

ANÁLISIS DEL CLIMA SOLAR DE PARANA, ENTRE RIOS (ARGENTINA)

Hugo Grossi Gallegos y María Isabel Spreafichi^(*)

Servicio Meteorológico Nacional, División Radiación Solar San Miguel
Avda. Balbín 3100, (1663) San Miguel, Buenos Aires, ARGENTINA – E-mail: risol_sanm@yahoo.com.ar

Recibido: 09-09-11; Aceptado: 30-09-11.

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 la estación INTA Paraná que posee registros casi simultáneos de ambas variables meteorológicas. Las tendencias halladas para las series completas resultaron significativas, pero el error instrumental lo enmascara; sin embargo, en los primeros años del siglo XXI parece esbozarse un cambio creciente.

Palabras claves: heliofanía, irradiación solar, series temporales, tendencias.

ANALYSIS OF THE SOLAR CLIMATE OF PARANA, ENTRE RIOS (ARGENTINA)

ABSTRACT.- From 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 carried out studies 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 INTA Paraná station that shows nearly simultaneous records from both meteorological variables. The trends found for the complete series are significant, but instrumental errors mask it; nevertheless, in the first years of the 21st century an increasing change seems to outline itself.

Key words: sunshine hours, solar irradiation, time series, trends.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la posible variación de los valores de radiación solar sobre la superficie de la tierra se ha intensificado en los últimos años con el fin de poder atribuirle modificaciones en el balance radiativo y de ahí, efectos de cambios en el clima. Al margen de su influencia climática, los efectos directos de posibles variaciones 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 evapotranspiración, por lo que cualquier cambio significativo podría influir sobre las fuentes de agua y alimentos del hombre.

En un trabajo publicado hace casi 20 años, Stanhill y Moreshet (1992) volvieron a analizar desde el punto de vista del Cambio Climático las variaciones ya observadas en 1983 por Stanhill a lo largo del período de medición de la Red Mundial de Radiación (*World Radiation Network, WRN*), encontrando que eran grandes y estadísticamente significativas 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 situadas 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 aquí irradiación a la radiación 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, basándose en 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* como la heliofanía, habida cuenta de que es mayor el número de registros de esta variable y más extensos en el tiempo.

^(*) Personal CONICET

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 pareciera tener un carácter regional. Las referencias 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 sistematizados por Grossi Gallegos y Spreafichi (2004, 2006, 2007a, 2007b y 2008). Regionalmente, se pueden citar los trabajos de Silva *et al.* (2010), en el que analizaron posibles tendencias en series de radiación solar en el Nordeste de Brasil, y de Raichijk (2011), quien analizó las series de promedios mensuales de heliofanía procedentes de 237 estaciones meteorológicas ubicadas en 5 regiones climáticas de América del Sur.

En este trabajo se analizan las series temporales de datos de heliofanía y de irradiación solar global tomados diariamente en la estación Paraná (Entre Ríos), dependiente del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

2. DATOS Y METODOLOGÍA

La irradiación solar global diaria comenzó a medirse en la estación de la Red Solarimétrica ubicada en el INTA en Paraná (31,83°S; 60,52°W, 78 msnm) en diciembre de 1978 mediante un solarímetro fotovoltaico Rho Sigma modelo 1008 y un integrador SIDCON modelo 5011; el error de medición de este tipo de estaciones es del 6%.

A partir del 18 de mayo del año 2010 el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján (UNLu) opera a la par un piranómetro termoelectrico Kipp & Zonen modelo CM5 (contrastado previamente contra un patrón secundario de la misma marca, modelo CMP11) acoplado a un equipo automático de adquisición de datos NOVUS que interroga al sensor cada minuto y guarda la integral correspondiente a cada diez minutos. Se compararon los registros diarios de ambos radiómetros entre la fecha de instalación y el 31 de diciembre y la correlación obtenida fue muy buena (figura 1), validando de esta manera el comportamiento de la estación a lo largo de estos 32 años (el error del CM5 en estas condiciones puede considerarse del 3%).

En el tratamiento de los datos diarios de irradiación se decidió eliminar todo valor que superara el 90% de la irradiación que se recibiría fuera de la atmósfera ($0,90H_0$); teniendo en cuenta que se puede establecer una correlación lineal entre el índice de claridad (cociente entre la irradiación global registrada en tierra y la extraterrestre) y la heliofanía relativa, se fijó un criterio de selección basado en el nivel de confianza del 90% del error típico de la correlación y se implementó un programa *ad hoc*. Los valores que escapan a esta banda se marcan y guardan en hojas separadas; si bien se los reemplaza temporariamente para recalcular los parámetros de la correlación lineal utilizada con fines selectivos, no quedan incorporados a la base original, de manera que cada investigador pueda

intentar completar las series de la forma que considere más conveniente o adecuada. (Roberti *et al.*, 2000).

