

VARIACIÓN DE ~27 DÍAS EN LA ACTIVIDAD MAGNÉTICA TERRESTRE: CARACTERÍSTICAS GLOBALES Y UN NUEVO ENFOQUE BASADO EN EL ORIGEN DE LAS SEÑALES

27-DAY VARIATION IN TERRESTRIAL MAGNETIC ACTIVITY: GLOBAL CHARACTERISTICS AND A NEW APPROACH BASED ON THE ORIGIN OF THE SIGNALS

Facundo Leandro Poblet¹, Francisco Azpilicueta¹

1 Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, CONICET, La Plata, Argentina.

Email: fpoblet@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

El campo magnético terrestre posee un amplio rango de variaciones temporales. En primera instancia se pueden clasificar según si provienen del campo magnético de origen interno como las variaciones seculares o las corrientes inducidas en la corteza, o si provienen de origen externo. En estas últimas, el principal responsable es el Sol que provoca desde las variaciones regulares como la variación diurna hasta algunas irregulares que dan origen por ejemplo a las tormentas magnéticas. El proceso físico disparador que las ocasiona no es el mismo en todos los casos. En este trabajo se investiga la variación de aproximadamente 27 días de periodicidad en la componente H del campo magnético terrestre asociada a la rotación solar. El rasgo más recurrente de esta señal, obtenida tras varias etapas de procesamiento que tratan de aislar tal variación, es que presenta otras periodicidades acopladas en su amplitud: una fuerte modulación de la amplitud por el ciclo solar y una segunda modulación semi-anual. Finalmente, el análisis comparativo con otras señales de ~27 días en parámetros solares como los índices $F10.7$ y $Mg II$, y el $vTEC$ ionosférico permite establecer que el proceso físico que da origen a la señal en la actividad magnética está asociado al viento solar y no a su radiación electromagnética.

Palabras clave: viento solar, radiación solar, señal de ~27 días, cross-correlation.

ABSTRACT

The terrestrial magnetic field has a wide range of temporal variations. In a first instance they can be classified according to whether they come from the magnetic field of internal origin as the secular variation or crustal induced currents, or if they come from external sources. In the latter case, the main responsible is the Sun that causes from regular variations such as the diurnal variation to some more irregular ones for example those that produce magnetic storms. The physical process that triggers them it is not the same in all cases. In this paper, the variation of approximately 27 days of periodicity in the H component of the terrestrial magnetic field, associated to solar rotation is investigated. The most recurrent feature of this signal, obtained after various processing steps in an intend to isolate it, is the presence of other periodicities coupled to its amplitude: a strong amplitude modulation by the solar cycle and a second semiannual modulation. Finally, a comparative analysis with other ~27 days

signals in the solar parameters *F10.7* and *Mg II* index, and ionospheric *vTEC* allows to establish that the physical process that gives rise to the signal in the magnetic activity is associated with the solar wind and not to its electromagnetic radiation.

Key words: solar wind, solar radiation, 27-day variation, cross-correlation.

INTRODUCCIÓN

El Sol está compuesto por un plasma gaseoso que provoca que su rotación no sea uniforme como un cuerpo sólido. Por ello, la velocidad de rotación en el ecuador solar es mayor, y decrece a medida que aumenta la latitud. Se dice que el Sol posee “rotación diferencial”, cuyo origen es objeto de estudio en la actualidad.

De acuerdo con la definición de Carrington (1863), el período de rotación del sol es de 25,3 días, que corresponde al período de rotación a una latitud heliográfica de 26°. Es comúnmente llamado el *período sidéreo* y no debe confundirse con el *período sinódico* de rotación de 27,2 días que se define como el tiempo promedio que le toma a un punto fijo en el Sol rotar a la misma posición aparente vista desde la Tierra (Beck, 2000). El período sinódico puede ser detectado en muchas variables físicas que se miden en la Tierra pero a grandes rasgos pueden ser clasificadas según su origen en señales que provienen de la entrada de partículas cargadas a la magnetosfera terrestre y señales que provienen de la radiación solar.

Para el caso cuyo origen son las partículas cargadas, la variable más importante para detectar una señal de ~27 días es el viento solar. En la órbita terrestre posee una densidad media de unos 4 protones cm^{-3} , una velocidad media de 400 km s^{-1} , y contiene un campo magnético interplanetario (IMF, por su acrónimo en inglés: Interplanetary Magnetic Field) de 5 nT. El proceso de reconexión magnética entre el campo magnético terrestre (CMT) y el IMF domina la actividad geomagnética. En el sistema GSM, cuando el dipolo terrestre es aproximadamente perpendicular al plano de la eclíptica, la reconexión depende principalmente de la componente sur del IMF, y es proporcional a la componente Y del campo eléctrico \vec{E} del viento solar (Vasyliunas, 1975), definido según la ec. (1):

$$\vec{E} = -\vec{v}_{sw} \times \vec{B}_{IMF} \quad (1)$$

donde \vec{v}_{sw} es la velocidad del viento solar y \vec{B}_{IMF} es el IMF. Por lo tanto, las estructuras de viento solar que tengan un IMF con la componente sur uniforme e intensa o velocidades altas serán más eficientes en la transferencia de energía al interior de la magnetosfera.

La variación de ~27 días en la actividad magnética ha sido estudiada por numerosos autores. Un trabajo pionero en este tema es el de Neupert y Pizzo (1974), en donde se identifica la relación entre el viento solar que generan los agujeros coronales (caracterizado por tener una velocidad relativamente alta y una densidad baja), con el aumento en la frecuencia de las tormentas magnéticas en la Tierra.

Los métodos más comunes para el análisis detallado de esta señal utilizan el espectro de potencia de los índices magnéticos (Ward, 1960; Fraser Smith, 1972) o bien métodos de correlación (Sargent, 1986). En este sentido, Schreiber (1998) investigó las variaciones periódicas en la larga serie de datos de los índices *aa* y *Ap* (Mayaud, 1980), y sugirió que la corta duración temporal de algunas estructuras longitudinales como los agujeros coronales (que pueden aparecer y desaparecer en diferentes longitudes heliográficas), hacen que el método de Fourier no sea el más adecuado para el estudio de esta señal en series muy largas. Los numerosos picos alrededor de esta periodicidad, encontrados en los espectros calculados por Clua de Gonzalez et al. (1993), permiten sustentar esta hipótesis. En los últimos años, se han implementado otras técnicas para el estudio de esta señal en la actividad magnética, como el análisis Wavelet. En el artículo de Singh y Badruddin (2014) se utiliza esta técnica y se confirma la presencia de esta señal pero también la de otras periodicidades como 5,3 años y 11 años utilizando los índices *aa* y *SSN* (Sunspot number).

Las señales de ~27 días cuyo origen está asociado a la radiación solar se generan porque a medida que el sol rota sobre su eje, la proyección de la Tierra sobre el disco solar es afectada por distintas fuentes de radiación (distribuidas de manera no homogénea alrededor del disco), de modo que el flujo de radiación que llega a las capas altas de la atmósfera cambia (Lean et al., 1997). Las

componentes de esta radiación que son capaces de ionizar los elementos neutros de la atmósfera son las correspondientes a las bandas UV y rayos X del espectro electromagnético y son muy importantes ya que dan lugar a la ionosfera. Existe por lo tanto, una conexión muy estrecha entre las variaciones temporales en la radiación solar y la generación y destrucción de iones en el sistema ionosfera-termosfera. Estas variaciones han sido estudiadas por diversos autores, abarcando análisis globales en donde se analizan las periodicidades encontradas en variables como el TEC y la densidad electrónica considerando a la ionosfera en su totalidad como los artículos de Afraimovich et al. (2006) y Hocke (2008), o bien análisis más locales en donde el estudio se centra en una región específica de la ionosfera como la ionosfera alta (Min et al., 2009) o la capa D, la más baja de la ionosfera (Reuveni y Price, 2009).

