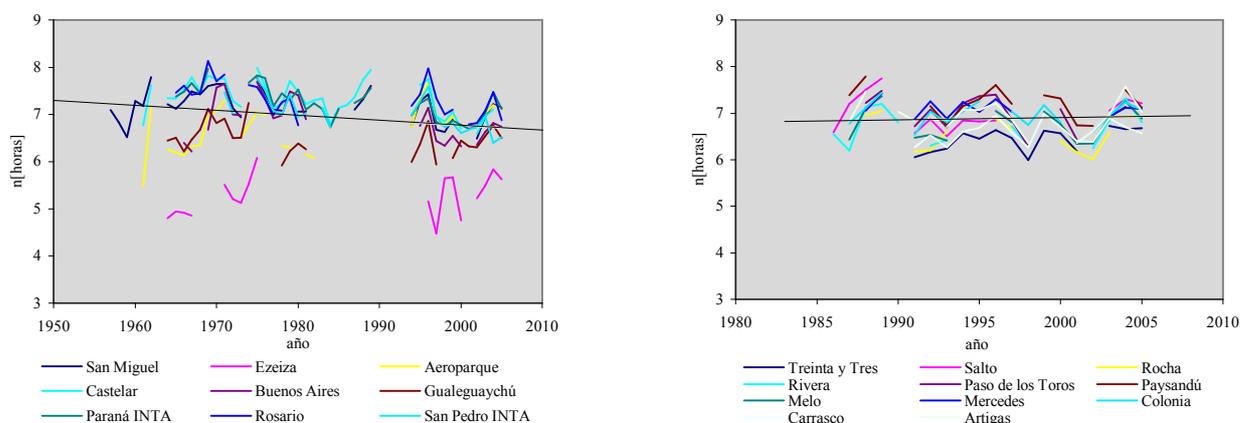


Figura 2: Evolución temporal de los promedios anuales de la heliofanía efectiva en la región del Río de la Plata. A la izquierda, las estaciones argentinas; a la derecha, las uruguayas.

Vale la pena dedicar un comentario al procedimiento de depuración utilizado. A pesar de correr el riesgo de perder información de base (ver las Figuras 2 y 3) se considera conveniente depurar los registros de heliofanía, teniendo en cuenta el soporte en el cual se registra, la variación en el tiempo de la calidad del mismo, la incidencia de las condiciones ambientales y su procesamiento manual, como así también no desatender en el análisis de las conclusiones los errores de estimación (o de medición, en el caso de la irradiación) antes de sacar conclusiones apresuradas. Como bien dicen Gueymard y Myers (2009), “las tendencias corrientemente comunicadas son sólo de unos pocos por cientos a lo largo de décadas, y son entonces algunas veces menores que las incertezas de medición debidas a la degradación, la pérdida de datos, los cambios en instrumentos o métodos de calibración, en los procedimientos de control de calidad., etc.”. En vez de depurar con respecto a la tendencia hallada inicialmente (reforzando la misma al quitar los puntos apartados) se podría hacerlo con respecto a la media, pero en este caso de reforzaría la hipótesis de tendencia nula, por lo que en ambos casos podría introducirse un nuevo error.

En la Figura 3 se muestran algunos ejemplos de las series de variación relativa porcentual de la heliofanía efectiva en Castelar, San Miguel, Buenos Aires, Rosario, San Pedro y Aeroparque. Teniendo en cuenta que las estaciones San Miguel y Paraná INTA han sido objeto de estudio en trabajos anteriores por disponer de datos simultáneos de irradiación solar global y de heliofanía de considerable extensión temporal, se analizó en primer lugar el comportamiento de los promedios anuales de heliofanía efectiva en ambas estaciones en tres agrupamientos: las series temporales completas, las series temporales desde su comienzo hasta el año 2000 y finalmente las series temporales desde el año 2000 hasta el 2005, con la intención de determinar la posible existencia de un “abrillantamiento temprano” a partir del final del siglo XX o a comienzos del siglo XXI.

En la figura 4 se presentan encolumnadas estas particiones temporales, incluyendo en cada período la recta tendencia. Al separar los últimos años correspondientes al siglo XXI parece evidenciarse un cambio en el signo de la recta pendiente, si bien los años considerados son muy pocos, habiendo quedado absorbidos en la serie completa sin modificar apreciablemente la tendencia determinada (Tabla 2).