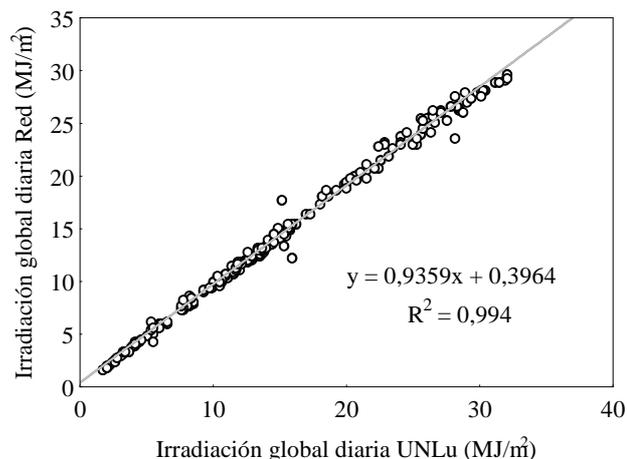


Fig. 1. Comparación de los valores diarios adquiridos en Paraná con un radiómetro fotovoltaico con los obtenidos simultáneamente con un piranómetro termoelectrico.

Los promedios mensuales de la heliofanía efectiva digitalizados desde 1965 fueron extraídos del Banco de Datos del Servicio Meteorológico Nacional; los 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 aparentemente a la utilización de fajas rectas erróneamente impresas en su reverso (rotuladas como EQUINOCCIOS las correspondientes a SOLSTICIOS y viceversa, lo que modifica la separación entre las marcas horarias, que debe ser mayor en las primeras); al no poder identificar su utilización por parte de los observadores, el SMN decidió no tenerlos en cuenta para la preparación de las Estadísticas Climatológicas de la década, si bien los valores no fueron eliminados del Banco de Datos.

El heliógrafo del INTA Paraná tiene un portabandas fijo y utiliza bandas curvas, las que no habrían sufrido el error antes mencionado pues están bien diferenciadas en forma y tamaño. Por lo tanto, en este trabajo fueron utilizados los datos correspondientes a los años 1991 a 1993. Suponiendo que el umbral de respuesta de las fajas utilizadas no cambió a través del tiempo, y de acuerdo con Raichijk *et al.* (2006), se consideró que los promedios mensuales de la heliofanía diaria en las estaciones argentinas están afectados por un error de 7,04%.

Para este trabajo se calcularon en primer lugar los promedios anuales para los años que tenían completos los registros mensuales, con lo cual las muestras se redujeron, 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 irradiación y de la heliofanía).

Vale la pena dedicar un comentario al procedimiento de depuración utilizado. A pesar de correr el riesgo de perder información de base se considera conveniente depurar los datos originales (sobre todo, 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 obtenidas los errores de estimación o de medición, según el caso, antes de sacar conclusiones apresuradas. Como bien dicen Gueymard y Myers (2009), "las tendencias corrientemente comunicadas son sólo de unos pocos por ciento 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 los datos 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.

3. RESULTADOS

3.1 Efectos periódicos

Antes de analizar la posible existencia de tendencias en las series es necesario detectar efectos periódicos y eliminarlos. En el trabajo ya citado Silva *et al.* (2010) dan cuenta de la presencia en el Nordeste del Brasil de un ciclo decadal (9-14 años) de precipitación asociado a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) o, independientemente, a las variaciones de temperatura superficial de la parte tropical del Atlántico Sur; además, mencionan que fueron observados ciclos de menos de 10 años en las series de precipitación. En base a estos resultados, y para eliminar de las series de irradiación solar y de heliofanía la posible influencia de ellos y del ciclo solar de 11 años, utilizaron como filtro promedios móviles de 14 años, método que según Eskridge *et al.* (1997) tiene el mismo nivel de precisión que el de la transformada *wavelet*.

En un trabajo anterior Grossi Gallegos y Spreafichi (2008) analizaron el comportamiento de los promedios mensuales de irradiación solar global, heliofanía efectiva y precipitación en relación al del MEI (Multivariate ENSO Index) en sus dos fases: el Niño y la Niña, durante los meses de octubre a abril a lo largo de los años en que se disponía de datos en la estación Paraná ya que, en caso de existir, la influencia del fenómeno El Niño no suele tener un desfase mayor. Se estudió para ello el comportamiento de las anomalías con respecto al valor medio de la variable en el período observado.

Frente a elevados porcentajes de aumento en la anomalía relativa del MEI observados durante el período del Niño 1982-1983 sólo se registró un moderado ascenso en los valores de las anomalías relativas medias de la irradiación global y de la heliofanía en octubre y noviembre y algo menor en marzo, acompañadas por sus correspondientes descensos en la precipitación. También fue dable observar una anomalía positiva en la precipitación en febrero acompañada por leve variación en la irradiación y en la heliofanía.

Por otra parte, en el período del Niño 1997-1998 el elevado valor de la anomalía relativa del MEI estuvo acompañado por una disminución permanente de las correspondientes a la irradiación y a la heliofanía, observando sólo un importante aumento en la precipitación en los meses de diciembre, enero y marzo (de donde puede inferirse un incremento general de la nubosidad en este período como causa del descenso de las variables solares).

