

LAS VARIACIONES GEOMAGNÉTICAS TRANQUILAS SQ Y SU RELACIÓN CON PARÁMETROS SOLARES

THE QUIET GEOMAGNETIC VARIATIONS SQ AND THEIR RELATIONSHIP WITH SOLAR PARAMETERS

María Andrea Van Zele

CONICET en Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA)
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Dto. de Ciencias Geológicas – IGEBA
Ciudad Universitaria – 1428 Buenos Aires – Argentina
avanzele@gl.fcen.uba.ar

RESUMEN

El objetivo del trabajo es verificar si variaciones geomagnéticas tranquilas (S_q) registradas en longitudes africanas semejan las encontradas en observatorios orientales respecto de los parámetros solares. Las variaciones geomagnéticas solares en días geomagnéticamente tranquilos son producidas por el movimiento de partículas en la región E ionosférica, generadas por la radiación solar incidente sobre ella. Para determinar la tranquilidad de un día se utilizaron los índices Km. Para eliminar la componente debida a la corriente anillo ecuatorial simétrica y la compresión del viento solar sobre la magnetosfera se utilizaron los índices symH y symD. Se estudiaron las variaciones S_q de los días seleccionados del intervalo [2000, 2007] registradas en los observatorios BNG (de baja latitud) y HER (de latitud media). A fin de verificar si la radiación solar incidente influye en el grado de perturbación magnética se comparan los F10.7 de los días perturbados y los días tranquilos pudiendo observarse que sólo se diferencian por valores extremos del índice F10.7 en alta actividad solar. Siguiendo a otros autores, se calcula un parámetro solar deducido del índice F10.7, el F107DP(81), que se considera más adecuado como proxy de la radiación solar ionizante, previa comparación con el MgII. Posteriormente se calcula la proyección vertical de F107DP(81) sobre el observatorio según el día del año (proyF107DP). Aunque el número de días aquí seleccionados no permite un estudio analítico por series de Fourier, puede concluirse que las variaciones S_q registradas en el observatorio HER (que se encuentra en la región afectada por la Anomalía del Atlántico Sur) cumple las características halladas en sus antípodas: la variación media diaria es menor que en BNG, la radiación solar es una contribución importante en la variación de S_q por actividad solar en ambos observatorios africanos, pero no lo es en la variación anual o semianual; en estos casos, siguiendo a otros autores debe considerarse que el factor determinante son los vientos de la alta atmósfera.

ABSTRACT

The objective of this work is to verify if the quiet geomagnetic variations (S_q) recorded at African longitudes resemble these that were found at eastern observatories in relation with solar parameters. The solar geomagnetic variations during geomagnetically quiet days (S_q) are due to the movement of particles at the ionospheric E region, and generated by the solar radiation impinging on them. Km indices are used for determining of the quietness of a day. SymH and SymD indices are used for eliminating the symmetric ring current and solar flux pressure on the magnetosphere. S_q variations of the choose days during a timespan [2000, 2007] recorded at BNG and HER were studied. To verify if the impinging solar radiation influences on the geomagnetic perturbation, F10.7 for quiet and disturbed days are compared, observing the existence of extreme values during high activity. Following other authors, a solar parameter deduced from F10.7 index (the F107DP(81)), is considered adequate as a proxy of the EUV radiation, considering a previous comparison with the MgII (an incomplete record). Later, the vertical projection of F107DP(81) on the observatory is computed (proyF107DP) according to the day of the year. Though the small number of selected days do not allow a Fourier analysis, it could be concluded that the S_q at HER (at mid latitude, into the SAMA) fulfill the characteristics found at the antipodes:

the mean geomagnetic variation is smaller than in BNG (at low latitude), the solar radiation is an important contribution at the Sq variation according to the solar activity at both observatories; but it is not for the annual or semiannual variation; it should be concluded, as other authors, that the winds at the ionosphere are responsible of these last variations.

Palabras claves: Sq, variaciones geomagnéticas tranquilas, BNG, HER, actividad solar
Key words: Sq, quiet geomagnetic variations, BNG, HER, solar activity

INTRODUCCIÓN

La variación geomagnética diaria tranquila (Sq) (Chapman y Bartels, 1940) registrada en un punto de la superficie terrestre, a latitudes ecuatoriales, bajas, medias o subaurales, es la resultante del movimiento de iones y electrones producidos por la radiación solar incidente en la baja ionosfera (alta atmósfera), entre los 100 y 150 km de altura respecto de la superficie de la tierra (región).

De particular importancia es la radiación solar del ultravioleta lejano (EUV) que es máxima en años próximos al máximo de actividad solar; ésta varía sólo el 0,1% entre un máximo y un mínimo, pero puede afectar fuertemente la química y la estructura térmica de la alta atmósfera (http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/08jan_sunclimate/). El flujo solar ultravioleta lejano (EUV: $\lambda \sim 10\text{-}120\text{ nm}$) se origina entre la región de transición y la corona solar, mientras que la radiación ultravioleta (UV: $\lambda \sim 120\text{-}400\text{ nm}$) proviene de la región de transición, la cromosfera y la fotosfera superior (Floyd et al., 2005). Ambos rangos de energía son la causa primaria de la producción de iones en la ionosfera y también parcialmente responsables del calentamiento termosférico (Kane, 2002). La región E está constituida principalmente por O, He e H; a partir del conocimiento del potencial de ionización de esas especies se sabe que la radiación solar ionizante de estos componentes neutros de la atmósfera corresponde al espectro de rayos EUV, en particular entre los 80 y los 102.7 nm. Como las radiaciones EUV y UV son absorbidas en la alta atmósfera sólo pueden ser medidas con sensores en el espacio; a fin de soslayar esta limitación las emisiones solares de ondas de radio de longitud de onda 10,7 cm (índice F10.7) son usadas como proxy de ellas. En 1947, el National Research Council of Canada ha comenzado a medir la densidad del flujo diario solar de frecuencia 2800 MHz ($\lambda = 10,7\text{ cm}$); actualmente se realiza en el Dominion Radio Astrophysical Observatory, próximo a Penticton. Como la medición de F10.7 corresponde a una medición instantánea, no registra los cambios ocurridos a lo largo del día; sin embargo, en períodos tranquilos se encuentran correlaciones significativas entre radio frecuencias y mediciones UV solares. Ello hace concluir a Acebal (2008) que el índice F10.7 es un proxy adecuado para la radiación EUV. Para el estudio de la dependencia de las variaciones geomagnéticas en observatorios orientales respecto de la actividad solar, Yamazaki et al. (2011) han probado diferentes índices calculados a partir del índice diario F10.7, hallando que el que mejor ajusta es el que denominan F107DP(81), que resulta de promediar los F10.7 de los 81 días anteriores al día en cuestión. Más recientemente la radiación UV/EUV ha sido medida desde satélites: MgII (medido desde el espacio) y HeI1083, también variables con el ciclo solar (Lukianova y Mursala, 2011), pero en intervalos limitados.

Pedersen en 1927 y Chapman en 1931 (Hargreaves, 1992) desarrollaron la fórmula que predice la forma de una simple capa ionosférica y su dependencia temporal a lo largo del día, considerando la producción de iones (función de producción de Chapman, representativa de la región E) y su recombinación; la recombinación disociativa es la significativa en la región E. La región E no desaparece a la noche sino que permanece ionizada (máxima densidad $\sim 5 \times 10^9/\text{m}^3$) pero en mucha menor medida que durante el día (máxima densidad $\sim 10^{11}/\text{m}^3$). Los iones son arrastrados por el movimiento de las partículas neutras, y los electrones bajo la acción del campo geomagnético a esa altura, con velocidades de decenas de metros por segundo, y constituyen el sistema de corrientes ionosféricas equivalentes responsable de Sq, que ha sido derivado de los magnetogramas (Chapman y Bartels, 1940; Mayaud, 1965; Matsushita y Maeda, 1965) y semeja el movimiento generado por 2 vórtices, uno en cada hemisferio, previos al mediodía local, en latitudes medias, en sentido antihorario en el hemisferio norte y horario en el hemisferio sur (Richmond, 1998).

Las variaciones geomagnéticas diarias tranquilas (Sq) son la consecuencia de corrientes en la región E, pero se registran superpuestas a otras siempre presentes: corrientes en la magnetopausa, la corriente anillo ecuatorial, el electrochorro ecuatorial, las corrientes de mareas lunisolares, en la ionosfera auroral, y las que ellas inducen en el manto superior. Las corrientes en la magnetopausa (corrientes de Chapman-Ferraro) son el resultado de la presión del viento solar sobre ella; la corriente anillo ecuatorial es el resultado de la deriva de iones y electrones en la plasmasfera por inhomogeneidad y curvatura de las líneas de campo geomagnético en esa región (Parks, 1991); el electrochorro ecuatorial es debido a la excepcionalmente alta conductividad (llamada de Cowling) sobre el ecuador; las mareas lunisolares resultan del efecto gravitatorio del sol y la luna (mareas solar S y lunar L), de mucha menor intensidad que Sq, y difíciles de determinar; las corrientes de la ionosfera auroral son electrochorros aurorales (corrientes de Hall). Los vientos neutros ionosféricos son alterados por cambios de temperatura originados en la región polar; en la región D ionosférica se generan corrientes debidas a fulguraciones solares. Estas corrientes, dependiendo de la posición

geográfica del observatorio, inducen corrientes terrestres. Todas ellas contribuyen al valor del campo magnético que se registra superpuesto al campo principal (de origen interno) en cada lugar. Una adecuada caracterización de un día tranquilo es importante para el estudio de las perturbaciones o de las tormentas geomagnéticas. Para el estudio de las variaciones permanentes y regulares (tranquilas, Sq) de las 3 componentes del campo geomagnético (X hacia el norte geográfico, Y hacia el este y Z hacia el centro de la tierra) es necesario elegir aquellos días en que los observatorios registran variaciones lentas, y que son clasificadas por los centros mundiales según índices de actividad geomagnética. Para observatorios de latitud media o baja un índice adecuado es el Km (Menvielle and Berthellier, 1991) y si sus valores son bajos se considera que las corrientes que generan perturbaciones son mínimas. Los índices symH y symD permiten eliminar las contribuciones de la corriente anillo ecuatorial simétrica y la intensificación de la corriente de la magnetopausa a las componentes horizontales X e Y; si esta eliminación es la adecuada, los valores de la medianoche inmediatamente previos y posteriores a la variación de ese día deben coincidir; pero pueden subsistir contribución de subtormentas o alteración en los vientos neutros. Suelen despreciarse las contribuciones de las fulguraciones, de las mareas, y las inducidas.