El estudio combinado de la periodicidad de ~27 días en los distintos parámetros del medio Sol-Tierra ha servido para investigar otras periodicidades no tan documentadas en la actividad magnética terrestre. Por ejemplo, en el artículo de Apostolov et al. (2004) se analiza la periodicidad de 22 años en la actividad magnética. Utilizan los índices *Ap*, *F10.7* y la frecuencia crítica *f0F2* para analizar la variación de las amplitudes de la señal de ~27 días a lo largo de los ciclos solares 18 al 22, y encuentran que es mayor en los ciclos pares que en los impares, lo cual es un indicador del ciclo de 22 años como proponen otros autores (Cliver et al., 1996).

Como se puede constatar, la señal de ~27 días ha sido ampliamente estudiada. Es usual que esta periodicidad se encuentre afectada por otros fenómenos que aparecen acoplados a la señal, como por ejemplo la fase del ciclo solar. Es así que el objetivo de este trabajo es estudiar esta periodicidad en la actividad magnética y ver qué otras variaciones se encuentran presentes. Para hacerlo, se utilizan como punto de partida los resultados encontrados por Azpilicueta et al. (2012), en el que identifica la presencia de una señal de ~27 días de periodicidad en la componente H del campo magnético terrestre, modulada con diversas periodicidades. En este trabajo se aplica la misma metodología en mediciones de 10 observatorios magnéticos distribuidos alrededor del globo. La elección de los observatorios resulta de un estricto proceso de filtrado de los datos que tiene por objetivo mejorar la calidad de las mediciones con las que se trabaja.

El resultado es la presencia de la señal de ~27 días cuya amplitud se encuentra modulada por el ciclo solar y por la variación semi-anual al mismo tiempo en los 10 observatorios analizados.

El mismo procedimiento es extendido a otras mediciones, que son los parámetros solares *F10.7* y *Mg II* y valores de TEC globales obtenidos de la misión TOPEX/Poseidon (Jee, 2004). Teniendo una señal de ~27 días en distintas variables del medio Sol-Tierra se pueden diferenciar las variaciones presentes en cada una y comparar las señales para sacar conclusiones sobre el origen de la señal en la actividad magnética. Como se verá más adelante, encontrar el desfase para el cual la señal radiativa y la señal magnética hacen máxima la correlación entre ambas permite obtener resultados al respecto. Al hacer lo mismo con las señales radiativas e ionosféricas, se puede comparar el resultado obtenido por otros autores.

La metodología utilizada no permite discernir variaciones por debajo de 1 día ya que se utilizan valores medios diarios en todos los casos. Todo el análisis se hace en el dominio temporal, por lo que difiere de la mayoría de los trabajos clásicos en este tema.

SEÑAL DE ~27 DÍAS EN LA ACTIVIDAD MAGNÉTICA – H27

Observatorios seleccionados

La red global INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org/index-eng.php>) agrupa una gran cantidad de observatorios magnéticos distribuidos a lo largo del globo, que contienen datos precisos y con estándares modernos de medición. Los datos de estos observatorios son públicos, y pueden encontrarse por ejemplo en la página de la "World Data centre for Geomagnetism (Edinburgh)" (WDC) <http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>. La Figura 1 muestra los valores medios diarios de la componente H medida en distintas estaciones distribuidas en el hemisferio norte y en el hemisferio sur. El comportamiento de H es distinto según el observatorio y el año. Se pueden observar saltos que no provienen de procesos naturales, sino que son consecuencia de cambios en la configuración de los magnetómetros y/o en el cálculo de la línea de base para cada observatorio. A su vez, la longitud temporal es muy variable dependiendo del observatorio. En algunos de ellos, se observa una tendencia negativa asociada a fenómenos de gran escala temporal como la variación secular.

Las características mencionadas se tuvieron en cuenta a la hora de seleccionar las 10 estaciones definitivas utilizadas en este trabajo. En primer lugar, de todos los observatorios de la WDC, se eligieron los que cumplían las siguientes condiciones:

1. Sólo los días con mediciones en las 24 hs. fueron utilizadas.
2. Sólo los años con al menos 330 días con mediciones fueron seleccionados.
3. Si hubieran saltos dentro del año, en los que los valores de un lado y del otro del salto se mantienen (reflejando que el salto no proviene de procesos naturales) el año fue descartado. Se consideró saltos en los que los valores contiguos dentro de un año tenían una diferencia mayor o igual a 70 nT.
4. Solamente los observatorios con 15 o más años, luego del filtrado anterior fueron seleccionados.

El segundo criterio de selección fue que cubrieran ambos hemisferios y que abarcaran un amplio rango de longitudes y latitudes geomagnéticas para que el resultado del procesamiento reflejase fenómenos en todo el globo. Teniendo un conjunto de estaciones con esta distribución, se seleccionaron 10 observatorios. La Tabla 1 muestra la ubicación en coordenadas geomagnéticas de los observatorios resultantes.

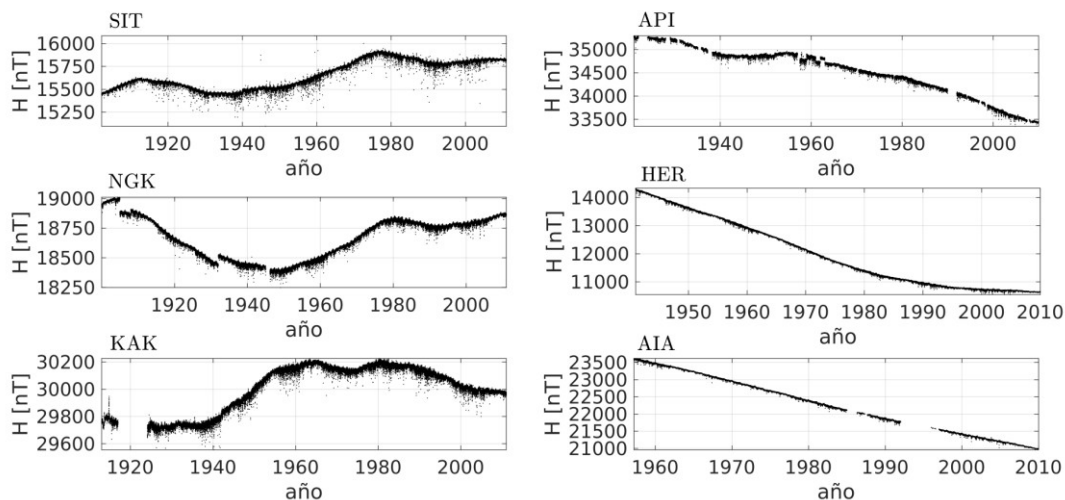


Figura 1. Componente H del campo magnético terrestre. Media diaria para 6 observatorios permanentes. 3 (Izq.) del hemisferio Norte y 3 (Der.) del hemisferio Sur.

Figure 1. Earth magnetic field H component. Medium value for 6 permanent observatories. 3 (left) in the North hemisphere and 3 (right) in the South hemisphere.

Obtención de la señal

Para evaluar periodicidades que se encuentren dentro del año, se debe quitar la tendencia secular. En la elaboración de índices magnéticos que monitorean la actividad magnética terrestre, se suelen utilizar datos de años contiguos a un año particular para quitar esta tendencia. Este es el caso del índice *Dst* en el que se realiza un ajuste cuadrático con los 4 años anteriores al año de interés que luego se resta a los valores de H (Sugiura, 1964). En nuestro caso, la tendencia secular fue removida considerando a cada año como individual. En primer lugar, se promediaron los 24 valores horarios de H para cada día de todos los observatorios. Luego, para cada año se ajustó una recta con todos los valores de ese año, que luego se sustrajo a los valores de H. Sustraer la tendencia de los valores medios diarios de H es análogo a aplicar un filtro pasa bajos a los datos, y el resultado es una señal que contiene períodos menores o iguales que el año.