En los fenómenos La Niña seleccionados, caracterizados por disminuciones importantes en las anomalías relativas del MEI, fue posible observar en el período 1988-1989 leves aumentos en las anomalías de la irradiación y de la heliofanía (con disminución en marzo), acompañadas por una disminución de las precipitaciones (con un valor extremo cercano al 100% en enero), disminución no tan definida ni acentuada en La Niña 1999-2000, período en el que la irradiación y la heliofanía presentan anomalías en general negativas.

Durante la fase caliente 1982-1983 se observó en San Miguel (Buenos Aires) que las anomalías en la irradiación global y la heliofanía tenían un comportamiento similar que en Paraná, mientras que la anomalía en la precipitación no presentaba el aumento observado en febrero, por lo que debe obedecer a un fenómeno de alcance local. Durante el período 1997-1998 el comportamiento de la heliofanía y la precipitación fueron similares a los observados en Paraná, no así la irradiación que muestra anomalías positivas, al contrario de lo observado en todo el período en Paraná.

Durante la fase fría 1988-1989, las anomalías de San Miguel se comportaron de manera similar a Paraná, pero en 1999-2000 nuevamente la irradiación lo hizo de manera bien diferenciada y con valores marcadamente positivos.

Ropelewsky y Halpert (1987) mostraron que en el área agrícola argentina, durante los episodios calientes del ENSO (El Niño), se registran precipitaciones por encima de lo normal desde noviembre del año en que inicia el mismo hasta febrero del año siguiente, lo que no parece condecirse estrictamente con los resultados de este trabajo. Por el contrario, en los episodios fríos (La Niña), afirmaron que ocurren lluvias por debajo de lo normal desde julio a diciembre del año en el que el mismo se inicia, lo cual se verifica en Paraná para La Niña 1988-1989 y aproximadamente en San Miguel para la misma fase del ENSO 1999-2000.

Por lo tanto, y coincidiendo con la afirmación de Skansi *et al.* (2000) acerca del régimen de lluvias, se concluyó que el comportamiento de la irradiación solar en el área durante la mayor parte del año no depende del ENSO.

En cuanto a una posible influencia del ciclo solar (de 11 años, en promedio), también citado en el trabajo de Silva *et al.* (2010), se analizó la marcha de uno de sus indicadores, esto es, el promedio anual del número de Wolf con la de los valores de heliofanía efectiva y de irradiación solar en Paraná. Cabe recordar que en 1848, Johann Rudolf Wolf diseñó un método para cuantificar diariamente las observaciones del número de manchas solares; aunque con distinto grado de rigurosidad se guarda un registro del promedio anual del número manchas solares desde el año 1749, completando hasta el presente un total de 23 ciclos. El número relativo diario de manchas solares, número de Wolf, más recientemente denominado International Sunspot Number (ISN), se define como $R = K(10g + s)$, donde g es

el número de grupos de manchas, s es el número total de manchas distinguibles y K es un factor de homologación específico de cada telescopio empleado en la observación (Parodi *et al.*, 2010).

En los últimos años se han hecho numerosos estudios acerca del rol que cumple el sol en las variaciones climáticas (Hoyt y Schatten, 1997; Rind, 2002).

Surgieron así algunas evidencias observacionales consistentes con las teorías propuestas a lo largo del ciclo solar sobre la relación entre los rayos cósmicos galácticos y la variación de la cobertura nubosa global (Marsh y Svensmark, 2000; Agosta, 2004).

En la figura 2 se presenta el comportamiento de los promedios anuales del ISN en el período de interés. Comparando con las series de promedios anuales de irradiación solar global y de heliofanía diarias (figura 3) no se detectó ninguna relación evidente. A pesar de ello, se aplicaron a las series promedios móviles con un período de 14 años.

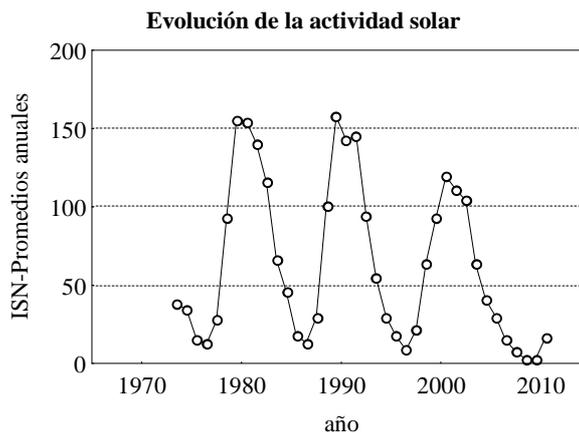


Fig. 2. Evolución del valor medio anual del número de Wolf en los últimos tres ciclos solares.