El caso de la estación Paraná INTA

Se analizaron nuevamente los registros de la estación Paraná INTA a la que se le ha dedicado bastante estudio en los últimos años por ser la que posee datos simultáneos de irradiación solar global y heliofanía diarios de mayor extensión temporal. Las

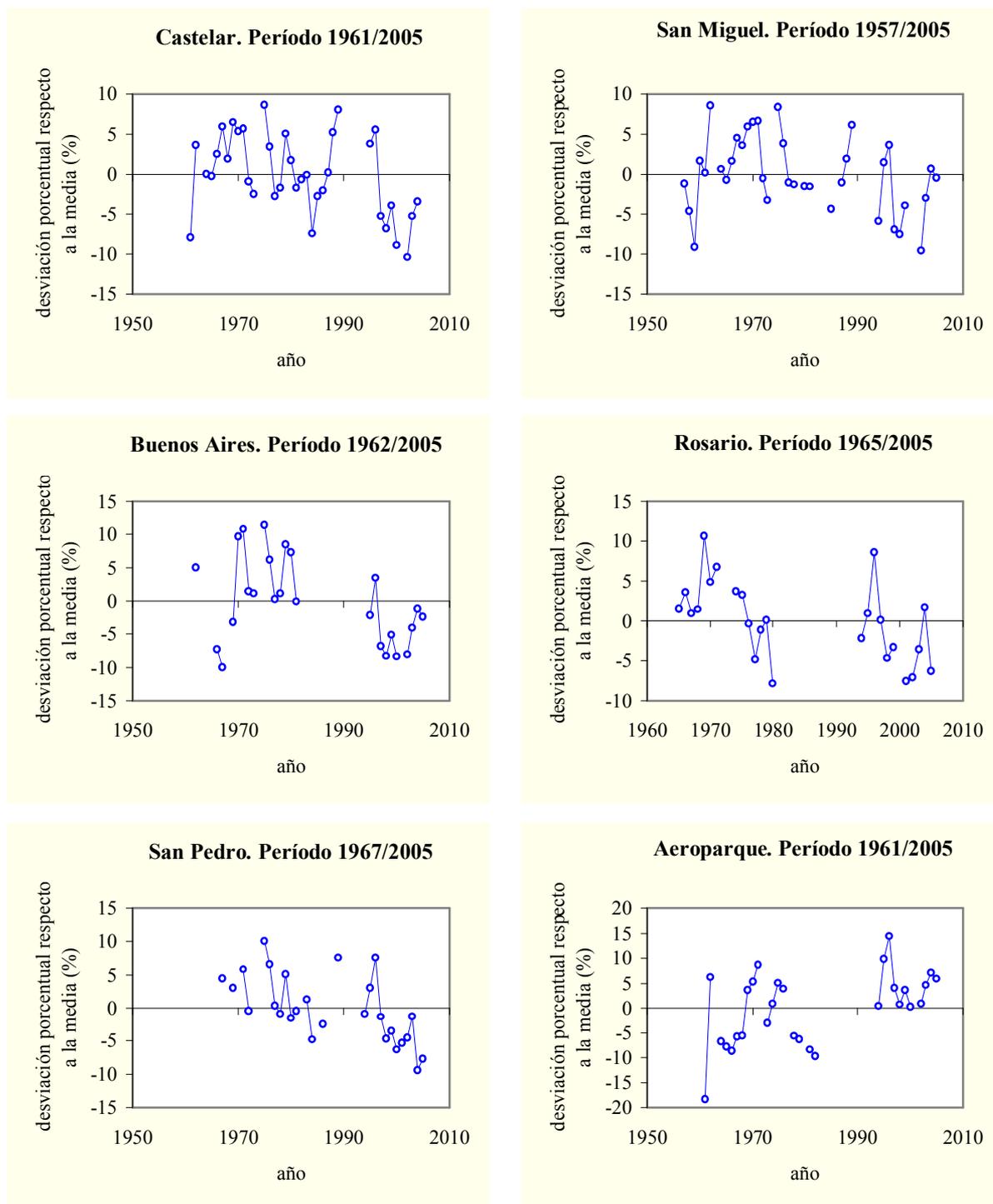


Figura 3: Evolución de la heliofanía efectiva en algunas de las estaciones argentinas de la región, analizada a través de la desviación porcentual relativa con respecto a las medias respectivas en el período bajo estudio.

pendientes calculadas por cuadrados mínimos para este período de simultaneidad resultaron $-0.02 \text{ MJ/m}^2\text{-año}$ para la irradiación y $0,00 \text{ horas/año}$ para la heliofanía efectiva.