Al realizar esto, el resultado es el de la Figura 2. En esta figura se muestran las desviaciones para dos años particulares, 1990 y 1996, que corresponden a años de actividad solar alta y baja respectivamente. La principal característica es un patrón con dos mínimos, uno cerca del día del año

(DOY) 90 y otro alrededor del DOY 290, y dos máximos en los DOYs 190 y 365. Este comportamiento se debe a la anomalía semi-anual en la actividad magnética. El consenso general en la comunidad científica es que gran parte de este fenómeno es producido por el efecto de Russell y McPherron (1973): A lo largo del año la orientación del dipolo geomagnético cambia con respecto a la línea Sol-Tierra, la anomalía es máxima en los equinoccios cuando el dipolo está inclinado hacia la línea orbital de la Tierra porque la proyección del IMF en el campo geomagnético se maximiza. De forma similar, la actividad alcanza un mínimo durante los solsticios cuando la proyección del IMF es mínima. Sin embargo, existen otras hipótesis (Cortie, 1912; Bartels, 1932) y el mecanismo que provoca esta anomalía permanece en discusión en la actualidad (Cliver et al., 2000; Azpilicueta y Brunini, 2012).

ID	Longitud Geomag. (°)	Latitud Geomag. (°)
SIT	-77,69	60,21
NGK	97,64	51,64
KAK	-150,32	27,76
SJG	46,95	27,63
HON	-89,18	21,65
API	-96,69	-15,07
HER	85,27	-34,00
GNA	-170,29	-41,18
AIA	6,21	-55,49
PAF	134,42	-56,46

Tabla 1. Observatorios magnéticos utilizados en el trabajo ordenados por latitud geomagnética.
Table 1. Magnetic observatories utilized in this work ordered by geomagnetic latitude.

Si a los gráficos de la Figura 2 se le calcula un promedio simple móvil para cada DOY, utilizando una ventana de datos de 30 días, con el DOY en cuestión en el centro, se obtiene una curva suavizada, en la cual los períodos menores a 30 días han sido eliminados. Al restar la curva suavizada a las desviaciones, las curvas resultantes de aplicar este último procedimiento son como las que se observan en la Figura 3, en la que se encuentra la señal filtrada que llamaremos *H27*. La misma técnica puede ser aplicada con una ventana de menor o mayor cantidad de días, pero se eligió 30 como la cantidad óptima porque este valor otorgaba la mejor visualización.

Características de *H27*

En los gráficos de la Figura 3, *H27* es representado para dos años, uno de actividad solar alta y otro de actividad solar baja. Las características importantes que aparecen reflejadas en las curvas de *H27* son:

- La amplitud de la señal de ~27 días se ve significativamente aumentada para épocas de actividad solar alta.
- Aparece una modulación semi-anual resultando en amplitudes mayores durante marzo y septiembre.

H27 se encuentra presente para todos los observatorios analizados. Estas características no son específicas de los años de la Figura 3 (1996 y 1990), sino que son un patrón recurrente en todos los años y en todos los observatorios analizados. La modulación no es igual en todos los años y suele aparecer un poco desplazada en el tiempo. También, es diferente en amplitud para los meses de marzo y abril que para los meses de agosto y septiembre. La Figura 4 muestra a *H27* para dos años consecutivos del observatorio NGK. La señal se encuentra modulada por otra curva de periodicidad semi-anual.

SEÑAL DE ~27 DÍAS EN PARÁMETROS SOLARES - F27 Y Mg27

Parámetros F10.7 y Mg II

Como fue mencionado en la Introducción, las frecuencias del espectro correspondiente al rango de EUV y rayos X de la radiación solar, son capaces de ionizar los elementos neutros de la alta atmósfera y generar corrientes. Más específicamente es el flujo de radiación EUV el responsable de la ionización del O, O₂, NO y otras moléculas en la ionosfera terrestre que comprenden la mayor parte de los electrones libres. Resulta importante entonces monitorear la evolución de la radiación en estas frecuencias, para poder relacionarla con los parámetros en la ionosfera terrestre. Con este objetivo, suelen utilizarse distintos indicadores, que si bien no miden directamente las variaciones en las frecuencias de interés, tienen una correlación muy alta con dichas variaciones. A estos indicadores se los denomina proxys. Uno de los más comunes es F10.7, que mide la energía media de la densidad de flujo solar a una frecuencia de 2.8 GHz (longitud de onda: 10.7cm) en unidades de $10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ (unidades de flujo solar). A diferencia de otros índices, F10.7 es medido desde la superficie terrestre, lo que permite tener mediciones confiables sin importar las condiciones climáticas, con una larga serie de datos (desde 1947). Los valores diarios de F10.7 (tomados de la gran base de datos del instituto Goddard Space Flight Center: http://spdf.gsfc.nasa.gov/data_orbits.html) se muestran en la Figura 5, entre los años 1947 y 2011, que corresponde a la serie completa utilizada para el procesamiento. En esta figura pueden observarse varios ciclos solares, y es notable como la dispersión de los datos aumenta en los años de actividad solar alta.

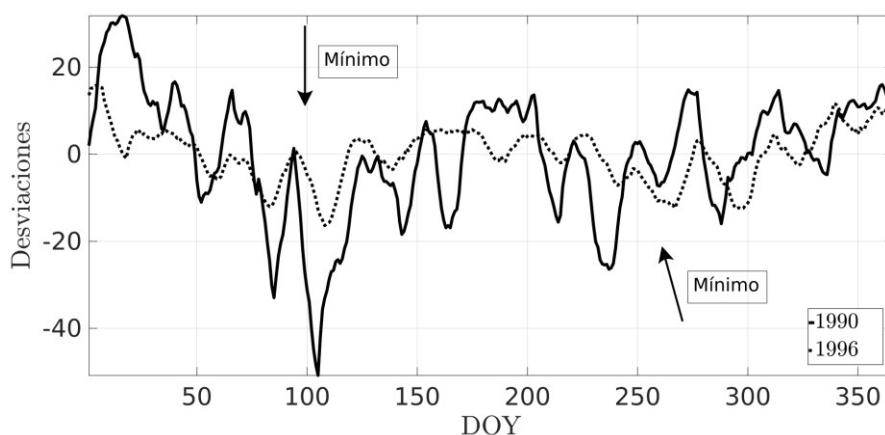


Figura 2. Valor medio por DOY de las desviaciones de H para la estación HER en los años 1990 y 1996. Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para eliminar ruido en la señal.

Figure 2. H deviations. Medium value per DOY for HER station at 1990 and 1996. A 10 days moving average filter was applied to eliminate noise in the signal.

Otro índice utilizado como un proxy es el Mg II. Se calcula tomando el cociente entre la intensidad de determinadas líneas de emisión del Mg II en 280 nm y el continuo en 280 nm. En el artículo de Viereck et al. (2001) se calculó un coeficiente de correlación de 0,996 con el flujo de radiación EUV en 30,4 nm, por lo que es un excelente indicador de la radiación en estas frecuencias. Los autores del artículo sugieren la utilización de este índice por sobre el F10.7. Este índice es calculado a partir de mediciones satelitales y provistos por NOAA y se encuentran en ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_UV/NOAAMgII.dat. Los datos abarcan un poco más de 2 ciclos solares completos como muestra la Figura 6.

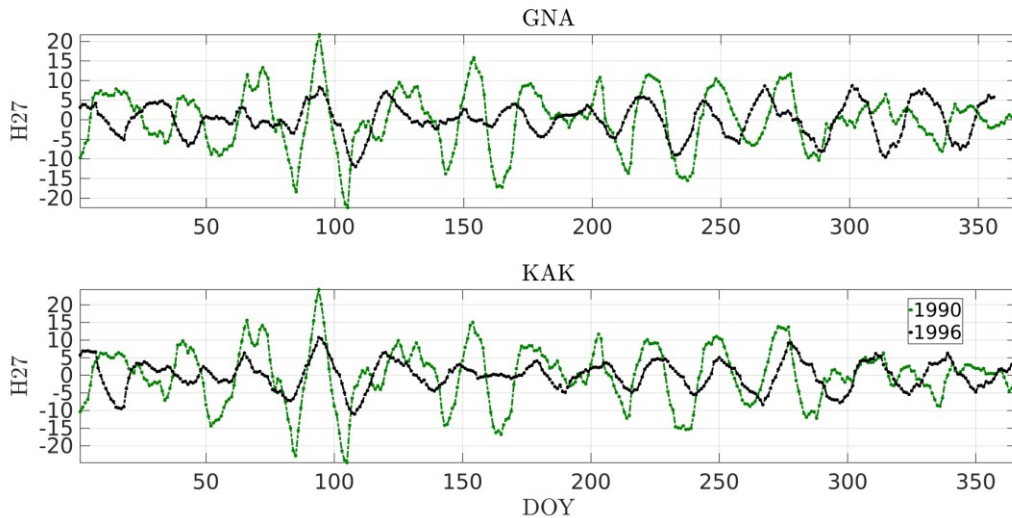


Figura 3. H_{27} en dos años distintos. 1996 (negro) de actividad solar baja y 1990 (verde) de actividad solar alta. Los datos corresponden a la estación GNA (superior) y KAK (inferior). Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para mejorar la visualización.