Si bien Sq presenta un comportamiento aproximadamente regular variando con la hora local, también depende del ciclo solar, la estación del año y la latitud. Los efectos de la actividad solar son explicados por variaciones en la conductividad ionosférica local (Takeda, 1999, 2002). La variación estacional ha sido estudiada y su comportamiento destacado radica en que el sistema de corrientes equivalentes responsables de Sq es más intenso en el verano local que en el invierno local (Matsushita y Maeda, 1965). Miyahara y Ooishi (1997) muestran que las fluctuaciones en los vientos neutros pueden causar significativas variaciones día a día en el sistema de corrientes responsables de Sq, aún con condiciones electromagnéticas equivalentes en la región E.

El objetivo del trabajo es verificar si variaciones geomagnéticas registradas en longitudes africanas semejan a las encontradas en observatorios orientales respecto de los parámetros solares.

LOS DATOS

Para el estudio de la variación geomagnética diaria tranquila Sq es necesario minimizar efectos de las corrientes que no se originan en la región E; se imponen entonces condiciones para seleccionar días geomagnéticamente tranquilos (Q) sobre la base de los índices de actividad geomagnética: i) cada uno de los 8 Km (<http://isgi.latmos.ipsl.fr/>) correspondientes al día universal seleccionado debe ser bajo: $Km \leq 1+$; ii) la suma de los 8 Km correspondientes a ese día debe ser baja: $\sum Km \leq 30$. A fin de que los valores de los índices de un día universal sean representativos se eligen las variaciones de observatorios próximos a la longitud del meridiano de Greenwich, que simultáneamente se encuentren alejados del ecuador magnético para evitar la influencia del electrochorro ecuatorial; los observatorios geomagnéticos elegidos son BNG (lat.geog. 4,33°, long.geog. 18,57°, lat.geom. 4,13°) y HER (lat.geog. -34,42°, long.geog. 19,23°, lat.geom. -34,08°). El mediodía ocurre en [13, 14] TU; la inclinación en BNG para el día 7 de diciembre de 2005 a las 00:00 TU es $I \sim -16,65^\circ$ por lo que la latitud del observatorio con esa inclinación en un campo dipolar resultaría de $-8,50^\circ$ que justifica suponer que el observatorio no tiene una latitud correspondiente a la zona de influencia del electrochorro ecuatorial.

A fin de evidenciar la dependencia con el ciclo solar se estudia el intervalo [2000, 2007], de máxima actividad solar al inicio y mínima al final. A fin de verificar si la radiación solar incidente influye en el grado de perturbación magnética se seleccionan días con alta actividad de acuerdo con el índice Km: se eligen como perturbados (días D) aquellos días del mismo intervalo en que la suma de los 8 valores del día debe ser alta: $\sum Km > 32$. La Tabla 1 muestra el número de días seleccionados.

En la Figura 1 puede observarse que no existe una correlación entre la actividad geomagnética alta diaria ($\sum Km > 32$) y la radiación solar de ese día.

En la Figura 2 se comparan los F10.7 de los días perturbados (D: $\sum Km > 32$) y los días tranquilos (Q); puede observarse que no se diferencia el índice F10.7 en ambos conjuntos, excepto en que no se registran muy altos valores de F10.7 en baja actividad solar. Nótese que los días Q definidos a partir de los índices Km son pocos en años de alta actividad solar (2000, 2001, 2002) y más abundantes en años de baja (2006, 2007), como se manifiesta también en la Tabla 1.

año	días Q	días D
2000	2	30
2001	4	19
2002	6	19
2003	1	58
2004	8	17
2005	5	23
2006	27	5
2007	32	1

Tabla 1: días que satisfacen las condiciones de tranquilidad (Q) o perturbación (D) requeridas según las condiciones geomagnéticas propuestas para el período [2000, 2007].

Table 1: days satisfying quiet conditions (Q) or perturbation (D) required after the proposed geomagnetic conditions for [2000, 2007].

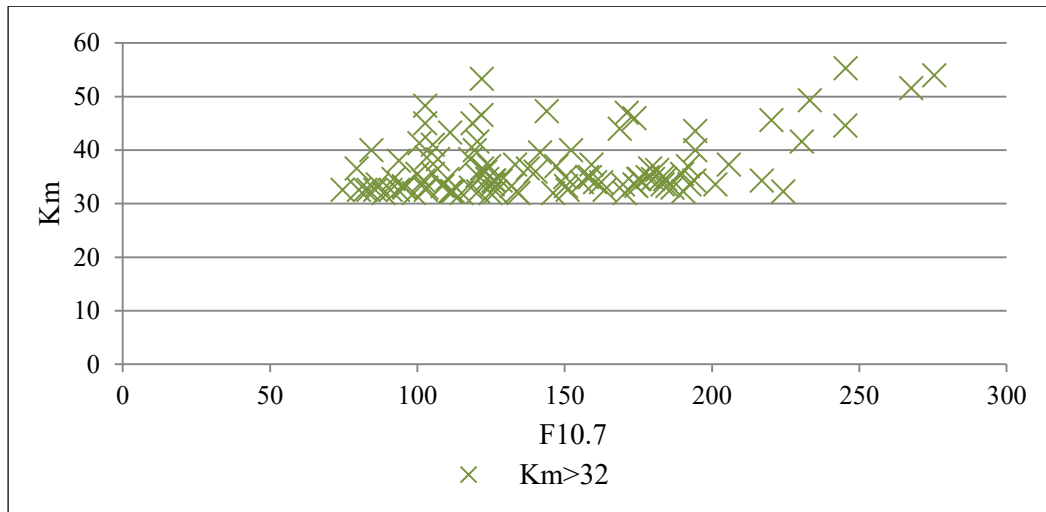


Figura 1: índices Km para actividad geomagnética alta en función de la radiación solar
Figure 1: Km indices for high geomagnetic activity related to solar radiation.

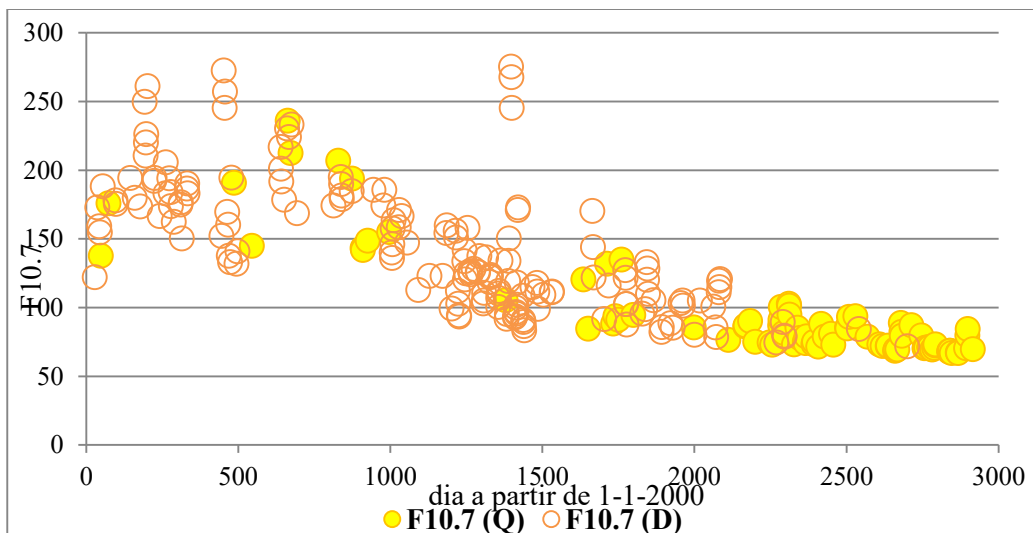


Figura 2: índice de radiación solar para días tranquilos (Q) y perturbados (D) en el intervalo [2000, 2007].
Figure 2: solar radiation index for quiet (Q) and disturbed (D) days during the timespan [2000, 2007].

Seguendo a Yamazaki et al. (2011) se estudia la conveniencia de considerar el índice F107DP(81) en lugar del F10.7. Para ello se calcula la relación entre ellos y el índice MgII, que corresponde a una medida en una longitud de onda acorde a la responsable de la ionización en la región E. En el intervalo estudiado ([1-1-2000, 31-12-2007]) para los 85 días Q seleccionados existen 71 datos MgII. En la Figura 3 se han graficado estos índices; puede observarse que los datos en [1-7-2005, 31-12-2007] los índices tienen un comportamiento similar, por lo que en este trabajo se lo considerará el intervalo de baja actividad solar; a él corresponden 53 días de datos MgII y 64 con datos F10.7 o F107DP(81).

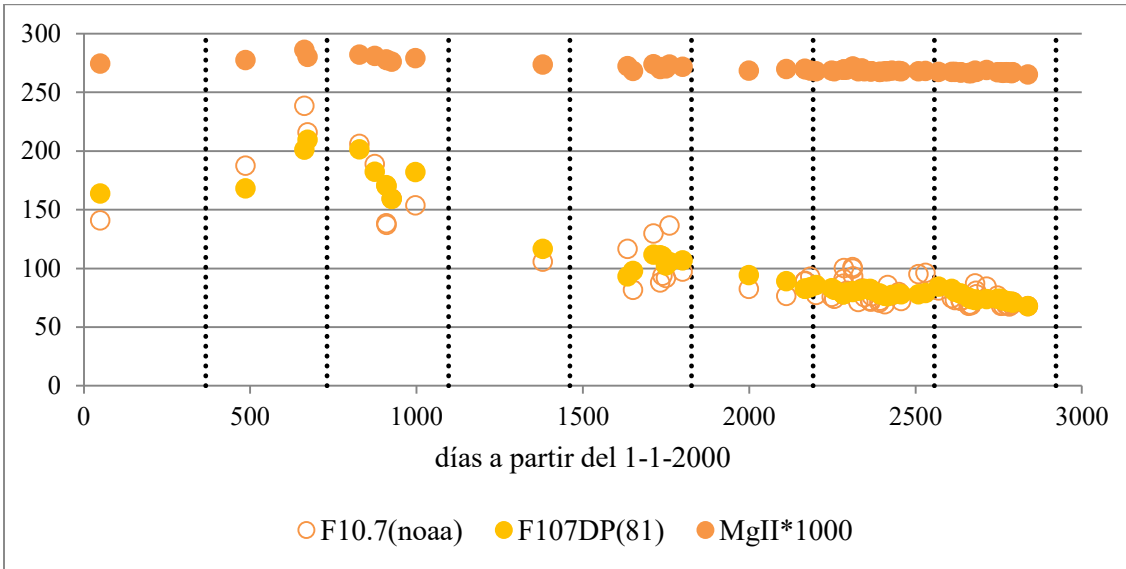


Figura 3: índices de radiación solar para días tranquilos (Q) de [1-1-2000, 31-12-2007]; las líneas punteadas verticales indican la finalización de cada año.