A fin de tener en cuenta la importancia relativa de las variaciones observadas en las series temporales se calculó la desviación porcentual relativa con respecto a las medias respectivas en el período bajo estudio. La pendiente hallada indica que los promedios de heliofanía efectiva anual tendrían una tendencia a cambiar en un 3% al cabo de 30 años, mientras que la de la irradiación, al cabo de 30 años, provocaría una variación de 0,3%, valores ambos que están por debajo de la incerteza de la medición.

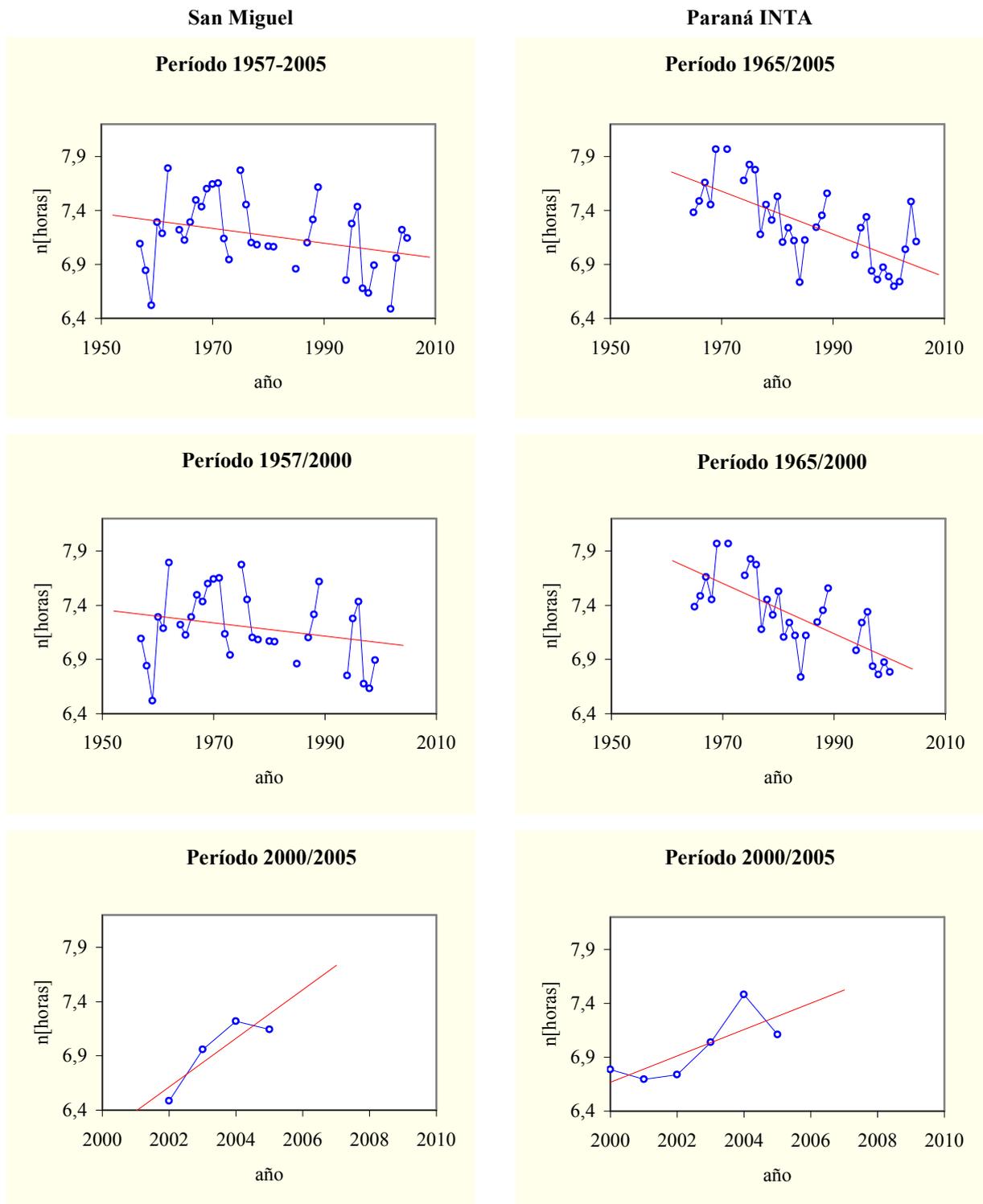


Figura 4. Para las estaciones San Miguel y Paraná INTA se presentan encolumnadas tres particiones arbitrarias de las series temporales de promedios anuales de heliofanía efectiva, incluyendo en cada periodo la recta tendencia.

Con el fin de analizar si al promediar sobre el período completo se pudiera haber compensado tendencias intermedias, se observaron los comportamientos decadales (o decádicos) en la estación Paraná, los que se muestran en la Figura 5 con su desvío estándar. La leve tendencia negativa no significativa observada anteriormente en la serie completa, parece invertirse en la última década (1998-2008), coincidiendo en esto con lo apuntado en otros trabajos (por ejemplo, Wild *et al.*, 2009; Sánchez-Lorenzo *et al.*, 2007). Si bien los resultados de la aplicación del test de Mann-Kendall arrojan valores no significativos en los valores de las pendientes, los escasos promedios que integran la serie decadal pueden cuestionar la validez de esta metodología y de las conclusiones obtenidas. Como la elección de los extremos de las décadas podría haber sido cualquiera y con ello modificarse los resultados, se decidió adoptar el criterio que utiliza el SMN al elaborar sus Estadísticas Climatológicas.