Figure 3. H_{27} for two different years. 1996 (black) a low solar activity year and 1990 (green) a high solar activity year. The data belongs to GNA station (up) and KAK station (down). A 10 days moving average filter was applied to improve the visualization of the signal.

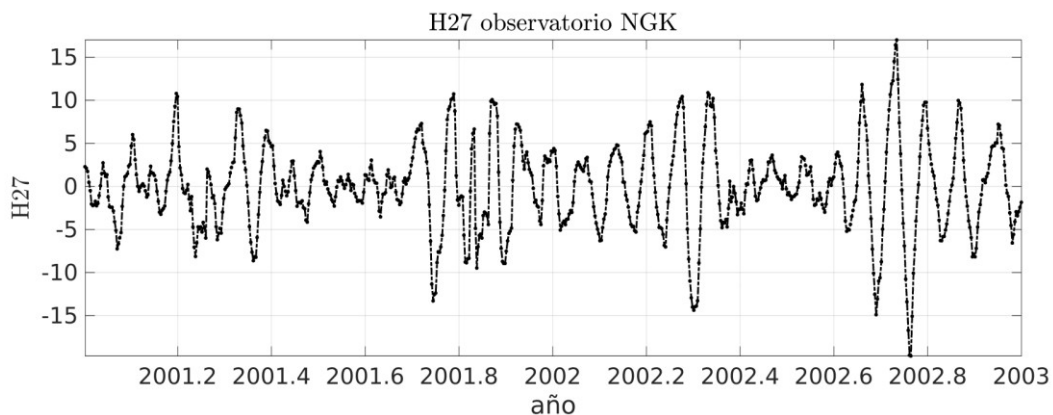


Figura 4. H_{27} para dos años consecutivos del observatorio NGK. La señal se encuentra modulada por otra de periodicidad semi-anual.

Figure 4. H_{27} for two consecutive years in the NGK observatory. The signal is modulated for another one with a semiannual periodicity.

La serie de datos de estos dos parámetros contienen valores anómalos, para poder procesarlas, se quitaron estos valores. Luego, si se aplica el mismo procedimiento que para obtener H_{27} se obtiene por ejemplo para $F_{10.7}$ el gráfico de la Figura 7 donde se muestra el resultado para 3 años consecutivos. Como se observa, la periodicidad de ~ 27 días también puede encontrarse en $F_{10.7}$ y en $Mg II$, y se indicarán como F_{27} y Mg_{27} respectivamente.

Una característica importante es que en estas señales no está presente ninguna modulación semi-anual, y tampoco es posible obtener una señal semi-anual como en el caso magnético. Las principales teorías que tratan de explicar la anomalía semi-anual concuerdan en que el fenómeno proviene del efecto que ocasionan los cambios en la corriente anillo a lo largo del año. Como se menciona en Daglis et al. (1999), las principales fuentes de la corriente anillo son las partículas de la ionosfera terrestre y del viento solar. Dentro de esta última están los protones y electrones que llegan del Sol y son atrapados por la magnetosfera. Por lo tanto, es de esperarse la ausencia de cualquier

señal semi-anual, ya que $F10.7$ y $Mg II$ reflejan los cambios producidos en la radiación solar y no en las propiedades del viento solar.

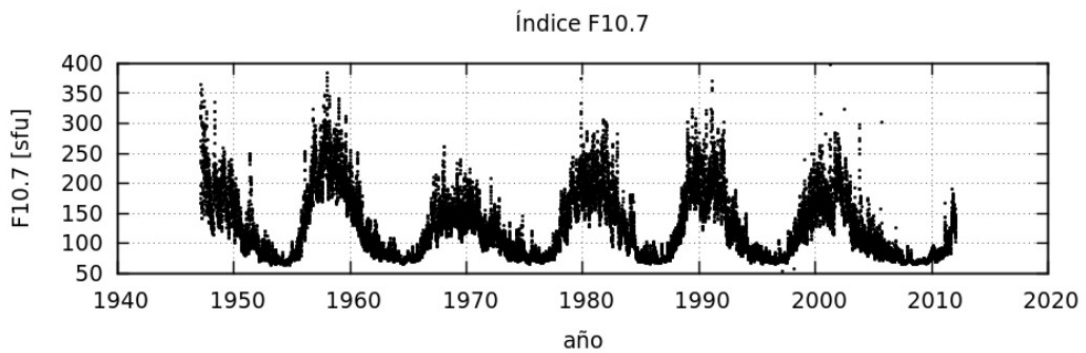


Figura 5. Valores diarios del índice $F10.7$ para la serie utilizada.
Figure 5. Daily values of the $F10.7$ index utilized in this work.

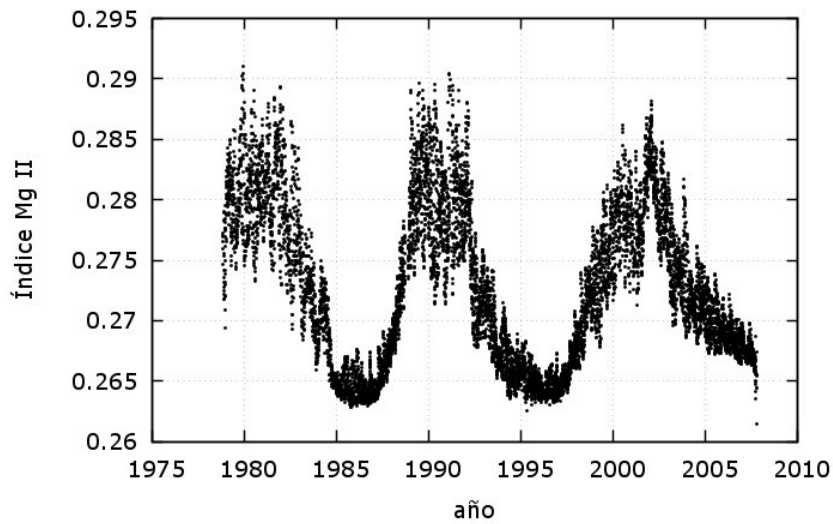


Figura 6. Valores diarios del índice $Mg II$ utilizados en este trabajo.
Figure 6. Daily values of $Mg II$ index utilized in this work

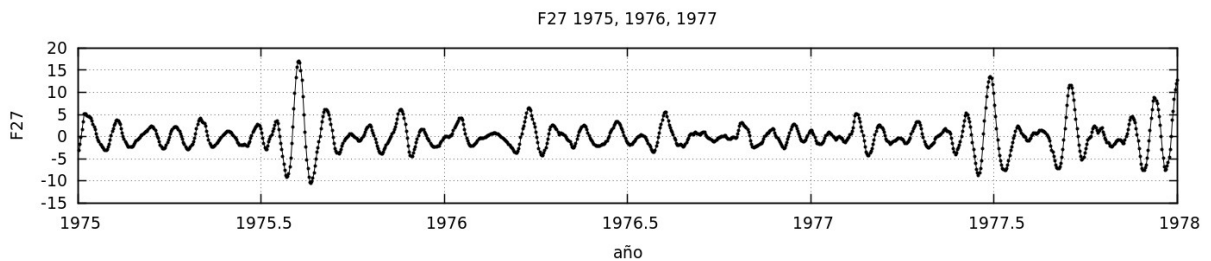


Figura 7. $F27$ para tres años consecutivos: 1975, 1976 y 1977.
Figure 7. $F27$ for three consecutive years: 1975, 1976 y 1977.