Figure 3: solar radiation indices for Q days during the timespan [2000, 2007]; vertical dotted lines correspond to the last day of each year.

En la Tabla 2 se muestra el índice de correlación lineal R1 entre F10.7 (noaa) (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/Penticton_Observed/daily/DAILYPLT.OBS) y MgII (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA), y R2 entre F107DP(81) y MgII (ver Fig.3), de la cual se concluye que mientras se consideren días Q en intervalos de alta y baja actividad solar los índices F10.7 y F107DP(81) son aproximadamente equivalentes, pero en baja actividad solar el 2do índice representa mejor la radiación electromagnética solar ionizante de la región E. Dado que la existencia de F10.7 es completa en el período estudiado, no así MgII, en este trabajo se usará el índice F107DP(81) como proxy a la emisión ionizante de la región E.

n	R1	R2
71ε [1-1-2000, 31-12-2007]	0,95	0,93
53ε [1-7-2005, 31-12-2007]	0,88	0,96

Tabla 2: coeficientes de correlación R1 y R2 entre los índices F10.7 y MgII, y F107DP(81) y MgII respectivamente.

Table 2: correlation R1 and R2 between F10.7 and MgII, and F10.7DP(81) and MgII, respectively

El observatorio BNG no ofrece datos cada minuto en el Centro mundial de datos de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>) entre junio de 2003 y diciembre de 2004, intervalo de actividad solar decreciente. No hay datos de los días 21-6-2005, 13-8-2007 y 20-8-2007. La cobertura de datos de HER es completa para el período en estudio.

METODOLOGÍA

Como los observatorios elegidos están próximos al meridiano de Greenwich por lo que el día universal prácticamente coincide con el día local, y dado que las corrientes en la región E son mínimas (despreciables) durante la noche, se consideran las variaciones geomagnéticas diarias tranquilas de un día a partir de los valores de la medianoche (00:00 TU) del día elegido. En cada día universal, son registrados 1440 valores (cada minuto) de las 3 componentes (X, Y y Z) en cada uno de los observatorios elegidos (de latitud geomagnética θ); de las componentes X e Y se eliminan las contribuciones de la corriente anillo y de Chapman-Ferraro usando los índices symH y symD; para cada uno de los 1440 valores:

$$\text{symX} = \text{symH} \cdot \cos\theta \cdot \text{sen}(\text{symD}) ; \text{symY} = \text{symH} \cdot \cos\theta \cdot \cos(\text{symD});$$

el factor $\cos\theta$ considera la influencia de la corriente anillo (supuesta en el ecuador geomagnético) en la latitud del observatorio. Se calculan entonces las variaciones en cada componente (dX, dY, dZ) entre los valores registrados (X, Y, Z) y el valor de las 00:00 TU (X_o, Y_o, Z_o), donde

$$X_o = X(00:00) - \text{symX}(00:00) ; Y_o = Y(00:00) - \text{symY}(00:00) ; Z_o = Z(00:00) \quad (1)$$

son los valores de la medianoche previa al día universal en cuestión, contiene la contribución de las corrientes nocturnas en la región E y elimina la contribución de la variación de la corriente anillo y de la magnetopausa);

$$dX = X - \text{symX} - X_o ; dY = Y - \text{symY} - Y_o ; dZ = Z - Z_o \quad (2)$$

son las variaciones diarias sin la contribución de las variaciones de la corriente anillo simétrica o de la magnetopausa, a partir del valor de la medianoche;

$$\Delta X = dX_{\text{máx}} - dX_{\text{mín}} ; \Delta Y = dY_{\text{máx}} - dY_{\text{mín}} ; \Delta Z = dZ_{\text{máx}} - dZ_{\text{mín}} \quad (3)$$

son las máximas amplitudes de las variaciones diarias de cada componente.

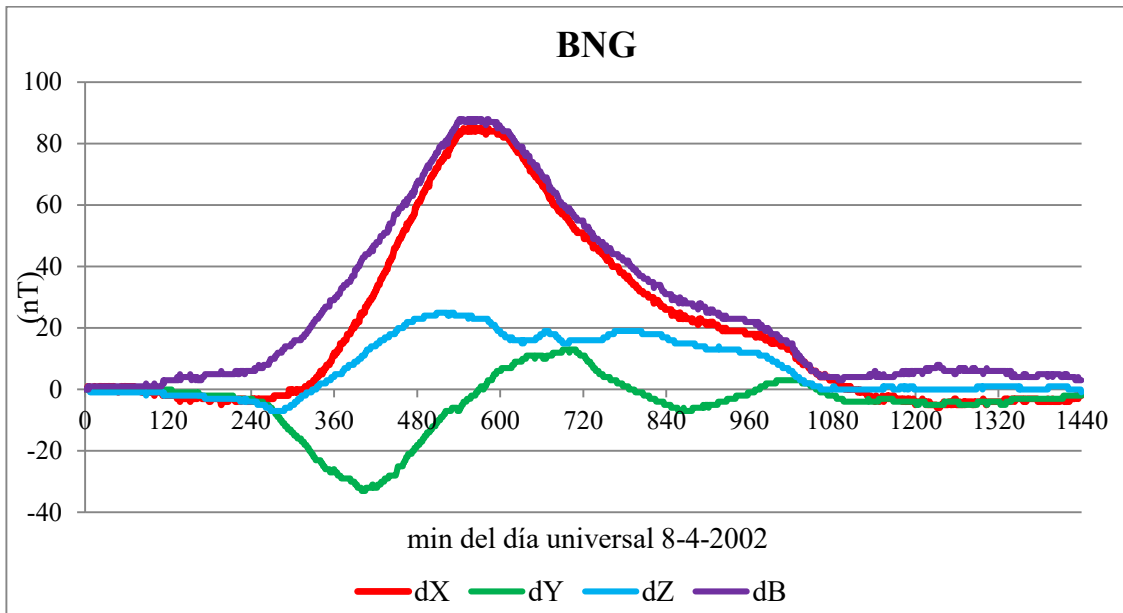
Se calcula la amplitud por variación diurna dB, definiendo $\text{dB}^2 = dX^2 + dY^2 + dZ^2$, y el promedio de los dB de un día (pdB) es una medida de la intensidad media diaria de la variación. Por lo general, luego de la corrección por corriente anillo la diferencia entre el primero y el último valor de dB ese día no supera los 5 nT; pero existen días en que ello sucede, como el 24 de octubre de 2001 (10 nT en BNG, 7 nT en HER, o el 24 de mayo de 2002 (16 nT en BNG, 17 nT en HER) entre otros. Por ejemplo, el 24 de mayo de 2002 $dY(23:59) - dY(00:00) = -16$ nT en BNG, y $dY(23:59) - dY(00:00) = -17$ nT en HER; estas variaciones nocturnas podrían atribuirse a vientos en la dirección del campo magnético en la región E esporádica, o algo encima de ella (Alba, 2002).

Para el día seleccionado 8 de abril de 2002 (en alta actividad solar) pueden observarse las variaciones calculadas: en la Figura 4a), en BNG: $\Delta X = 89$ nT, $\Delta Y = 46$ nT, $\Delta Z = 32$ nT, y pdB = 26 nT; en la Figura 4b), en HER: $\Delta X = 30$ nT, $\Delta Y = 81$ nT, $\Delta Z = 63$ nT, y pdB = 22 nT. En la Figura 4c) se evidencia que Bz(IMF) exhibe valores entre -2 y 4 nT (hasta las 18 TU) (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) correspondiente a una magnetosfera cerrada, mientras que la presión del flujo solar no supera los 1,4 nPa (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>), indicando que la compresión sobre la magnetosfera es baja.