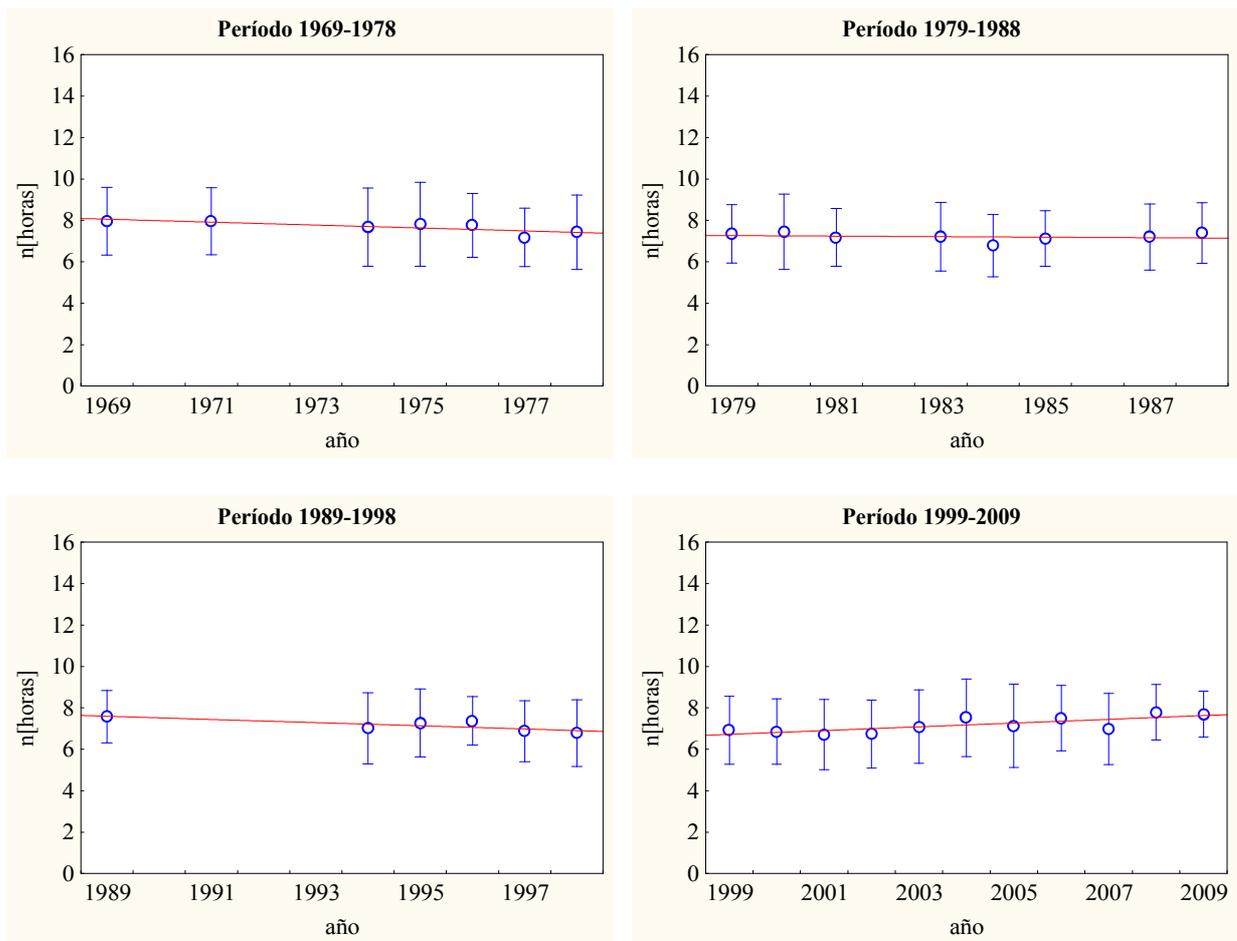


Figura 5: Series decádicas de promedios anuales de la heliofanía efectiva en la estación Paraná INTA (1969-2008).

Se analizaron entonces las series de desviación relativa de los promedios anuales de los valores diarios de la heliofanía efectiva y de la irradiación global en el período 2000-2009 (Figura 6), calculándose las pendientes de cada una. Los valores hallados parecerían indicar tendencias positivas que provocarían variaciones relativas entre los extremos del período analizado, tanto en los valores de la heliofanía efectiva como en la irradiación global, valores que superarían las incertezas respectivas, si bien la muestra es muy limitada en el tiempo.

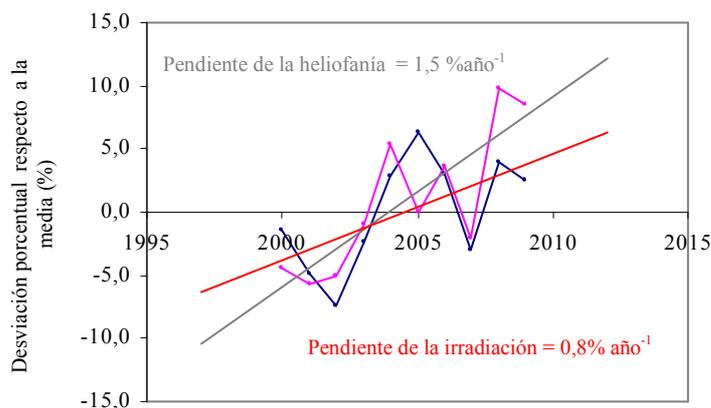


Figura 6: Evolución de los promedios anuales de la heliofanía efectiva y de la irradiación global en Paraná durante el período 2000-2009. Las series temporales aparecen como desviación porcentual con respecto a las medias respectivas en el período (%).

CONCLUSIONES

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 adquiridos entre 1986 y 2005 en las 11 estaciones del Uruguay. Si se analizaran aisladamente los promedios del siglo XXI podrían ubicarse en algunas estaciones aumentos en sus valores, del orden o por debajo de la incerteza de los registros (5,8%), lo que podría justificar completar al menos una década antes de sacar conclusiones y tener en cuenta los errores de estimación. Del lado argentino se llega a conclusiones similares: se observan unas pocas tendencias significativas (negativas casi en su mayoría), enmascaradas al tener en cuenta la incerteza del sistema de registro (7,0%); al separar las series en tramos (antes y después del año 2000) parece observarse un cambio creciente a partir del comienzo del siglo XXI, más evidenciado en las estaciones Paraná INTA y San Miguel. Sin embargo, el estudio detallado de las series de promedios anuales de irradiación global y de heliofania efectiva en Paraná INTA descarta o relativiza la importancia del cambio frente a las incertezas de medición, reforzando la opinión vertida por Gueymard y Myers (2009).