Señales F27 y Mg27

Si bien no poseen una modulación semi-anual como *H27*, son muy sensibles a los cambios en el ciclo solar, como se puede notar en la Figura 8, donde se encuentra graficado *F27* para el año 1990 de actividad solar alta y para el año 1984 de actividad solar baja.

SEÑAL DE ~27 DÍAS EN LA IONOSFERA – V27

El contenido total de electrones (TEC) se define como la cantidad de electrones libres atravesados por una onda electromagnética que viaja desde un satélite hasta un receptor. Si el satélite se encuentra sobre el cenit de la estación, de forma que el camino recorrido por la onda electromagnética es vertical, se lo denomina VTEC. Cuando la visual satélite-receptor no es vertical, se lo denomina STEC. El TEC es un parámetro muy importante en el estudio de la ionosfera basada en satélites.

Una de las primeras misiones que midió de forma exitosa el VTEC fue TOPEX/Poseidon. El satélite orbitaba a una altura de 1336 km y pasaba por el mismo lugar sobre la tierra cada 10 días (Jee, 2004). Si bien fue diseñada para mapear la altura del océano con el fin de estudiar los procesos de circulación oceánica, la incorporación de un altímetro de doble frecuencia en el satélite permitió a la comunidad aeronómica contar con una serie continua de más de 13 años de datos de determinaciones de VTEC casi directa (sin el uso de ninguna función de mapeo) y de excelente precisión para estudios de la distribución global del VTEC (Azpilicueta et al., 2006).

En este trabajo se utilizó la serie completa de 13 años de datos de la misión TOPEX/Poseidon de la siguiente manera: se promediaron los valores de 1 segundo de VTEC de la misión para tener una media global por día. Los instrumentos de la misión proveen los valores de VTEC sobre la superficie del mar, y como la masa continental es desigual en ambos hemisferios, esto produce una asimetría en la cantidad de valores disponibles para promediar entre el hemisferio norte y el sur. Por lo tanto, para balancear esta asimetría, los promedios se realizaron en un área específica del océano filtrando todos los valores fuera de ella al igual que en el trabajo de Azpilicueta et al. (2011). El área utilizada comprende los sectores (150°, 240°) y (300°, 360°) en longitud y (-60°, 60°) en latitud. De este modo, la serie temporal diaria obtenida tiene por un lado valores nulos (2,16% del total de días), correspondientes a los días en los que el satélite deja de medir por problemas técnicos o no pasa por el área en cuestión y días con distinta cantidad de datos considerados en el promedio. En tal caso los días con datos nulos fueron eliminados de la serie.

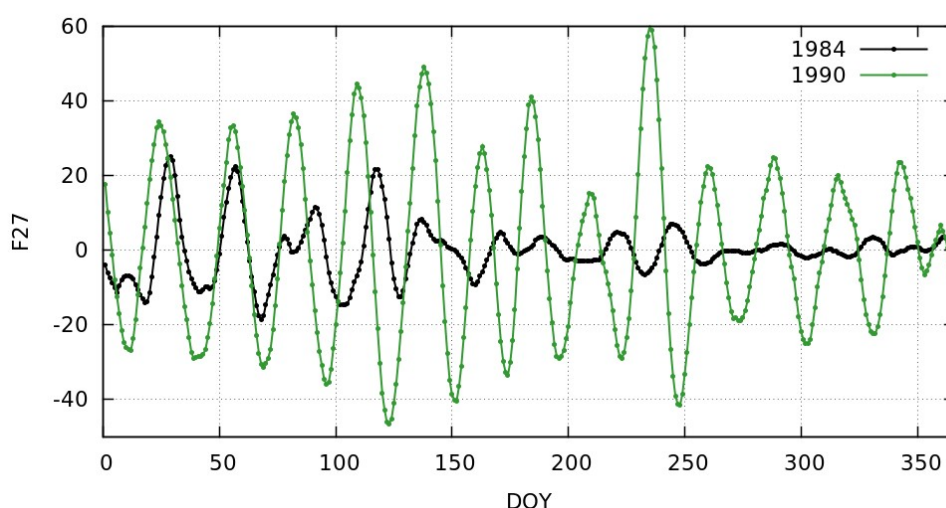


Figura 8. *F27* para el año 1984 de actividad Solar baja y 1990 de actividad Solar alta. Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para mejorar la visualización.

Figure 8. *F27* for a high solar activity year 1984 and for a low solar activity year 1990. A 10 days moving average filter was applied to improve the visualization.

La Figura 9 muestra los promedios de VTEC para toda la serie temporal calculados según fue explicado anteriormente. Los rasgos más destacados de esta figura son, al igual que el índice $F10.7$, el aumento en la amplitud y en la dispersión de los datos de VTEC en épocas de actividad solar alta, lo que evidencia su dependencia con el ciclo solar.

Al VTEC de la Figura 9 se le aplicó la misma secuencia de procesamiento que para obtener las señales de ~ 27 días de las secciones anteriores y a la señal resultante se la denominó $V27$. Al restar la tendencia anual se observa una señal semi-anual. Sin embargo, cuando se resta el promedio móvil, no aparece ninguna modulación semi-anual pero sí una modulación importante con el ciclo solar como muestra la Figura 10.

COMPARACIÓN ENTRE LAS SEÑALES

En las secciones anteriores se ha encontrado una señal de ~ 27 días de periodicidad en distintas variables del medio Sol-Tierra. Como se menciona en la Introducción y las secciones posteriores, el procedimiento para derivarla consiste básicamente en una correcta elección de los datos, la resta de la tendencia lineal anual, y un promedio móvil dinámico como muestra el esquema de la Figura 11, donde se observan las características presentes en cada etapa del procesamiento. En esta figura, SA es el patrón semi-anual, que puede identificarse tanto en la actividad magnética, como en el TEC ionosférico. MODSA es la modulación semi-anual, que aparece bien marcada en la actividad magnética en todos los años y está ausente en el resto de las señales. CICLO es la modulación por el ciclo solar que se observa en todas las señales analizadas en este trabajo. El ciclo Solar parece ser el fenómeno más persistente en las señales del medio Sol-Tierra (o al menos en la variación de ~ 27 días de los parámetros). Por último, S27 es la señal con periodicidad de ~ 27 días. Al aplicar el promedio móvil (MA) resultan $H27$, $F27$, $Mg27$, y $V27$.

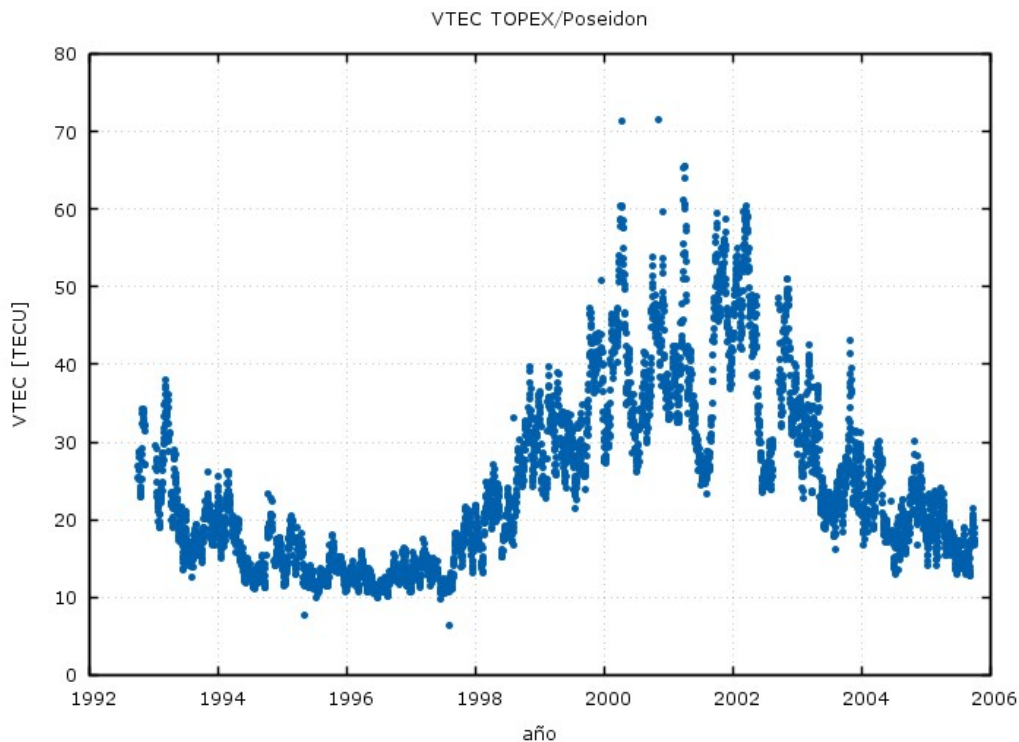


Figura 9. Serie de tiempo completa de VTEC utilizada en este trabajo.
Figure 9. VTEC complete time sequence utilized in this work.