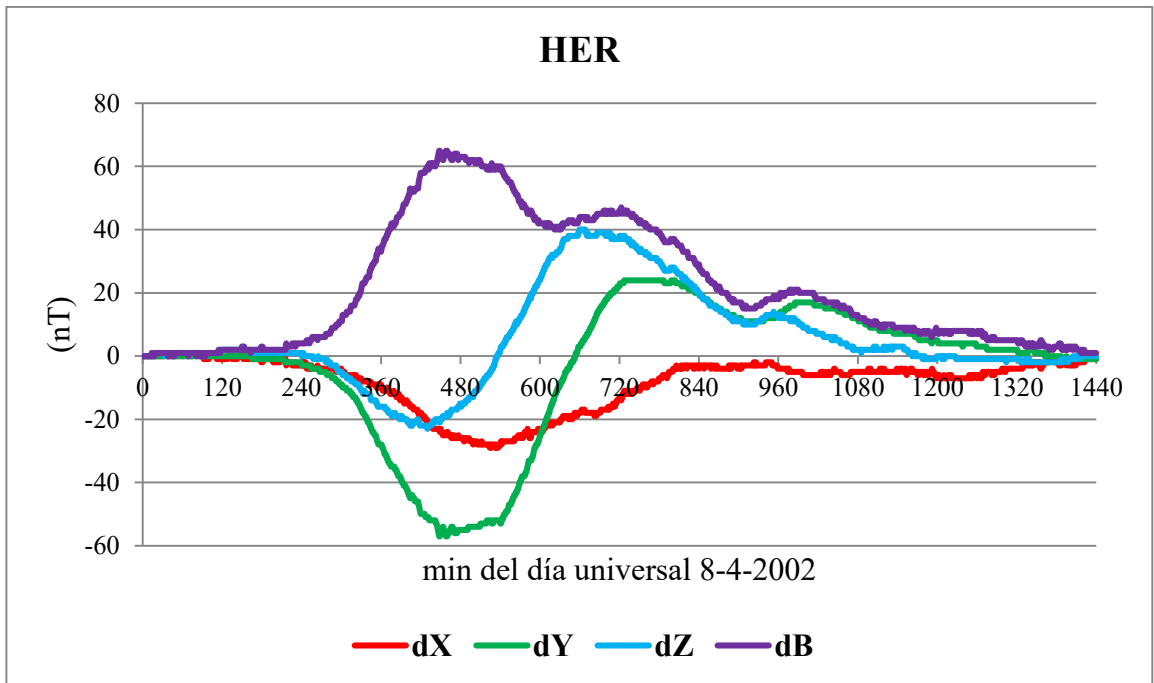
De las componentes dX (ec.2) en las Figuras 4a y 4b se desprende que el observatorio de BNG se encuentra entre los vórtices de corrientes ionosféricas, mientras que HER (próximo al vórtice austral) ese día se encuentra hacia el sur, como muestran las variaciones graficadas: en BNG dX es la componente con mayor amplitud, en HER lo son dY y dZ.

Dado que los observatorios no se encuentran sobre el ecuador geográfico, se ha calculado el ángulo entre la vertical del observatorio y la dirección de incidencia de los rayos solares, según el día considerado, proyectando el índice F107DP(81) en la 1era. dirección a fin de considerar la oblicuidad de la incidencia de la radiación en la ionización y el calentamiento, a pesar de que las corrientes son de dependencia de toda la zona y no únicamente del punto sobre el observatorio; a este parámetro se lo denomina aquí **proyF107DP**.

a)



b)



c)

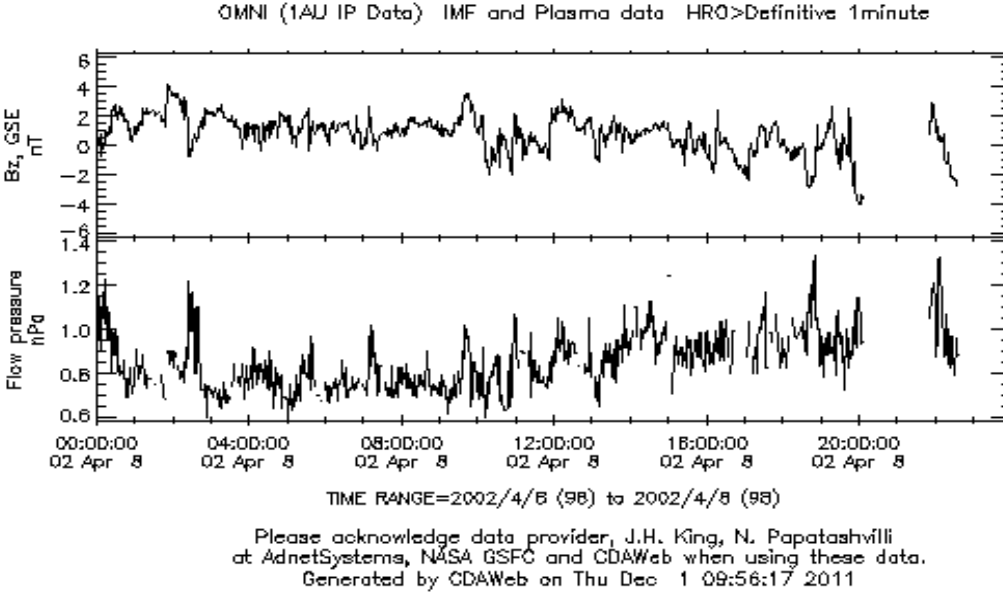


Figura 4: variación geomagnética tranquila Sq calculada para el 8 de abril de 2002; **a)** en BNG, **b)** en HER; **c)** campo magnético interplanetario Bz(GSE) y presión de viento solar (Flow pressure) para ese día

Figure 4: quiet geomagnetic Sq variation calculated for the April the 8th, 2002, **a)** at BNG, **b)** at HER; **c)** interplanetary magnetic field Bz(GSE) and solar wind pressure, plotted as Flow pressure.

VARIACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR

En la Figura 5 pueden observarse para cada día Q el valor calculado F107DP(81), su proyección en la vertical del observatorio proyF107DP, la amplitud de la variación geomagnética ΔX (ec.3) y del promedio de la amplitud pdB correspondientes a BNG en [2000, 2007]; muestran una grosera dependencia con la actividad solar.

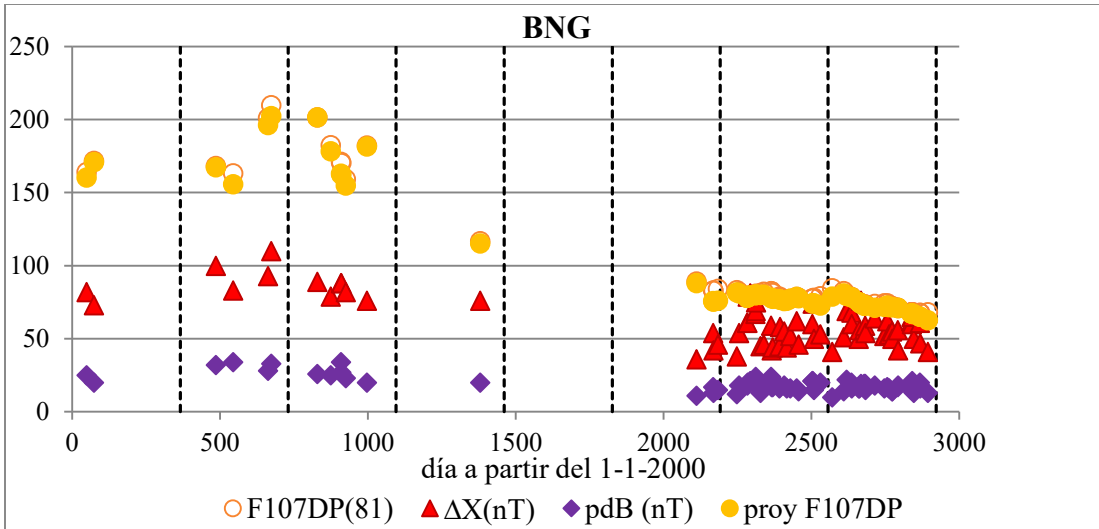


Figura 5: parámetros solares y variaciones geomagnéticas para los días Q de [2000, 2007] en BNG. Las líneas verticales indican el último día de cada año.

Figure 5: solar parameters and geomagnetic variations for Q days during the timespan [2000, 2007] at BNG. Vertical lines correspond to the last day of each year.

En la Tabla 3 se muestran los valores estadísticos obtenidos en BNG para los días Q correspondientes a los intervalos I ([1-1-2000, 31-12- 2007] y II (de baja actividad solar: [1-7-2005, 31-12-2007]) (ver Fig.5).

período	n	F107DP(81)		ΔX		ΔY		ΔZ		pdB	
		prom	σ	prom	σ	prom	σ	prom	σ	prom	Σ
I	69	95,2	39,9	61,5	13,0	33,1	10,3	24,0	7,2	18,9	4,6
II	56	76,8	5,2	55,8	10,7	31,6	10,2	22,4	6,9	17,1	3,1

Tabla 3: valores estadísticos de los parámetros y variaciones de la Fig.5.
Table 3: statistical values of the parameters and variations of Fig.5.

Los coeficientes de correlación lineal entre **F107DP(81)** y las variaciones geomagnéticas para el período I son: a) con ΔX : $r = 0,65$, b) con ΔY : $r = 0,22$, c) con ΔZ : $r = 0,36$, d) **con pdB: $r = 0,82$** y para el período II son: con ΔX : $r = -0,18$, b) con ΔY : $r = -0,01$, c) con ΔZ : $r = 0,06$, d) con pdB: $r = -0,09$, lo que implica que el promedio de la variación geomagnética diaria pdB responde aproximadamente linealmente a la radiación solar a lo largo del ciclo de actividad solar, pero no así en periodos de baja actividad solar.

Con **proyF107DP** durante el período I (prom= 92,9, $\sigma= 39.0$) la situación mejora para ΔX pues el índice de correlación a) **con ΔX : $r = 0,91$** y b) **con pdB: $r = 0,82$** ; aunque en el período II (prom = 75,0, $\sigma = 5,0$) no hay correlación lineal con las variaciones geomagnéticas.

En las Figura 6 pueden observarse para cada día Q el valor calculado F107DP(81), su proyección en la vertical del observatorio proyF107DP, la amplitud de la variación geomagnética ΔY y del promedio de la amplitud pdB correspondientes a HER en [2000, 2007]; muestran una grosera dependencia con la actividad solar.