REFERENCIAS

- Blázquez M. L. y Grossi Gallegos H., 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. 185-188 (1997).
- Dzrdzeevskii, B., Flohn, H., Hofmeyr, W. L., Lamb, H. H., Mitchell, J. M., Rao, K. N., Wallen, C.C. Report of Working Group on Climatic Fluctuations. Submitted to the Commission for Climatology, World Meteorological Organization, for the 4th Session. April 1965. 135 p.
- Grossi Gallegos H. y Atienza G., Variación secular de la radiación global en la Argentina. Primeros resultados. En *Actas de la XVIII Reunión de Trabajo de la ASADES*, tomo I, pp. 04.15-04.21, San Luis, Argentina (1995).
- Grossi Gallegos H. y Blázquez M. L., Estudio de variables meteorológicas en la Estación San Miguel, provincia de Buenos Aires. Informe de avance. En *Actas de la XIX Reunión de Trabajo de la ASADES*, tomo I, pp. 04.1-04.4, Mar del Plata, Argentina (1996).
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I., Análisis de los datos de heliofania en el sur de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 8 N° 2, pp. 11.19-11.24 versión CD-ROM (2004).
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I., Análisis de las series de datos de heliofania en estaciones de Argentina ubicadas al norte de los 38°S. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 10, pp. 11.21-11.26 versión CD-ROM (2006).
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I., Análisis de las series de promedios anuales de heliofania (duración de la insolación) en Uruguay. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 20, pp. 31-35 (2007a).
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M.I., Análisis de las series de datos anuales en la estación Paraná-INTA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 11, pp. 11.31-11.36 versión CD-ROM (2007b).
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I., Análisis de la serie de los promedios anuales de heliofania efectiva en Argentina. *Meteorológica* vol. 32 y 33 N° 1 y 2, 5-17 (2008).
- Gueymard C. A. and Myers D. R., Evaluation of conventional and high-performance routine solar radiation measurements for improved solar resource, climatological trends, and radiative models. *Solar Energy* vol. 83 No. 2, pp. 171-185 (2009).
- Raichijk C., Grossi Gallegos H. y Righini R., Análisis de los datos de heliofania en la República Oriental del Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 8 No. 2, 11.101-11.105 versión CD-ROM (2006a).
- Raichijk C., Grossi Gallegos H. y Righini R., Variabilidad espacial de la heliofania (duración de la insolación) en la Pampa Húmeda argentina, Uruguay y sur del Brasil. *Energías Renovables y Medio Ambiente* vol. 19, pp. 33-37 (2006b).
- Sanchez-Lorenzo A., Brunetti M., Calbo J. and Martin-Vide J., Recent spatial and temporal variability and trends of sunshine duration over the Iberian Peninsula from a homogenized data set. *J. Geophys. Res.*, 112, D201215, doi:10.1029/2007JD008677 (2007).
- Sanchez-Lorenzo A., Pallé E., Wild M., Calbo J., Brunetti M., Stanhill G., Brázdil R., Pereira and Azporin-Molina C., The SunCloud project: worldwide compilation of long-term series of sunshine duration and cloudiness observations. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU2010-14316, EGU General Assembly (2010).
- Stanhill G., The distribution of global solar radiation over the land surfaces of the Earth. *Solar Energy* vol. 31 No. 1, pp. 95-104 (1983).
- Stanhill G. and Moreshet S., Global radiation climate changes: the World Network. *Climatic Change* vol. 21, pp. 57-75 (1992).
- Wild M., Trüssel B., Ohmura A., Long C., König-Langlo G, Dutton E. and Tsvetkov A., Global dimming and brightening: An update beyond 2000. *J. Geophys. Res.* vol. 114, D00D13, doi:10.1029/2008JD011382 (2009).
- Wild M., Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.* vol. 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470 (2009).

ABSTRACT: Since 1996 studies with the series of solar radiation of stations located in Argentina were made, analyzing also the behavior of other associate variables. The result was to discard the existence of significant trends. Nevertheless, the studies carried out at world-wide level suggested a diminution in the solar radiation reaching the surface of the Earth between 1950s and 1980s (“global dimming”), with partial recovery in many places more recently (“global brightening”). As the data of sunshine duration count in South America with records of greater extension than those of solar radiation, the times series of the annual averages of sunshine duration obtained in Uruguay and the region of Argentina near the Rio de la Plata are analyzed in this work. The trends found for all the series are not significant; nevertheless, in the first years of the 21st century an increasing change seems to outline itself.

.Key words: sunshine duration, trends, Rio de la Plata.