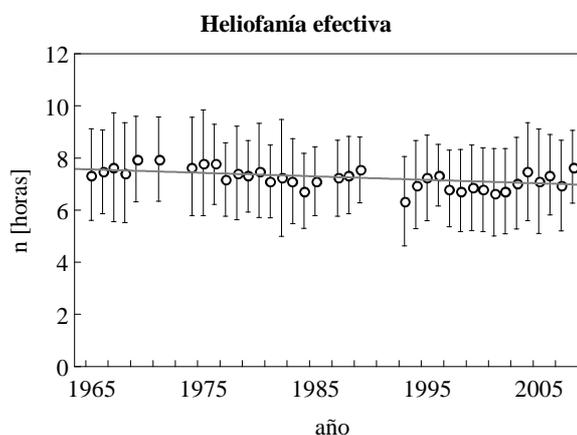
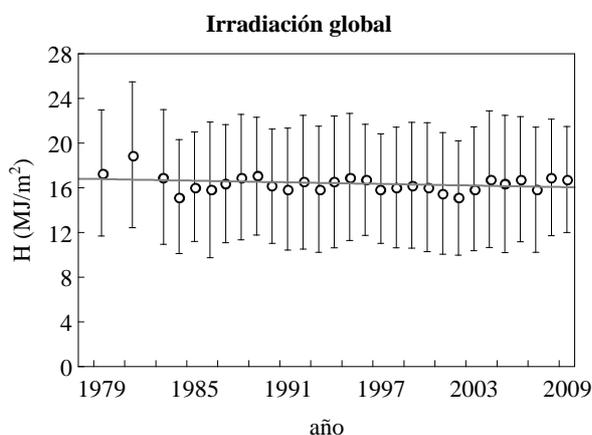


Fig. 3. Evolución de los promedios anuales de los valores diarios de la irradiación solar global y de la heliofanía efectiva, con sus correspondientes desvíos estándar.

3.2. Análisis de tendencias

En la figura 3 se presenta la evolución temporal de los promedios anuales de la heliofanía efectiva y de la irradiación solar global diarios con sus desvíos estándar. Analizando con el test de Mann-Kendall la existencia de tendencias en las series tratadas con promedios móviles, se encontraron pendientes negativas ($-0,022$ h/año para la heliofanía, significativa al 5%, y $-0,022$ MJ/m²/año para la irradiación, no significativa); al analizar las series originales se encontraron pendientes negativas similares, pero ambas significativas ($-0,013$ h/año y $-0,024$ MJ/m²/año, respectivamente). Sin embargo, en ambos casos, el error instrumental enmascara la variación hallada para el período registrado.

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 que provocaría un cambio de un 1,2% 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). Con el fin de analizar si al efectuar los promedios sobre el período completo se pudiera haber compensado tendencias intermedias, se observaron los comportamientos decádicos en la estación Paraná. 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 Servicio Meteorológico Nacional al elaborar sus Estadísticas Climatológicas.

Al hacerlo, la leve tendencia negativa observada anteriormente en la serie completa de heliofanía parece anularse (Figura 5) e, inclusive, invertirse en la última década (2000-2009), 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 individuales, los escasos promedios que integran la serie decadal podrían cuestionar la validez de esta metodología y de las conclusiones obtenidas.

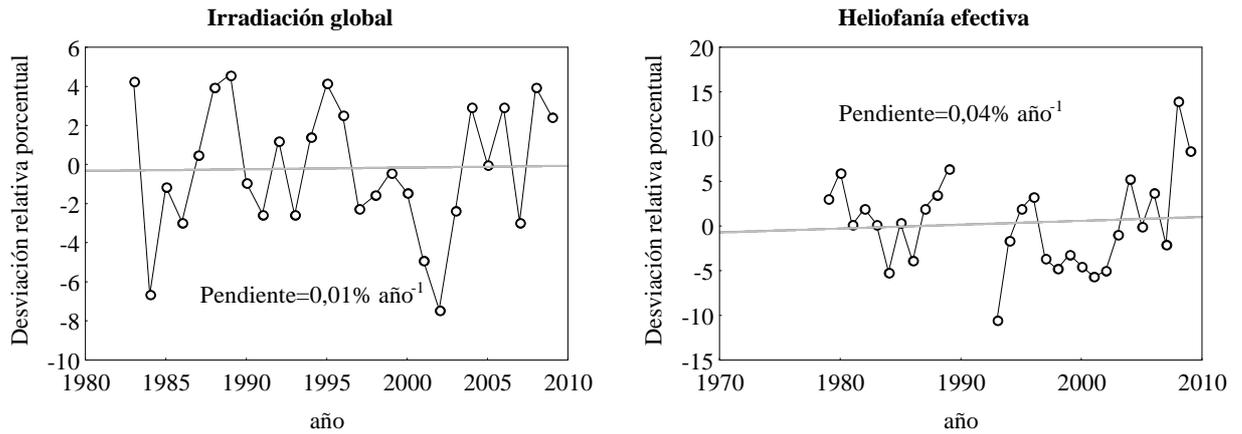


Fig. 4. Evolución de la irradiación global y de la heliofanía efectiva anual en Paraná INTA a lo largo del período 1979-2009, analizada a través de la desviación porcentual relativa con respecto a la media en el periodo bajo estudio.

En vista de ello, se definieron algunos operadores para cuantificar la variación interdecadal; los resultados se presentan en la Tabla I. Si bien la Diferencia Interdecadal Relativa Normalizada positiva observada entre la cuarta y la

tercera década es pequeña, justifica dedicarle un párrafo aparte.

Tabla I. Variaciones relativas interdecadales observadas en las series decádicas de heliofanía..