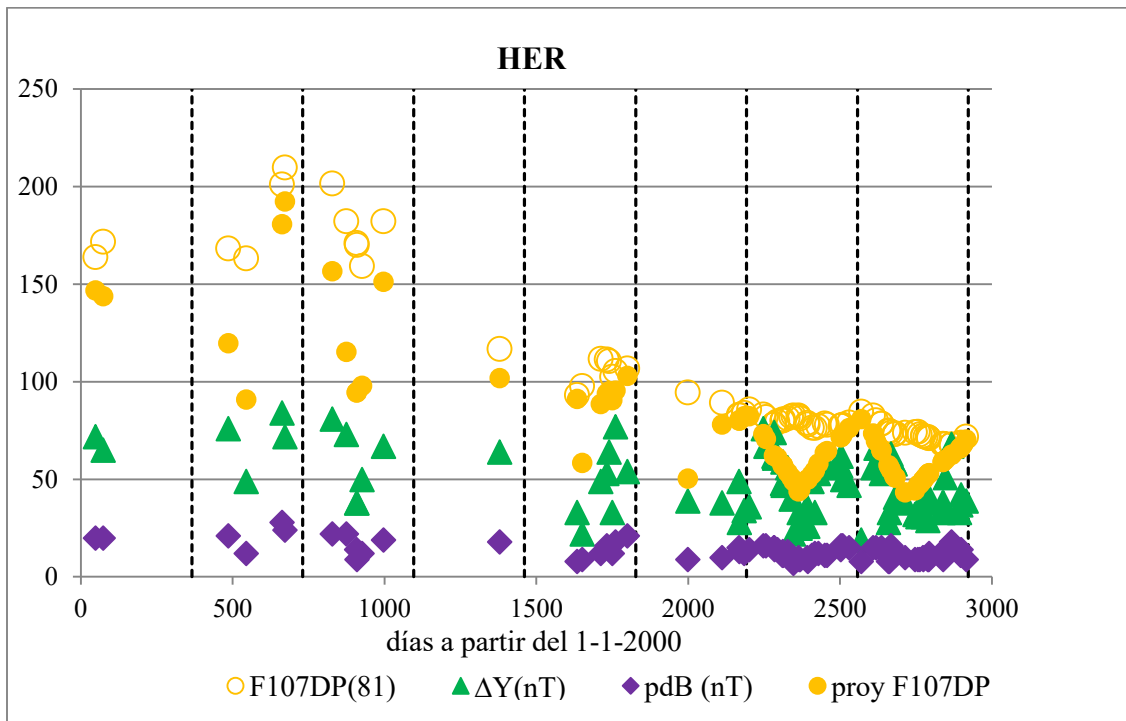


Figura 6: parámetros solares y variaciones geomagnéticas para los días Q de [2000, 2007] en HER. Las líneas verticales indican el último día del año.

Figure 6: solar parameters and geomagnetic variations for Q days during the timespan [2000, 2007] at HER. Vertical lines correspond to the last day of each year.

En la Tabla 4 se muestran los valores estadísticos obtenidos en HER para los días Q correspondientes a los intervalos I ([1-1-2000, 31-12- 2007]) y II (de baja actividad solar: [1-7-2005, 31-12-2007]).

período	n	F107DP(81)		ΔX		ΔY		ΔZ		pdB	
		prom	σ	prom	σ	prom	σ	prom	σ	prom	σ
I	85	94,4	36,6	26,6	7,1	48,2	15,9	30,3	13,2	13,1	4,2
II	63	76,6	5,4	24,8	6,2	45,2	14,2	28,4	11,6	11,9	5,9

Tabla 4: valores estadísticos de los parámetros de la Fig.6.

Table 4: statistical values for parameters from Fig. 6.

Los coeficientes de correlación lineal entre F107DP(81) y las variaciones geomagnéticas para el período I son: a) con ΔX : $r = 0,33$, b) con ΔY : $r = 0,44$, c) con ΔZ : $r = 0,40$, d) con pdB: $r = 0,63$; y para el período II son: a) con ΔX : $r = 0,08$, b) con ΔY : $r = 0,04$, c) con ΔZ : $r = 0,18$, d) con pdB: $r = 0,04$, lo que implica que el promedio de la variación geomagnética diaria pdB no tiene una respuesta lineal a la radiación solar a lo largo del ciclo de actividad solar, ni en períodos de baja actividad solar.

Con **proyF107DP** durante el período I (prom= 73,6, $\sigma = 30.4$) la situación mejora pues el índice de correlación a) con ΔY : $r = 0,55$, b) con ΔZ : $r = 0,55$, c) **con pdB: $r = 0,77$** ; aunque en el período II (prom = 60,3, $\sigma = 10,7$) no hay correlación lineal con las variaciones geomagnéticas.

VARIACIONES CON EL DÍA DEL AÑO

En la Figura 7 se han graficado parámetros solares y variaciones geomagnéticas para el período II (baja actividad solar) según el día del año para BNG; los puntos representan los valores calculados de proyF107DP, ΔX (ec.3) y pdB mientras que las líneas representan el promedio corrido centrado de 31 días correspondiente a cada uno de ellos; el número de días involucrados en cada promedio (n) figura en el gráfico. Mientras que proyF107DP no evidencian alguna variación anual, ΔX y pdB son máximas en días próximos a los equinoccios y mínimas en días próximos a los solsticios; a pesar del bajo número de días considerados ΔX parece insinuar que es mayor en la primavera boreal que en otoño, y en el verano en relación con el invierno. ΔY y ΔZ no evidencian variaciones regulares a lo largo del año.

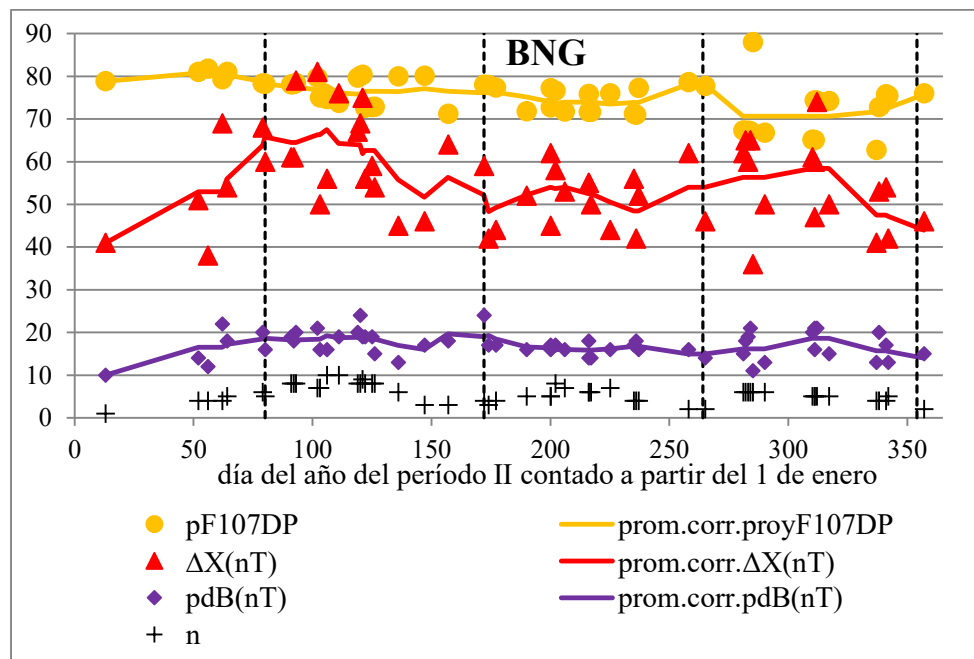


Figura 7: parámetros solares y variaciones geomagnéticas para los días Q elegidos del período II (baja actividad solar) según el día del año, para BNG; las líneas verticales indican los solsticios y equinoccios.

Figure 7: solar parameters and geomagnetic variations for selected Q days with low solar activity, according to the day of the year, for BNG; vertical lines correspond to equinoxes and solstices; n indicates the number of data considered for calculating each mean value

En la Figura 8 se han graficado parámetros solares y geomagnéticos para el intervalo II (baja actividad solar) según el día del año para HER; los puntos representan los valores calculados de proyF107DP, ΔY , ΔZ (ec.3) y pdB mientras que las líneas representan el promedio corridizo centrado de 31 días correspondiente a cada uno de ellos; el número de días involucrados en cada promedio (n) figura en el gráfico; mientras que proyF107DP muestra un máximo en el verano austral y un mínimo en el invierno austral, las amplitudes ΔY y ΔZ , y pdB son máximas en días próximos a los equinoccios y mínimas en días próximos al invierno austral. ΔX no muestra variaciones regulares a lo largo del año.

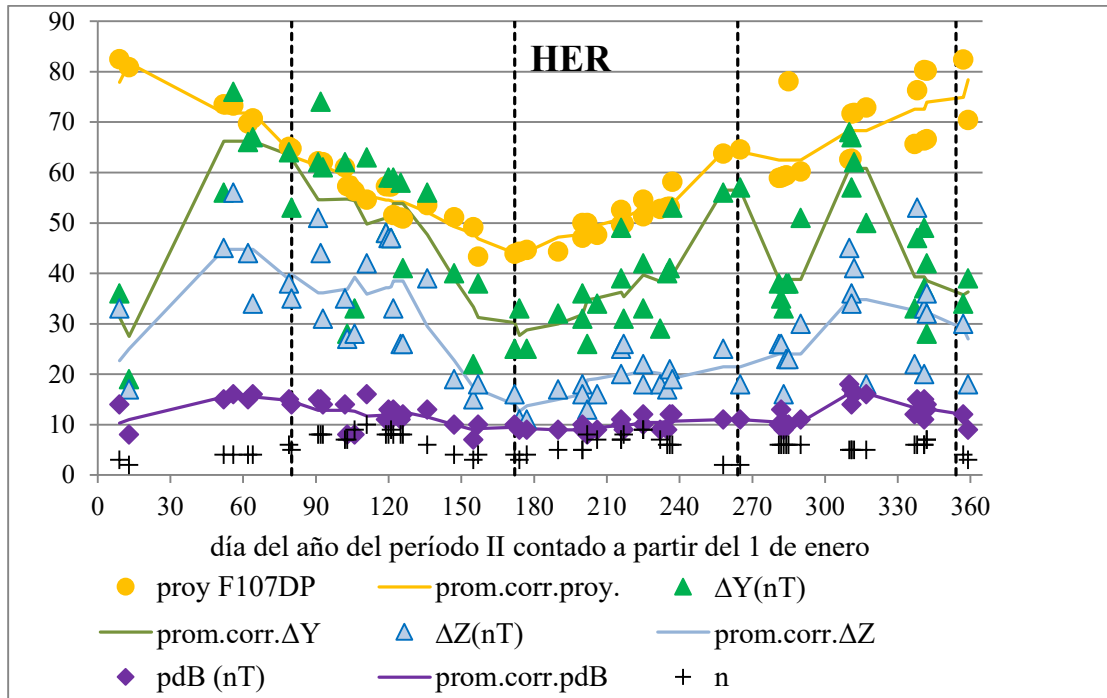


Figura 8: parámetros solares y variaciones geomagnéticas para los días Q elegidos del período II en HER. Las líneas verticales indican los solsticios y equinoccios; n indica el número de datos considerado para calcular cada valor medio..