El MA permite eliminar SA en la señal magnética e ionosférica, mientras que no tiene demasiados efectos en las señales radiativas ya que no está presente ninguna señal anual o semi-anual. En el caso de H o los índices solares, la serie temporal está conformada simplemente por los datos que entregan los centros internacionales. Para el caso del VTEC, promediar en las regiones adecuadas conlleva una tarea extra en el armado de la serie temporal a procesar.

Se estudió la correlación entre $F27$ y $V27$ y entre $Mg27$ y $V27$. En los años correspondientes a la serie más corta que es la de $V27$ y abarca 11 años en total (1992 - 2003), se calculó un coeficiente de correlación r por año para ambas correlaciones. La correlación entre $F27$ y $V27$ da un valor medio del coeficiente de 0,4 con un desvío porcentual del 9%, mientras que la correlación media entre $Mg27$ y $V27$ da un valor medio de 0,43 con un desvío de 4% resultando estos últimos valores ligeramente mejores. La correlación es muy similar en todos los años dado el bajo valor del desvío en ambos casos.

Si bien en ambos casos las series están correlacionadas (Figura 12), la metodología no filtra de ninguna manera periodicidades menores a 27 días por lo que la señal se ve enmascarada en ruido en muchos casos, lo que hace que el coeficiente de correlación no sea más alto.

Un aspecto interesante surge cuando se estudia el desfase entre las señales. Para hacerlo, se buscó el desfase en días de la señal $V27$ que hacía máximo el módulo de la correlación con $F27$ y $Mg27$ (o bien el máximo del módulo de la cross-correlation para distintos valores de corrimiento). Como las señales son aproximadamente periódicas, la cross-correlation será una función periódica por lo que puede suceder que a un aumento de $F27$ o $Mg27$ le corresponda una disminución de $V27$ en ese caso habría que buscar un mínimo en la cross-correlation. Por este motivo, se tomó el valor absoluto de la función. El resultado es un desfase de 1 día para ambos casos $F27/V27$ y $Mg27/V27$.

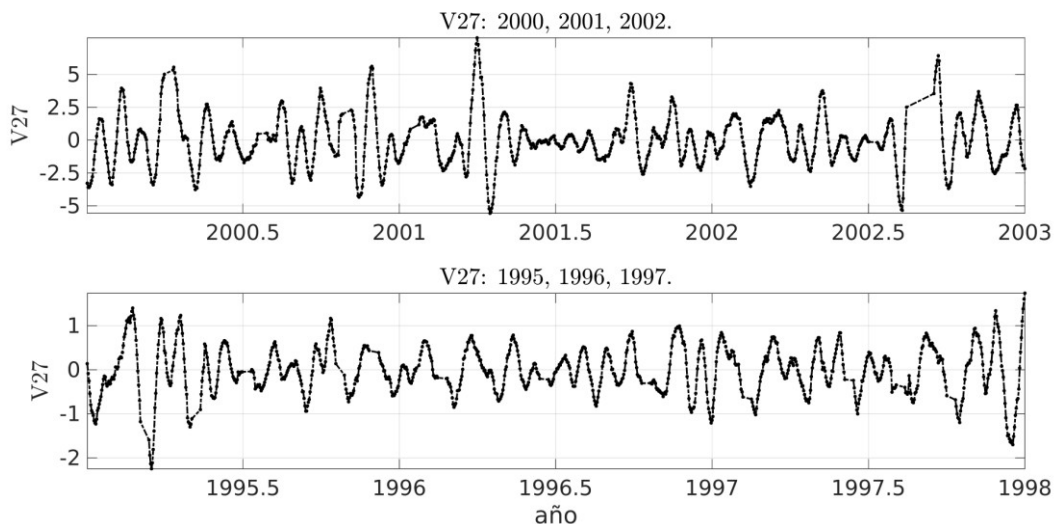


Figura 10. $V27$ para años de actividad solar alta (superior) y años de actividad solar baja (inferior). Un promedio móvil de 10 días fue aplicado para mejorar la visualización.

Figure 10. $V27$ for years of high solar activity (up) and low solar activity (down). A 10 days moving average filter was applied to improve the visualization.

La teoría clásica predice que la respuesta de la atmósfera a las variaciones en el flujo de radiación EUV (determinada por las constantes de ionización y recombinación) tenga un desfase de 1 hora. Sin embargo, la discrepancia con los retrasos obtenidos en este trabajo puede deberse a que no se tienen en cuenta los procesos en la atmósfera en este valor. Algunos autores han encontrado resultados dispares al estudiar este tema. Por ejemplo, en el artículo de Afraimovich et al. (2006), se encontró un desfase de 1,5 a 2,5 días. Los autores utilizan valores del índice $F10.7$ y el GEC (global electron content, ver referencia) diarios para obtener la señal de ~ 27 días. En el trabajo de Hocke (2008) se encuentra un desfase entre 0 y 3,5 horas utilizando el índice $Mg II$ y el TEC global.

Los gráficos de la correlación de ambos casos para valores de desfase entre -9 y 12 días se puede observar en la Figura 13. Si en este gráfico se analizan las diferencias entre la correlación en

los desfases 0, 1 y 2 días, se pueden comparar nuestros resultados con los de los autores mencionados. En el gráfico se muestra la cross-correlation normalizada por el valor máximo porque las escalas de las señales radiativas son muy distintas (como muestran las Figuras 5 y 6), lo que hace que la cross-correlation tenga valores muy distintos en ambos casos. Se observa que para $Mg27/V27$ la diferencia en la correlación para los desfases 0 y 1 es muy pequeño, y lo mismo ocurre para $F27/V27$ entre 1 y 2, por lo que estos resultados se condicen bastante bien con los de Afraimovich et al. (2006) y Hocke (2008).

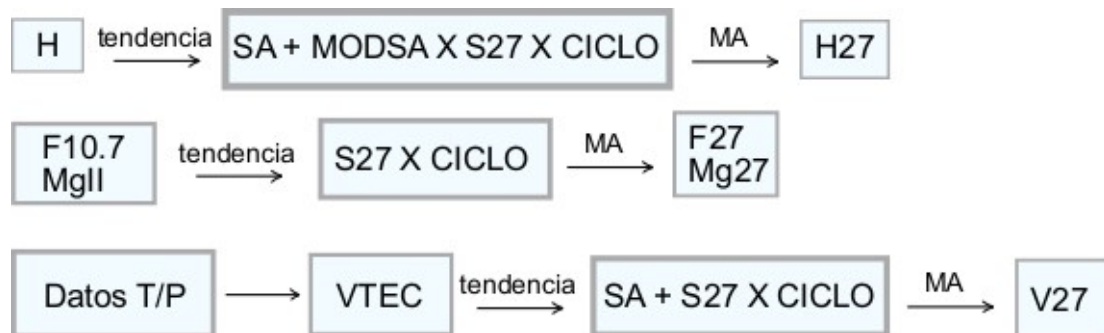


Figura 11. Diagrama de flujo que muestra el esquema de procesamiento de todos los parámetros utilizados.
Figure 11. Flowchart showing the processing sequence of all the parameters utilized.