Década	Promedio decadal (N_i) y desvío [horas]	$Dv_i = N_i - N$ [horas]	$\delta_i = Dv_i/N$	$\delta\%$	$\Delta \%(i;j) = 100 * (N_i - N_j)/N$
1: 1970-1979	$7,6 \pm 0,3$	$Dv_1 = 0,4$	0,056	5,6	$\Delta (4;1) = -6,9$
2: 1980-1989	$7,2 \pm 0,2$	$Dv_2 = 0,0$	0,000	0,0	$\Delta (4;2) = -1,4$
3: 1990-1999	$6,9 \pm 0,3$	$Dv_3 = -0,3$	-0,0417	- 4,2	$\Delta (4;3) = 2,8$
4: 2000-2009	$7,1 \pm 0,4$	$Dv_4 = -0,1$	-0,0139	- 1,4	$\Delta (3;2) = -4,2$
					$\Delta (3;1) = -9,7$
					$\Delta (2;1) = -5,5$

Se analizaron entonces las series de desviación relativa de los promedios anuales de los valores diarios de la heliofanía efectiva y de la irradiación solar global en el período 2000-2009 (Figura 6), calculándose las pendientes. Los valores positivos hallados para las tendencias de la

heliofanía efectiva ($1,7\% \text{ año}^{-1}$) y de la irradiación ($0,8\% \text{ año}^{-1}$) provocarían variaciones relativas entre los extremos del período analizado que superarían las incertezas de medición de las respectivas variables, si bien la muestra está limitada a una década y limita así el pronóstico.

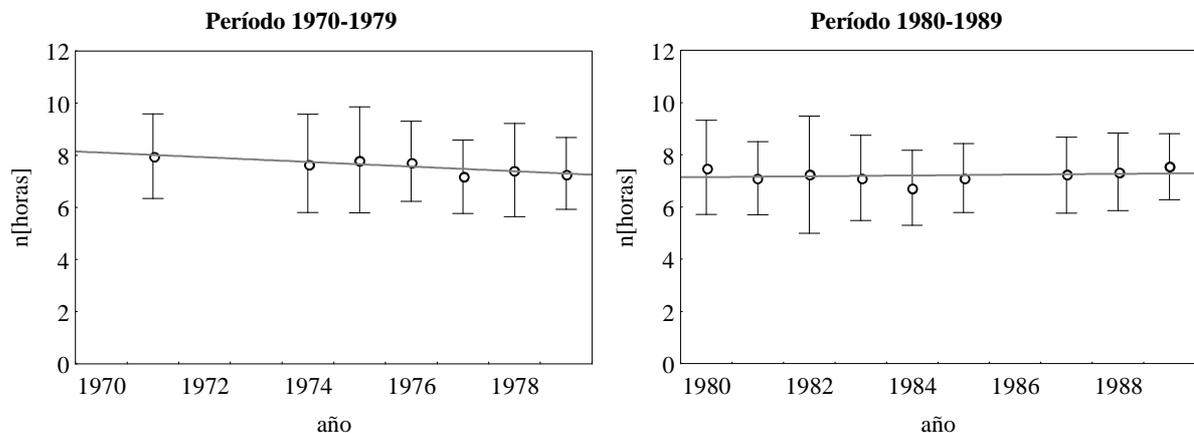


Fig. 5: Series decádicas de promedios anuales de la heliofanía efectiva en la estación Paraná INTA. Las barras indican los desvíos estándar de los promedios.

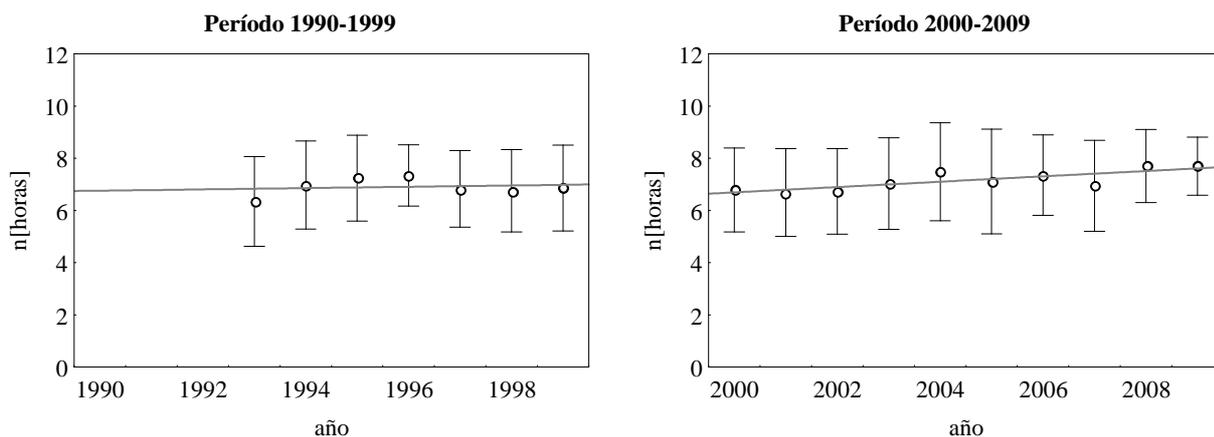


Fig. 5 bis. Series decádicas de promedios anuales de la heliofanía efectiva en la estación Paraná INTA. Las barras indican los desvíos estándar de los promedios.