Figure 8: solar parameters and geomagnetic variations chosen for Q days at HER in low solar activity. Vertical lines indicate equinoxes and solstices; n indicates the number of data considered for calculating each mean value.

VARIACIONES DE LOS VALORES NOCTURNOS

Para cada día elegido del intervalo II se ha calculado por cuadrados mínimos la recta que ajusta la variación de los valores de la medianoche $X_o(00:00)$, $Y_o(00:00)$ y $Z_o(00:00)$ (ec.1), en ambos observatorios. En la Figura 9 se han graficado estos valores: para BNG y para HER. Puede verse claramente en el gráfico de $Y_o(BNG)$ que los valores muestran una discontinuidad artificial entre los valores previos (período II a) y posteriores (período II b) al 1-1-2007, por ello se han ajustado en BNG por 2 rectas los valores anteriores y posteriores a esa fecha, suponiendo una variación lineal para la variación secular (campo interno); en la Figura 9c) es claramente notable el máximo durante el verano del norte en 2007.

En la Tabla 5 se muestran las pendientes de las rectas que representan la variación secular. Puede observarse que en BNG: $Z_o < 0$ y su pendiente parece aminorar su decrecimiento según se ha calculado para II a (29 nT/año) y II b (20 nT/año), mientras que en HER ($Z_o < 0$) Z_o es creciente con una pendiente de 32 nT/año, lo que condice con la expansión de la Anomalía del Atlántico Sur (<http://solidearth.jpl.nasa.gov/PAGES/maq02.html>)

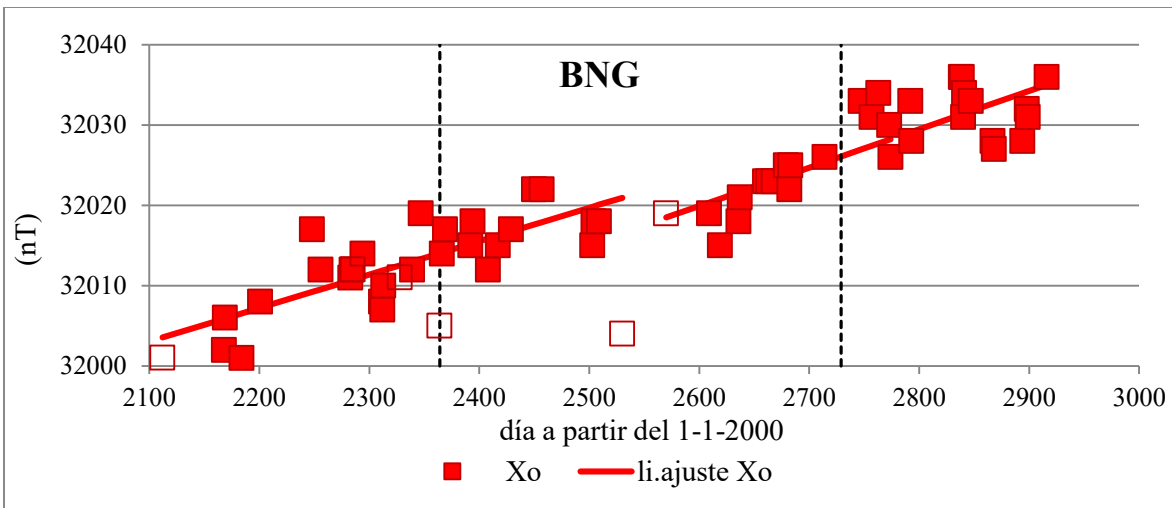
Obs.	período	pend. X_o (nT/día)	pend. Y_o (nT/día)	pend. Z_o (nT/día)
BNG	II a	0,042	0,194	-0,080
	II b	0,048	0,203	-0,056
HER	II	-0,062	-0,015	0,094

Tabla 5 pendientes de las rectas que representan la variación secular en ambos observatorios

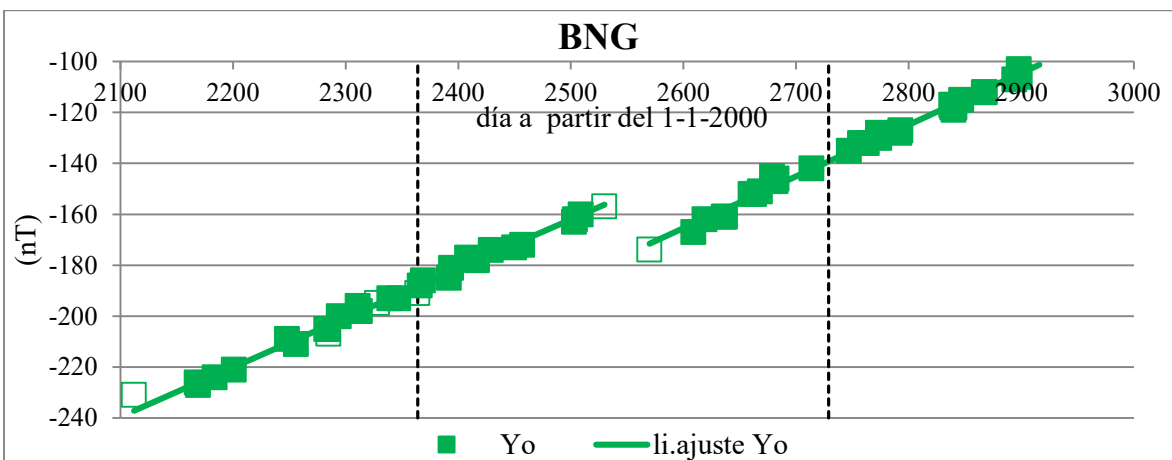
Table 5: slope of the lines representing the secular variation at both observatories

Se han indicado sin relleno aquellos valores no considerados para el cálculo de las rectas de ajuste, por exceder el valor $|dB(00:00)-dB(23:59)|$ los 5 nT, como se explicó en Metodología. Las líneas verticales corresponden al 21-6-2006 (día 2364) y 21-6-2007 (día 2729).

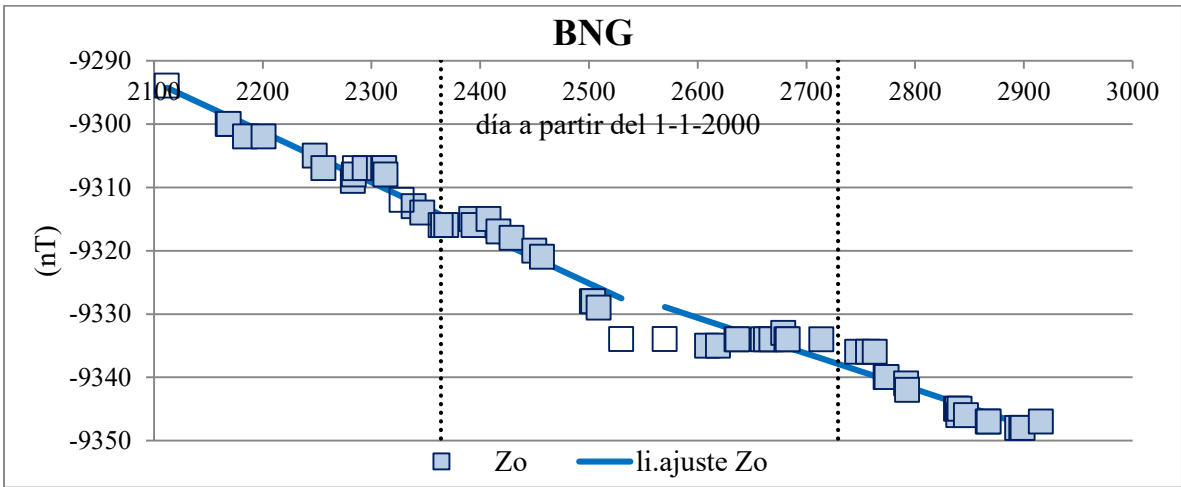
a)



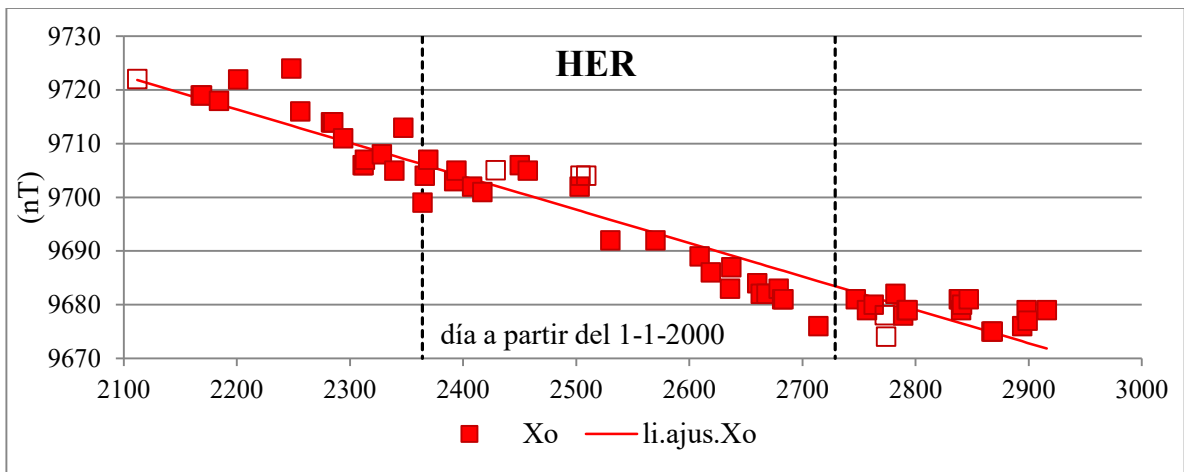
b)