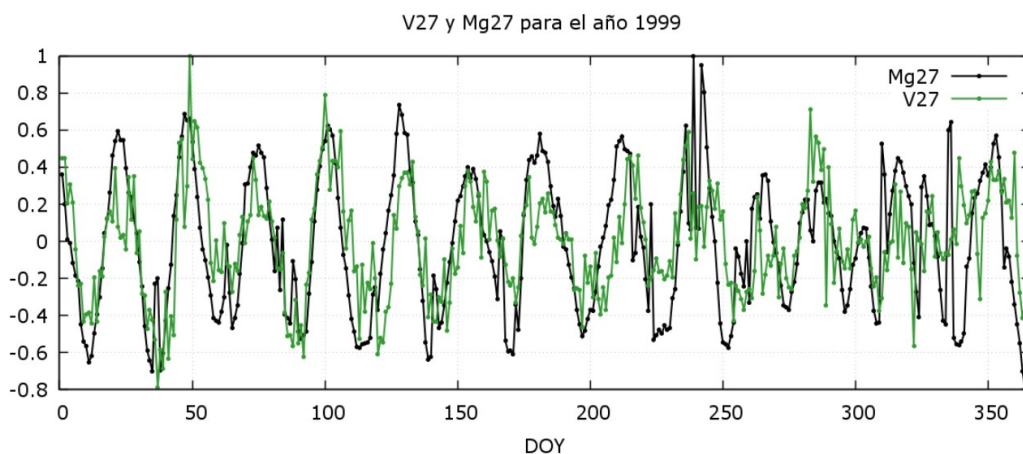


Figura 12. $V27$ y $Mg27$ normalizados por el valor máximo para el año 1999.
Figure 12. $V27$ y $Mg27$ normalized by the maximum value for the year 1999.

Las señales $F27$, $Mg27$ y $V27$ son de origen radiativo. Por otro lado, debido a que tanto las variaciones temporales de la radiación solar, como los parámetros geoeffectivos del viento solar y el IMF generan variaciones temporales en la actividad magnética terrestre, el origen de $H27$ no es tan claro. Un escenario posible sería que $H27$ fuera de origen radiativo, como ocurre por ejemplo con la variación solar diurna. Esta variación es una de las más regulares en la actividad magnética y es originada por las corrientes de dínamo en la capa E de la ionosfera (comúnmente referidas como campos Sq), producto de la interacción diaria entre la ionización producida por la radiación solar y los vientos termosféricos en el lado diurno de la Tierra. El otro escenario posible sería que el origen de $H27$ estuviera en la entrada de partículas cargadas a la magnetosfera como es el caso de la anomalía semi-anual en la actividad magnética, mencionada en las secciones anteriores. Al buscar el desfase entre $H27$ y $F27$, se pueden sacar conclusiones sobre este problema.

La Figura 14 muestra la cross-correlation entre $H27$ y $F27$ para los 10 observatorios en donde todas las curvas están normalizadas por el valor del máximo del módulo para desfasajes entre -30 y 30 días. En este caso se puede ver que a un aumento en la señal radiativa le corresponde una disminución de $H27$ aproximadamente 4 días después, es decir, existe una correlación opuesta máxima desfasada alrededor de 4 días. El valor del desfasaje que hacía máxima esta correlación opuesta entre ambas señales, para los 10 observatorios utilizados, arroja a $H27$ desfasada 4 días con respecto a $F27$ para 8 observatorios, mientras que en los 2 restantes el desfasaje es de 3 días. El recuadro en la parte inferior/derecha de la imagen muestra una ampliación de este fenómeno.

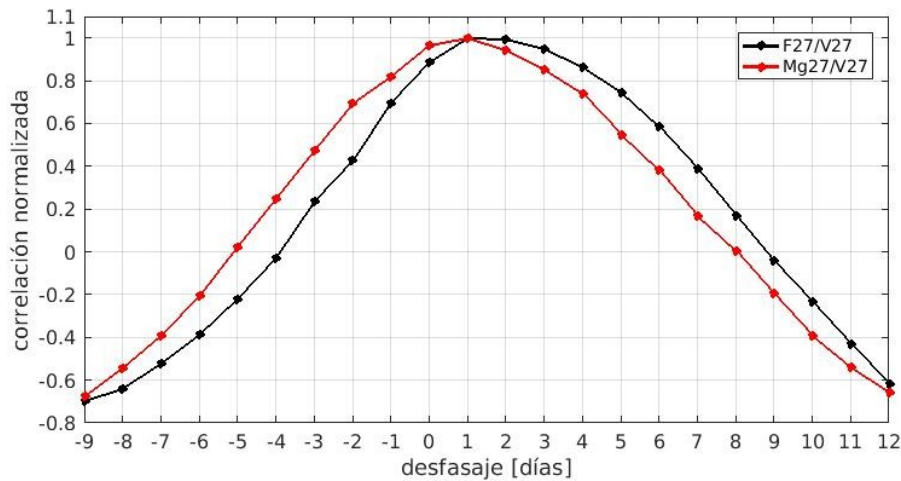


Figura 13. cross-correlation normalizada por el valor máximo entre las señales $Mg27/V27$ y $F27/V27$ para desfasajes entre -30 y 30 días.

Figure 13. Cross-correlation normalized by the maximum value for the signals $Mg27/V27$ and $F27/V27$ for lags between -30 and 30 days.

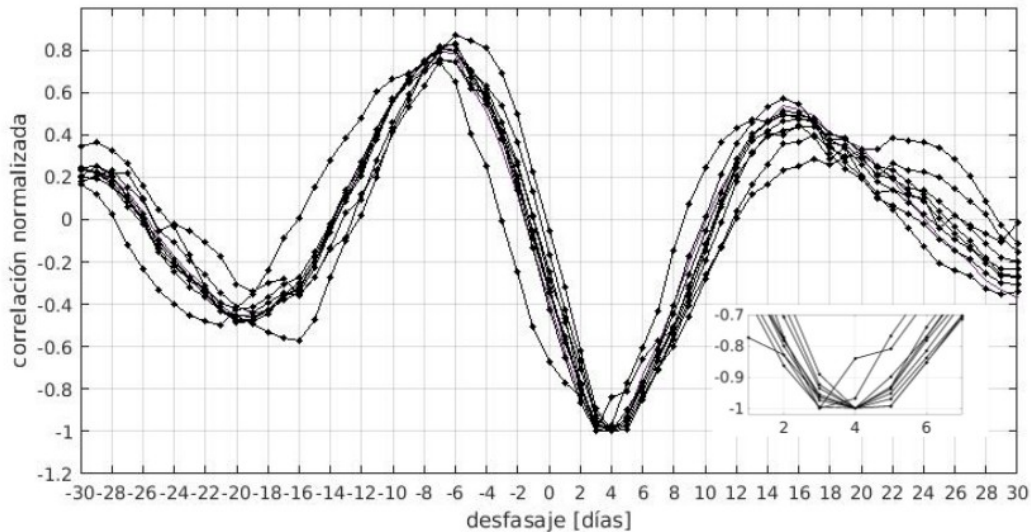


Figura 14. cross-correlation normalizada por el valor mínimo entre las señales $F27$ y $H27$ para los 10 observatorios utilizados en este trabajo. Se muestran las curvas para desfasajes entre -30 y 30 días, y aumentada como la mayoría de los mínimos están en 4 días.

Figure 14. Crosscorrelation normalized by the minimum value between the signals $F27$ and $H27$ for the 10 observatories utilized in this work. It is shown the curves for lags between -30 and 30 days, and bigger how most minimums are in 4 days.

Este desfase permite descartar el hecho de que la señal sea de origen radiativo, de otro modo el desfase sería 0 o 1 día como en los casos analizados anteriormente con $F27$ y $V27$, por lo tanto se puede decir que el origen de $H27$ se debe a los procesos de interacción entre el viento solar con la magnetosfera terrestre. Más aún, si se considera el valor de $1 \text{ UA} \approx 150$ millones de km se obtiene para 4 días de viaje, una velocidad aproximada del viento solar de $v_{\text{sw}} \approx 434 \text{ km s}^{-1}$ lo que concuerda bastante bien con los valores promedio que caracterizan el viento solar que son $v_{\text{sw}} \approx 468 \text{ km s}^{-1}$, y densidad de $8,7$ protones cm^{-3} . Este último análisis refuerza la conclusión sobre el origen de la señal.