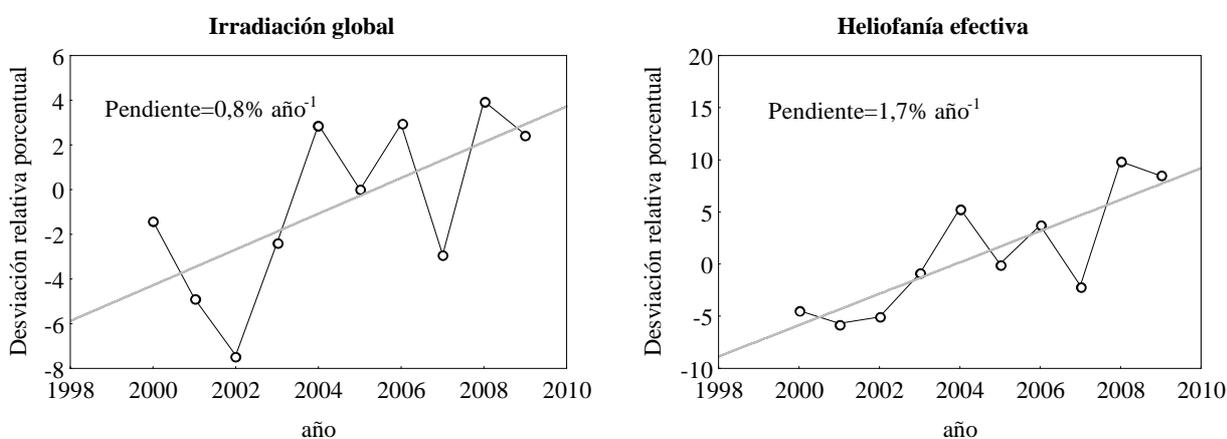


Fig. 6: Evolución de los promedios anuales de la irradiación global y de la heliofanía efectiva en Paraná durante el período 2000-2009. Las series temporales aparecen como desviación porcentual con respecto a la media general en el período.

4. DISCUSIÓN

Los promedios anuales de heliofanía efectiva correspondientes a 1990, 1991 y 1992 no fueron considerados porque quedar incompletos al ser eliminado un mes en cada uno de ellos por el proceso de consistencia antes descrito (febrero, diciembre y junio, respectivamente).

En las series de irradiación solar global y heliofanía efectiva registradas en la estación INTA Paraná se observaron tendencias significativas, pero que resultan enmascaradas al tener en cuenta la incerteza del sistema de registro; al dividir las series en décadas pareció observarse un cambio creciente a partir del comienzo del siglo XXI, razón por la cual fue analizada separadamente, mostrando una inversión en la tendencia.

En base a este comportamiento podría intentarse trazar no ya una recta sino una curva polinómica que minimizara los desvíos con respecto a los valores de la serie. Si se aplica a la serie de los promedios anuales de heliofanía efectiva, ya que presenta mayor extensión temporal, se obtuvo el polinomio de tercer grado que se muestra en la figura 7, que pareciera indicar que el aumento de la última década pudo haber también ocurrido en la década 1960-1969. Como no fue posible acceder a esta información, quedaría planteada la posibilidad de un fenómeno cíclico para analizar.

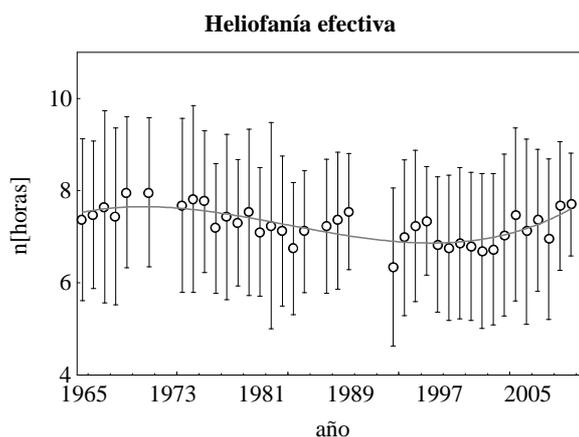


Fig. 7: Evolución de los promedios anuales de los valores diarios de la heliofanía efectiva, aproximada por un polinomio de tercer grado.

Sin embargo, la estación de registro de la radiación solar de Postdam, Alemania, que posee una de las series más largas del mundo, muestra un comportamiento similar (Gueymard, 2010) que refuerza esta hipótesis, como se puede visualizar en la figura 8.