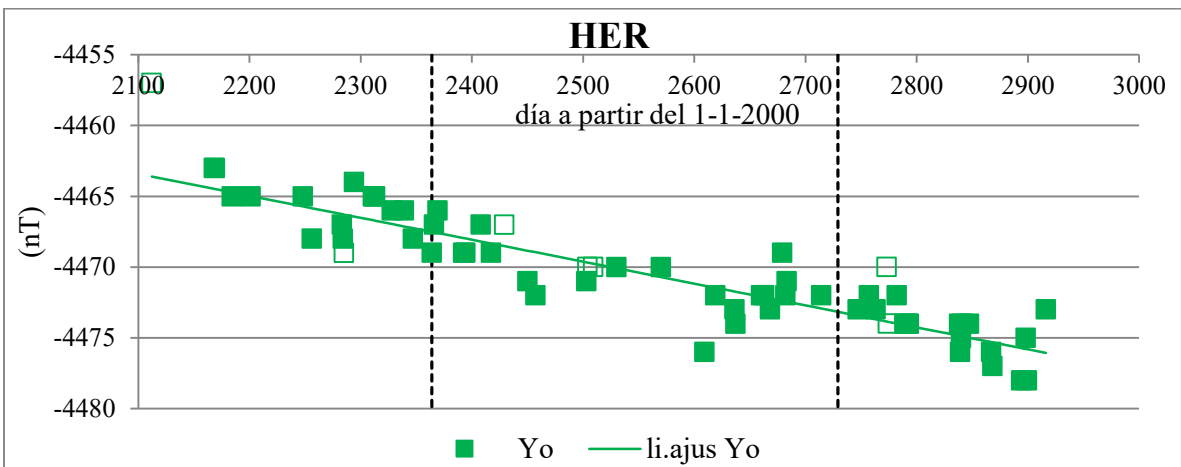
c)



d)



e)



f)

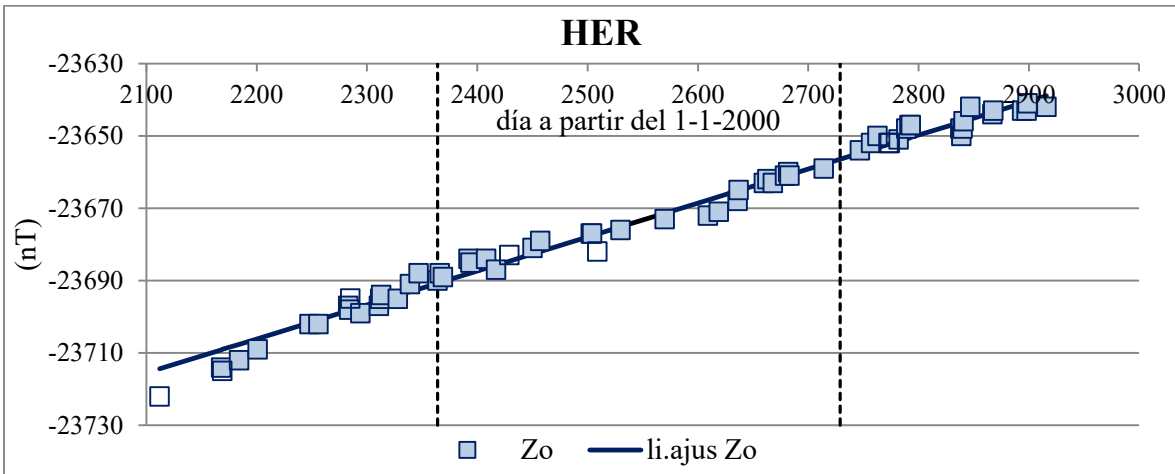


Figura 9: valores (X_o , Y_o , Z_o) de las 3 componentes en la medianoche previa a cada día universal tranquilo elegido, para el intervalo II, para BNG (a, b, c) y para HER (d, e, f), y la recta que ajusta su variación. Se han indicado sin relleno aquellos valores no considerados para el cálculo de las rectas de ajuste, por exceder el valor $|dB(00:00)-dB(23:59)|$ los 5 nT. Las líneas verticales corresponden al 21-6-2006 (día 2364) y 21-6-2007 (día 2729)

Figure 9: (X_o , Y_o , Z_o) values corresponding to the previous midnight of the chosen Sq day, for low solar activity, at BNG (a, b, c) and at HER (d, e, f), and the fitting line for its variation. Simple contour correspond to data not considered for the fitting due to $|dB(00:00)-dB(23:59)| > 5$ nT. Vertical lines correspond to 21-6-2006 (day 2364) and 21-6-2007 (day 2729).

En la Figura 10 se ha graficado la diferencia entre el valor de medianoche de la componente Z (sin la contribución debida a la corriente anillo simétrica) (Z_o , ec.1) y la recta de ajuste para los días seleccionados en baja actividad solar para el observatorio BNG. Las diferencias resultan inferiores a los 4 nT, pero muestran en promedio valores mayores en la primavera y verano boreal, indicando la presencia de corrientes ionosféricas nocturnas más intensas (hacia el este) en esas estaciones del año, en el hemisferio norte, suponiendo que la variación anual del campo principal está bien representada por una recta.

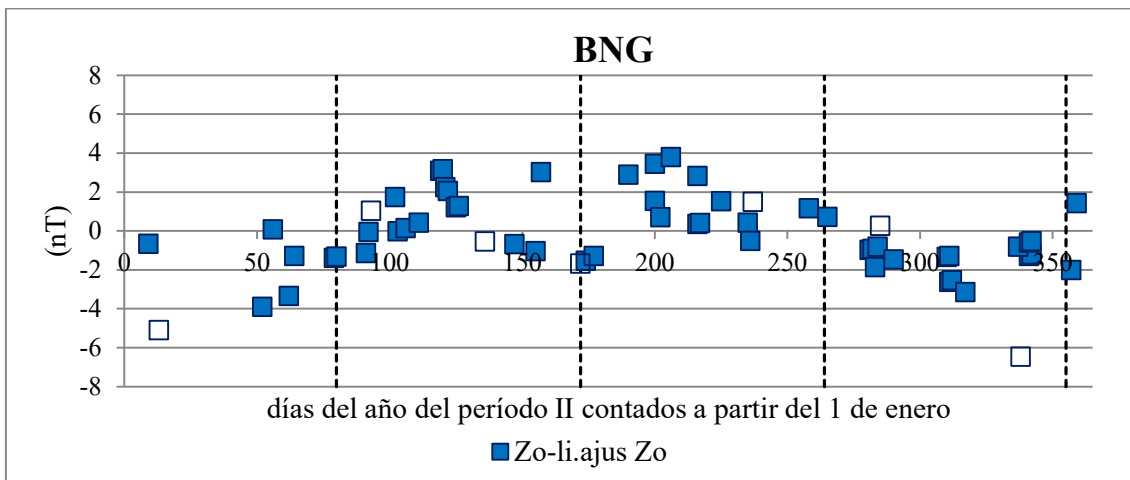


Figura10: diferencia entre el valor de medianoche de la componente Z (sin la contribución debida a la corriente anillo simétrica) y la recta de ajuste para los días seleccionados en baja actividad solar para el observatorio BNG. Se han indicado sin relleno aquellos valores no considerados para el cálculo de las rectas de ajuste, por exceder el valor $|dB(00:00)-dB(23:59)|$ los 5 nT. Las líneas verticales corresponden a equinoccios y solsticios.

Figure 10: difference between midnight and fitting values for Z component (without symmetric ring current contribution) for selected days at low solar activity, at BNG. Simple contour correspond to data not considered for the fitting due to $|dB(00:00)-dB(23:59)| > 5$ nT. Vertical lines correspond to equinoxes and solstices.

En la Figura 11 se ha graficado la diferencia entre el valor de medianoche de X_0 y Z_0 (ec.1) y las respectivas rectas de ajuste para los días seleccionados en baja actividad solar para el observatorio HER. Las diferencias en Z resultan inferiores a los 5 nT, pero muestran su máximo en el invierno austral, lo que indicaría la presencia de corrientes ionosféricas nocturnas más intensas (hacia el este) al norte del observatorio, mientras que en X las diferencias pueden duplicar este valor, con valores mínimos en el otoño y máximos en la primavera austral. Ello indicarían incremento de las corrientes ionosféricas nocturnas al sur de este observatorio durante la primavera y el verano austral respecto de las otras 2 estaciones del año.

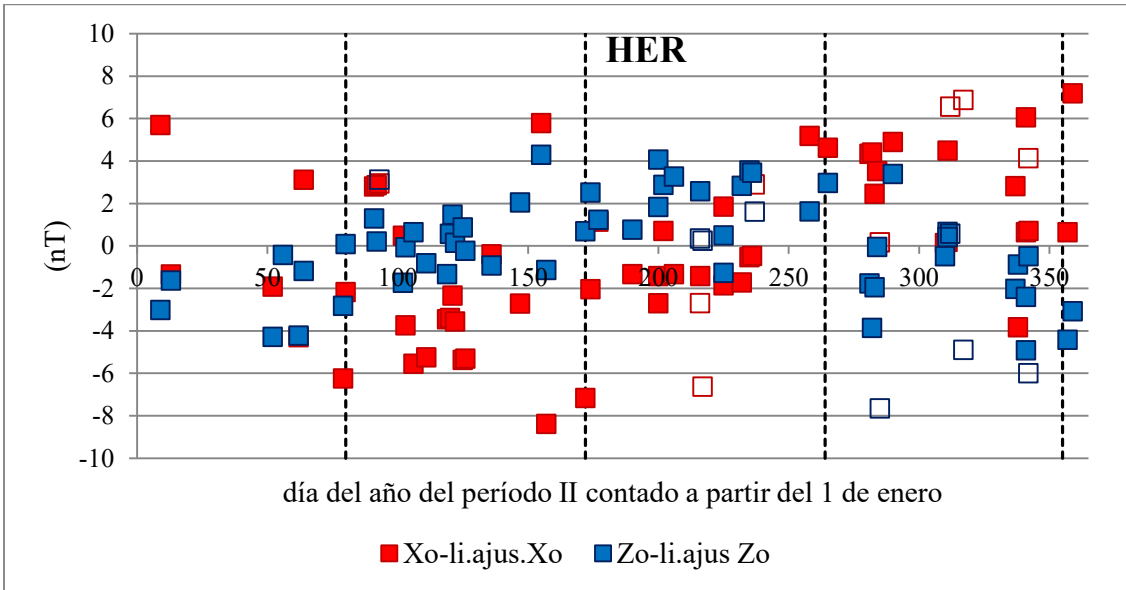


Figura11: diferencia entre el valor de medianoche de las componentes X y Z (sin la contribución debida a la corriente anillo simétrica) y la recta de ajuste para los días seleccionados en baja actividad solar para el observatorio HER. Se han indicado sin relleno aquellos valores no considerados para el cálculo de las rectas de ajuste, por exceder el valor $|dB(00:00)-dB(23:59)| > 5$ nT. Las líneas verticales corresponden a equinoccios y solsticios.