Las curvas muestran un aumento de su dispersión cuando los desfases se alejan del rango 0 a 8 días aproximadamente. Hay varios motivos que pueden explicar este comportamiento. En primer lugar, está el hecho de que la señal de ~ 27 días no tiene una periodicidad uniforme. Cuando las curvas están desfasadas 4 días, los ciclos de ~ 27 días en ambas señales tienen la misma periodicidad, lo que hace que la correlación opuesta sea máxima. Cuando esto no ocurra, se correlacionan señales con períodos diferentes, lo que hace que el valor disminuya.

El hecho de que la mayoría de los observatorios den un retraso de 4 días permite descartar cualquier efecto hemisférico. Un aspecto interesante es que los 2 observatorios que dan 3 días de desfase son SIT y PAF, los cuales están ubicados en latitudes aurorales. En un análisis preliminar, se puede decir que la componente H en estas latitudes es más pequeña que la componente Z debido al aumento del ángulo de inclinación de las líneas del campo magnético terrestre, por lo que H puede no ser la componente óptima para el análisis en estas latitudes, ya que la mayor parte de la variación del campo no se ve reflejada.

PRINCIPALES CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Las relaciones encontradas entre las distintas señales en la sección anterior permiten establecer la conclusión principal de este trabajo: El origen de $H27$ se debe a la interacción entre el viento solar y la magnetosfera, mientras que el origen de $F27$, $Mg27$ y $V27$ es radiativo. La cross-correlation de las señales $F27$ y $H27$ obtenidas tras la misma secuencia de procesamiento entrega una metodología precisa de calcular los desfases entre ambas señales. A su vez, la cross-correlation entre $F27$ y $V27$ permite comparar los resultados obtenidos por otros autores en cuanto a las señales radiativas.

La red INTERMAGNET distribuye los datos de un gran número de estaciones magnéticas permanentes, (en varios casos con una serie temporal cercana a 100 años de datos). La incorporación de más observatorios en el análisis permitiría validar los resultados mencionados e investigar por qué el retraso de $H27$ en los observatorios en latitudes geomagnéticas altas es menor. De hecho, mientras más observatorios estén involucrados, los resultados son más representativos globalmente.

Por otro lado, aplicar la técnica utilizada en este trabajo permite evidenciar las características presentes y ausente en la señal de ~ 27 días en distintos parámetros utilizados. Por ejemplo, la modulación semi-anual de la amplitud está presente en $H27$ mientras que no se encuentran en las demás señales. Mientras que la modulación de la amplitud por el ciclo solar se encuentra en todas las señales.

Agradecimientos: Los autores de este trabajo agradecen a las siguientes instituciones por distribuir públicamente los datos utilizados en este trabajo: World Data centre for Geomagnetism (Edinburgh), Goddard Space Flight Center, National Oceanic and Atmosphere Administration, Jet Propulsion Laboratory.

REFERENCIAS

- Afraimovich E.L., E.I. Astafyeva, I.V. Zhivetiev, (2006). Solar activity and global electron content. Doklady Earth Sciences, 409(2):921-924.
- Apostolov E.M., D. Altadill, M. Todorova, (2004). The 22-year cycle in the geomagnetic 27-day recurrences reflecting on the F2-layer ionization. Ann. Geophys., 22(4):1171-1176.
- Azpilicueta F., C. Brunini, S. M. Radicella, (2006). Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude. Advances in Space Research, 38(11): 2324-2331..

- Azpilicueta F., C. Brunini, S. M. Radicella, (2011). Semi-annual Anomaly and Annual Asymmetry on TOPEX TEC During a Full Solar Cycle. *Geodesy for Planet Earth*, 136: 769-774.
- Azpilicueta F., C. Brunini, E. Camilión, (2012). The geomagnetic semiannual anomaly on the four Dst - fundamental observatories: Dependences with Sun-Earth physical parameters. *J. Geophys. Res.*, 117(A7).
- Azpilicueta F., C. Brunini, (2012). A different interpretation of the annual and semiannual anomalies on the magnetic activity over the Earth. *J Geophys. Res.*, 117(A8).
- Bartels J., (1932). Terrestrial-magnetic activity and its relations to solar phenomena. *J. Geophys. Res.*, 37(1): 1-52.
- Beck, J.G., (2000). A comparison of differential rotation measurements. *Solar physics*. 191(1): 47–70.
- Carrington, R.C., (1863). Observations of the spots on the sun from November 9, 1853 to March 24, 1861, made at Redhill. Ed. Williams and Norgate, London. pp 68.
- Cliver E.W., V. Boriakoff, K.H. Bounar, (1996). The 22-year cycle of geomagnetic and solar wind activity. *J. Geophys. Res.*, 101(A12): 27091-27109.
- Cliver E.W., Y. Kamide, A.G. Ling, (2000). Mountains versus valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 105(A2): 2413-2424.
- Clua de Gonzalez A.L., W.D. Gonzalez, S.L.G. Dutra, B.T. Tsurutani, (1993). Periodic variation in the geomagnetic activity: A study based on the *Ap* index. *J. Geophys. Res.*, 98(A6): 9215-9231.
- Cortie A.L., (1912). Sun-spots and Terrestrial Magnetic Phenomena, 1898-1911: the Cause of the Annual Variation in Magnetic Disturbances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 73(1): 52-60.
- Daglis I.A., R.M., Thorne, W. Baumjohann, S. Orsini, (1999). The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Rev. Geophys.*, 37(4): 407-483.
- Fraser-Smith A.C., (1972). Spectrum of the geomagnetic activity *Ap*. *J. Geophys. Res.*, 77(22): 4209-4220.
- Hocke K., (2008). Oscillations in global mean TEC. *J Geophys Res*, 113(A4).
- Jee G., (2004). Analysis of TEC data from the TOPEX/Poseidon mission. *J. Geophys. Res.*, 109(A1): 121-127.
- Lean J.L., G.J Rottman, H.L. Kyle, T.N. Woods, J.R. Hickey, LC. Puga., (1997). Detection and parameterization of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200–400 nm). *J. Atm. Res. Atmospheres*, 102(D25):29939-29956.
- Mayaud P.N., (1980). Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. *Am. Geophys. Union Monograph*, 22. pp 154.
- Min K., J. Park, H. Kim, V. Kim, H. Kil, J. Lee, S. Rentz, H Lühr, L. Paxton, (2009). The 27-day modulation of the low-latitude ionosphere during a solar maximum. *J. Geophys. Res.*, 114(A4).
- Neupert W. N., V. Pizzo, (1974). Solar coronal holes as sources of recurrent geomagnetic disturbances. *J. Geophys. Res.*, 79(25): 3701-3709.
- Reuveni Y., C. Price, (2009). A new approach for monitoring the 27-day solar rotation using VLF radio signals on the Earth's surface. *J. Geophys. Res.*, 114(A10).
- Russell C.T., R.L. McPherron, (1973). Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 78(1): 92-108.
- Sargent H.H., (1986). The 27-day recurrence index. *Solar wind-magnetosphere coupling*, 77(22): 143-148.
- Schreiber H., (1998). On the periodic variations of geomagnetic activity indices *Ap* and *ap*. *Ann. Geophys.*, 16(5): 510-517.
- Singh Y.P., Badruddin, (2014). Prominent short-, mid-, and long-term periodicities in solar and geomagnetic activity: Wavelet analysis. *Plan. And Space Science*, 96: 120-124.
- Sugiura M., 1964. Hourly values of equatorial *Dst* for the IGY. *Ann. Of the Int. Geophys. Year*. Pergamon Press, Oxford. Vol 35.
- Vasyliunas V.M., (1975). Theoretical models of magnetic field line merging. *Rev. in Geophys.* 13(1), pp 303.
- Viereck R., L. Puga, D. McMullin, D. Judge, M. Weber, W.K. Tobiska, (2001). The *Mg II* index: A proxy for solar EUV. *Geophys. Res. Let.*, 28(7):1343-1346.
- Ward F.W., 1960. The variance (power) Spectra of *Ci*, *Kp* and *Ap*. *J. Geophys. Res.*, 65(8): 2359-2373.

Recibido: Setiembre, 2016

Aceptado: Julio, 2017