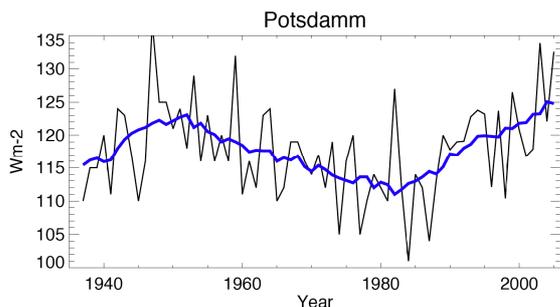


Fig. 8: Variación de la irradiancia global horizontal en Postdam, Alemania, entre 1937 y 2006 (reproducido de la presentación de Gueymard, 2010)

5. CONCLUSIONES

La pendiente de la tendencia lineal hallada para la serie completa de promedios anuales de heliofanía efectiva resultó negativa y significativa al 5% (-0,013 h/año), resultado que coincide con el hallado por Raichijk (2011) para las estaciones ubicadas en la región climática Templada-Húmeda de América del Sur y con otros trabajos, disminución que dio lugar a la denominación de *solar dimming*.

Por otra parte, si se consideran las series de promedios anuales, tanto de heliofanía efectiva como de irradiación solar global, a partir de la última década del siglo XX y la primera del siglo XXI la tendencia se anula e invierte, coincidiendo con el fenómeno denominado *solar brightening*. Si se analiza la serie completa de heliofanía efectiva (1965-2009) y se la aproxima por un polinomio, no sólo aparece un *dimming* a fines de los '90 y un *brightening* a comienzos de los 2000, sino también la posibilidad de un efecto previo similar (abrilantamiento a comienzos de los '60), lo que daría lugar a pensar en alguna periodicidad.

Sin embargo, el estudio detallado de las series de promedios anuales de irradiación global y de heliofanía 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), a excepción que se mantuviera la tendencia creciente observada en la primera década del siglo XXI, que resultaría en aumentos que exceden la incerteza de medición de ambas variables meteorológicas.

Teniendo en cuenta los cambios detectados en las series temporales, valdría la pena analizar con más detenimiento, junto con el comportamiento de otras variables asociadas, los valores que llevaron al SMN a anular de las Estadísticas Climatológicas los promedios de heliofanía efectiva correspondientes a los años 1991-1993 ya que el posible error de identificación de las fajas no sería suficiente para explicar apartamientos importantes, como se muestra en el ANEXO que sigue.

Por otra parte, Roldán *et al.* (2005), en un análisis preliminar de las fajas de heliógrafos utilizados en Argentina, mostraron que el valor del umbral a partir del cual comienzan a registrar presenta una dispersión de aproximadamente el 25%.

APÉNDICE

Evaluación del error de lectura en los registros de heliofanía efectiva por uso de fajas mal impresas identificadas como Form HF (07 y 08) del SMN en heliógrafo Campbell-Stokes.

Este tipo de faja es recta; la identificada como SOLSTICIO está indicada para usar del 6 de noviembre (N=13,7 horas) al 5 de febrero (N=13,7 horas) y del 6 de mayo (N=10,6 horas) al 5 de agosto (N=10,6 horas). Por otra parte, la identificada como EQUINOCCIO está indicada para ser usada del 6 de febrero (N=13,7 horas) al 5 de mayo (N=10,6 horas) y del 6 de agosto (N=10,6 horas) al 5 de noviembre (N=13,7 horas).

Para evaluar el máximo error relativo que se puede cometer utilizando las fajas intercambiadas se consideró en la estación San Miguel un día muy claro ($n/N=0,95$ con $N=14,5$ horas) y se midió la longitud del trazo máximo que podría llegar a quemar sobre la banda SOLSTICIO (corresponde al valor máximo de un día de verano de $n=13,8$ horas). El valor hallado fue de 24,4 cm, el que transportado a la banda EQUINOCCIO da una lectura de 13,1 horas. Por lo tanto, en este caso el error relativo porcentual fue $ER\% = 100(13,1-13,8)/13,8 = -5,3\%$.

Por el contrario, si se registra un valor de heliofanía elevado en invierno ($n/N=0,95$ de $N=9,9$ horas, correspondiente al 20 de junio), el valor quemado en la faja SOLSTICIO tendría una longitud de 16,3 cm, lo que en la faja EQUINOCCIO arrojaría un valor de 8,7 horas. Por lo tanto, en este caso el error que se cometería es de: $100(8,7-9,4)/9,4 = -7,4\%$.

Si se considera un día con un 95% de heliofanía relativa en un período que correspondiera a la banda EQUINOCCIO, por ejemplo el 25 de marzo (en este caso $N=12$ horas, $n = 11,4$ horas); su registro en la banda correcta arroja una longitud de 22,4 cm la que volcada a una banda correspondiente a SOLSTICIO da como lectura 12,8 horas. Por lo tanto, en este caso el error que se cometería asciende a: $100(12,8-12,0)/12,0 = 6,7\%$. Para el 18 de septiembre el caso sería similar.

Si ahora se considera un valor elevado a comienzos del período de uso de la faja SOLSTICIO (5 de febrero, con $N=13,7$ horas y $n=13,0$ horas), el valor quemado tendría una longitud de 22,9 cm, lo que en la faja EQUINOCCIO correspondería a un valor de 12,4 horas, cometiendo un error $ER\% = 100(12,4-13,0)/13,0 = -4,6\%$.