Figure 11: difference between midnight and fitting values for X and Z components (without symmetric ring current contribution) for selected days at low solar activity, at HER. Simple contour correspond to data not considered for the fitting due to $|dB(00:00)-dB(23:59)| > 5$ nT. Vertical lines correspond to 21-6-2006 (day 2364) and 21-6-2007 (day 2729).

DISCUSIÓN

Como es sabido los días tranquilos son pocos en años de alta actividad solar y más abundantes en años de baja. A fin de verificar si la radiación solar incidente influye en el grado de perturbación magnética se comparan los F10.7 de los días perturbados y los días tranquilos pudiendo observarse que no se diferencia el índice F10.7 en ambos conjuntos, excepto en que no se registran muy altos valores de F10.7 en baja actividad solar (ver Fig.2).

Los índices de correlación lineal entre F10.7 y F107DP(81) con MgII permiten concluir que mientras se consideren días tranquilos en intervalos de alta y baja actividad solar los índices F10.7 y F107DP(81) son aproximadamente equivalentes, pero en baja actividad solar el 2do índice representa mejor la radiación electromagnética solar ionizante de la región E (ver Tabla 2). Dada la completitud de los datos F107DP(81) se lo considera mejor expresión de la radiación ionizante en la región E.

En el estudio entre la actividad solar y Sq a lo largo de los ciclos solares Chapman y Bartels (1940) muestran la mayor amplitud de las componentes geomagnéticas en alta actividad. En un estudio para observatorios argentinos Vecchi et al (1985) verifican, en general, el mismo comportamiento. El estudio de la variación con la actividad solar durante el intervalo I, en BNG, muestra que existe una correlación entre $proyF107DP$ y ΔX o pdB ; en HER la correlación existe entre $proyF107DP$ y pdB ; no así durante el intervalo II de baja actividad solar.

Rastogi e Iyer (1976), y Campbell (1981) encuentran que cerca del ecuador las mayores amplitudes en días quietos se observan en las componentes horizontales durante los equinoccios. El estudio de las variaciones con el día del año en baja actividad solar (intervalo II) muestran que estadísticamente, en BNG, ΔX y pdB son máximas en días

próximos a los equinoccios y mínimas en días próximos a los solsticios, y ΔX parece insinuar que es mayor en la primavera boreal que en otoño, y en el verano en relación con el invierno. Yamazaki et al. (2011) muestran que existe una asimetría entre los máximos: el de primavera es mayor que el de otoño. Chulliat et al. (2005) examinando la asimetría otoño-primavera de Sq a partir de registros de observatorios de bajas latitudes de todo el mundo a lo largo de varios ciclos solares concluyen que no depende de la actividad solar o geomagnética, sino que debe ser atribuida a los vientos ionosféricos

Chapman y Bartels (1940), y Chapman (1951) encuentran que en los observatorios no ecuatoriales la amplitud de la variación del campo geomagnético en días quietos muestra un incremento apreciable durante el verano local. Yamazaki et al. (2009) muestran que, estadísticamente, observatorios orientales ecuatoriales y de latitud media muestran una variación anual y estacional (5 términos en el desarrollo de Fourier de los promedios corregidos). En HER mientras que proyF107DP muestra un máximo en el verano austral y un mínimo en el invierno austral, las amplitudes ΔY y ΔZ , y pdB son máximas en días próximos a los equinoccios y mínimas en días próximos a los solsticios.

En las Tablas 3 y 4 se muestra que los promedios de la variación diaria del campo magnético pdB es mayor en BNG que HER, resultado de la latitud de los observatorios.

CONCLUSIONES

Las variaciones geomagnéticas solares en días geomagnéticamente tranquilos (Sq) son producidas por el movimiento de partículas en la región E ionosférica, generadas por la radiación solar incidente sobre ella. Para determinar la tranquilidad de un día se utilizaron los índices Km. Para eliminar la componente debida a la corriente anillo ecuatorial simétrica y la compresión del viento solar sobre la magnetosfera se utilizaron los índices symH y symD . Se estudiaron las variaciones registradas en los observatorios BNG (de baja latitud) y HER (de latitud media) y un parámetro solar deducido del índice F10.7, previa comparación con el MgII, más específico para la radiación ionizante.

Aunque el número de días aquí seleccionados no permite un estudio analítico por series de Fourier, puede concluirse que las variaciones Sq registradas en el observatorio HER (que se encuentra en la región afectada por la Anomalía del Atlántico Sur) cumple las características halladas en sus antípodas: la variación media diaria es menor que en BNG, la radiación solar es una contribución importante en la variación de Sq por actividad solar en ambos observatorios africanos, pero no lo es en la variación anual o semianual; en estos casos, siguiendo a otros autores debe considerarse que el factor determinante son los vientos de la alta atmósfera.

Aunque las variaciones lentas de los valores nocturnos se corresponden con procesos en el interior del planeta, las diarias reflejan la variabilidad de la atmósfera neutra.

Agradecimientos. La autora agradece al CONICET y a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA); y al World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (Japón) y al Service International des Indices Geomagnetiques (Francia) y a la NASA (EEUU) por la facilidad de disponibilidad de los datos utilizados, y al árbitro que contribuyó a una mejor comprensión del contenido del trabajo.

REFERENCIAS

- Acebal, A.O., 2008. Extending F10.7's Time Resolution to Capture Solar Flare Phenomena. All Graduate Theses and Dissertations. Paper 184. <http://digitalcommons.usu.edu/etd/184>
- Alba, A.S. de, 2002. El viento en la alta atmósfera y su relación con la capa E esporádica. Tesis doctoral de la Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Madrid, España. ISBN: 978-84-669-0465-0. <http://eprints.ucm.es/1881/>
- Campbell, W. H.; 1981. Annual and semiannual variations of the geomagnetic field at equatorial locations, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43, 607–616.
- Chapman, S.; 1951. *The Earth's Magnetism*, John Wiley, New York.
- Chapman, S. and J. Bartels; 1940. *Geomagnetism*, Oxford at the Clarendon press, vol I, pp 542.
- Chulliat, A., E. Blanter, J.-L. Le Mouél, and M. Shinirman; 2005. On the seasonal asymmetry of the diurnal and Semidiurnal geomagnetic variations. *Journal of Geophysical Research*, 110, A05301, doi:10.1029/2004JA010551.
- Floyd, L., J. Newmark, J. Cook, L. Herring, and D. McMullin; 2005. Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 3–15.
- Hargreaves, J.K., 1992; *The solar-terrestrial environment*. Cambridge atmospheric and space science series 5, pp 420.
- Kane, R. P.; 2002. Correlation of solar indices with solar EUV fluxes. *Solar Physics*, 207, 17–40.

- Lee, L.-C.; 1986. Magnetic Flux Transfer at the Earth's magnetopause, at Solar wind-magnetosphere coupling ed. by Y. Kamide and J.A.Slavin. TERRAPUB.
- Lukianova, R. and K. Mursala; 2011. Changed relation between sunspots numbers, solar UV/EUV radiation and TSI during the declining phase of solar cycle 23. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 235-240.
- Matsushita, S. and H. Maeda; 1965. On the geomagnetic solar quiet daily variation field during the IGY, *Journal of Geophysical Research*, 70, 2535-2558.
- Mayaud, P. N.; 1965. Analyse morphologique de la variabilité jour à jour de la variation "régulière" S_q du champ magnétique terrestre, II. Le système de courants C_m (régions non polaires), *Annales Geophysicae*, 21, 515-544.
- Menvielle M. and Berthellier, A.; 1991. The K derived planetary indices: description and availability. *Reviews of Geophysics* 29 (3), 415-432.
- Miyahara, S., and M. Ooishi; 1997. Variation of S_q induced by atmospheric tides simulated by a middle atmosphere general circulation model, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 49, 77-87.
- Parks, G.K., 1991. *Physics of space plasma, an introduction*. Addison-Wesley publishing Company, pp 538.
- Rastogi, R. G., and K. N. Iyer; 1976. Quiet day variation of geomagnetic H-field at low latitudes. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 28, 461-479
- Richmond, A. D., 1998. The ionosphere and upper atmosphere, in *From the Sun: Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, edited by Steven T. Suess and Bruce T. Tsurutani, pp. 35-44, AGU, Washington, D. C.
- Takeda, M.; 1999. Time variation of global geomagnetic S_q field in 1964 and 1980, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 61, 765-774.
- Takeda, M.; 2002. Features of global geomagnetic S_q field from 1980 to 1990. *Journal of Geophysical Research*, 107(A9), 1252, doi:10.1029/2001JA009210.
- Vecchi, M. C., M. A. Van Zele y O. Schneider; 1985. Variaciones geomagnéticas solares de días tranquilos en territorio argentino según la actividad solar. *GEOACTA* 12 (2) 57-70.
- Yamazaki, Y., K. Yumoto, T. Uozumi, A. Yoshikawa, and M. G. Cardinal; 2009. Equivalent current systems for the annual and semiannual S_q variations observed along the 210-MM CPMN stations, *Journal of Geophysical Research*, 114, A12320, doi:10.1029/2009JA014638.
- Yamazaki, Y., K. Yumoto, M. G. Cardinal, B. J. Fraser, P. Hattori, Y. Kakinami, J. Y. Liu, K. J. W. Lynn, R. Marshall, D. McNamara, T. Nagatsuma, V. M. Nikiforov, R. E. Otadoy, M. Ruhimat, B. M. Shevtsov, K. Shiokawa, S. Abe, T. Uozumi and A. Yoshikawa; 2011. An empirical model of the quiet daily geomagnetic field variation, *Journal of Geophysical Research*, 116, A10312, doi:10.1029/2011JA016487.

Recibido: 19-03-2013
 Aceptado: 04-07-2013