En el otro extremo del intervalo de uso de la faja SOLSTICIO (esto es, el 6 de mayo, $N=10,6$ horas y $n=10,1$ horas) este valor daría una longitud de 17,7 cm; volcada a la banda EQUINOCCIO arrojaría una lectura de $n=10$ horas. En este caso, $ER\% = 100(10-10,1)/10,1 = -1\%$.

De manera similar, si se considera ese valor elevado a comienzos del período de uso de la faja EQUINOCCIO, esto es, 6 de agosto ($N=10,6$ horas y $n=10,1$ horas), la longitud del quemado en la faja correcta sería de 18,9 cm; volcada a la banda SOLSTICIO daría una lectura de 10,6 horas, cometiendo un error relativo porcentual de $100(10,6-10,1)/10,1 = 4,9\%$.

En el otro extremo del intervalo de uso de la faja EQUINOCCIO, el 5 de noviembre ($N=13,7$ horas y $n=13,0$ horas), el valor quemado en la faja SOLSTICIO tendría una longitud de 16,3 cm, lo que en la faja EQUINOCCIO arrojaría un valor de 8,7 horas. Por lo tanto, en este caso el error que se cometería es de: $100(8,7-9,4)/9,4 = -7,4\%$.

horas) la longitud del registro sería de 22,6 cm, la que volcada a la faja SOLSTICIO daría una lectura de 12,6 horas, generando un error $ER\% = 100(12,6-13)/13 = -3,1\%$.

En todos los casos analizados, para este día excepcional muy poco frecuente, el error que se comete es del orden o menor que el estimado para los valores medios mensuales en la región y el peso de estos errores diarios sobre la media mensual es despreciable.

REFERENCIAS

- Agosta, E. A., (2004). Variabilidad del clima terrestre y rayos cósmicos galácticos durante el ciclo solar de 11 años: revisión teórica. *Meteorológica*, **29**, n.1 y 2, 47 – 62.
- Blázquez M. L. y 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*, **1** N° 1, pp. 185-188.
- Grossi Gallegos H. y Atienza G. (1995). 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.
- Grossi Gallegos H. y Blázquez M. L. (1996). 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.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2004). Análisis de los datos de heliofanía en el sur de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 8 N° 2, pp. 11.19-11.24 versión CD-ROM.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2006). Análisis de las series de datos de heliofanía 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.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2007a). Análisis de las series de promedios anuales de heliofanía (duración de la insolación) en Uruguay. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 20, pp. 31-35.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2007b). 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.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2008). Análisis de la serie de los promedios anuales de heliofanía efectiva en Argentina. *Meteorológica* vol. 32 y 33 N° 1 y 2, 5-17.
- Gueymard, C. A. (2010) *Solar Resource Assessment for CSP and CPV*, Pt. 2. <http://www.slideshare.net/sustenergy/csp-training-series-solar-resource-assessment-22>.
- Hoyt, D. V. and Schatten, K. H., 1997. *The Role of the Sun in Climate Change*, Oxford University Press, New York, 279pp.
- Marsh, N. and Svensmark, H. (2000). Low Cloud Properties Influenced by Cosmic Rays. *Phys. Rev. Lett.* **85**, 5004–5007.
- Raichijk, C., Grossi Gallegos, H. y Righini, R., (2006). Variabilidad espacial de la heliofanía (duración de la insolación) en la Pampa Húmeda argentina, Uruguay y sur del Brasil. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **19**, 33-37.
- Raichijk, C. (2011). Observed trends in sunshine duration over South America. *Int. J. Climatol.* doi: 10.1002/joc.2296.
- Rind, D.. (2002) The Sun's Role in Climate Variations. *Science*, vol. 26, 673-677.
- Roldán, A., Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2005). Análisis preliminar de las fajas de heliógrafos utilizados en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184), **9**, 2, 11.09 -11.13 versión CD-ROM.
- Roberti, A., Renzini, G., Grossi Gallegos, H. (2000). Desarrollo de un software capaz de correlacionar y consistir datos de radiación solar y heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 2, versión CD-ROM.
- Sanchez-Lorenzo A., Brunetti M., Calbo J. and Martin-Vide J. (2007). 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.
- Sanchez-Lorenzo A., Pallé E., Wild M., Calbó J., Brunetti M., Stanhill G., Brázdil R., Pereira and Azporin-Molina C. (2010). The SunCloud project: worldwide compilation of long-term series of sunshine duration and cloudiness observations. *Geophysical Research Abstracts*, **12**, EGU2010-14316, EGU General Assembly.
- Stanhill G. (1983). The distribution of global solar radiation over the land surfaces of the Earth. *Solar Energy* **31**, 1, 95-104.
- Stanhill G. and Moreshet S. (1992). Global radiation climate changes: the World Network. *Climatic Change*, **21**, 57-75..
- Wild M., Trüssel B., Ohmura A., Long C., König-Langlo G, Dutton E. and Tsvetkov A. (2009). Global dimming and brightening: An update beyond 2000. *J. Geophys. Res.* **114**, D00D13, doi:10.1029/2008JD011382.
- Wild M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.