

Análisis de periodicidades de TEC en latitudes ecuatoriales durante 2008

Gilda L. González^{1,2} y Hernán J. Esquivel^{1,2}

¹ CONICET, Argentina.

² Laboratorio de Técnicas Satelitales, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.

Resumen

En el presente trabajo se analiza la periodicidad de valores promedio del contenido electrónico total (TEC) para cinco estaciones GPS de la región ecuatorial durante 90 días del año 2008 (día 32 a día 122). El análisis espectral indica la existencia de períodos de 9, 13-14.5 y 21-22 días para las cinco estaciones. Estas periodicidades están asociadas fundamentalmente a cambios en las corrientes de viento solar; sin embargo, también es importante el efecto de las oscilaciones de la componente Bz del campo magnético interplanetario (IMF). Por otra parte, el pico espectral de 21-22 días no se observa en el viento solar, ni en IMF ni en el índice Kp, lo que sugiere que probablemente esta periodicidad no tiene relación con la actividad geomagnética ni con las condiciones del viento solar, sino que tiene origen en los efectos meteorológicos en la ionósfera.

Palabras clave: ionósfera, contenido electrónico total, periodicidad.

Analysis of day-to-day variability in TEC at equatorial latitudes during 2008

Abstract

In this paper we analyze day-to-day variability in Total Electron Content (TEC) values measured at five GPS stations at the equatorial region for 90 days in 2008 (day 32 to day 122). The spectral analysis identifies periodicities of 9, 13-14.5 and 21-22 days in the data at five stations. These periodicities are primarily associated with changes in the solar wind streams. However, the effect of the oscillations in the interplanetary magnetic field (IMF) Bz component is also important. Moreover, the 21-22 days periodicity is not observed in the solar wind, in the IMF nor in the Kp index, suggesting that this periodicity probably has no relation with geomagnetic activity nor with solar wind conditions but it originated in the meteorological effects in the ionosphere.

Keywords: ionosphere, total electron content, periodicity.

Introducción

Los cambios en el estado de la ionósfera son un aspecto importante en la meteorología espacial, tanto por sus aplicaciones prácticas como por su interés científico. Las escalas de tiempo van desde cambios a largo plazo hasta horas o algunos minutos. Los orígenes de la variabilidad de la región F de la ionósfera se pueden clasificar en tres categorías generales: Solar, geomagnética y meteorológica, **Rishbeth y Mendillo (2001)**. "Solar" se refiere a variaciones regulares que se producen como resultado de la rotación del Sol y de la Tierra sobre su propio eje. Hay cuatro tipos de variaciones regulares: variaciones diurnas, estacional, de 27 días y variaciones con el ciclo solar. Además, las variaciones inducidas por el flujo solar en las temperaturas y vientos neutros, en la composición neutra y en las conductividades se manifiestan en las densidades del plasma ionosférico.

El estado de la ionósfera está determinado, además, por los procesos originados en la atmósfera inferior, alguno de los cuales ocurren como resultado de la propagación de ondas de gravedad y ondas planetarias por la mesósfera y la baja termósfera. Es decir, se trata de la variabilidad que se debe a fenómenos dinámicos provenientes de la atmósfera inferior, o debidos a la no linealidad inherente del sistema; se excluyen explícitamente las variaciones anuales y semestrales, y las variaciones correlacionadas con el flujo solar.

Las escalas de tiempo van desde cambios a largo plazo hasta horas o algunos minutos.

Las ondas planetarias pueden afectar los electrochorros ecuatoriales, **Vineeth et al. (2007)**, modifican la temperatura y la estructura de los vientos en la termósfera e influyen en la conductividad de la región E. Estas son las denominadas "influencias meteorológicas" en la ionósfera.

Las perturbaciones ionosféricas de origen geomagnético se producen al azar por lo que son difíciles de modelar e incluyen variaciones debidas a cambios en el viento solar y en el campo magnético interplanetario (IMF), y a tormentas geomagnéticas. Las tormentas geomagnéticas pueden estar asociadas a eyecciones de masa coronal interplanetaria (ICME) o a regiones de interacción corrotante (CIR) estas últimas son de menor intensidad y de mayor duración.

El estado de la ionósfera está determinado, además, por los procesos originados en la atmósfera inferior, alguno de los cuales ocurren como resultado de la propagación de ondas de gravedad y ondas planetarias por la mesósfera y la baja termósfera.

Las perturbaciones ionosféricas y geomagnéticas producidas por tormentas generadas por CIR tiende a ser de intensidad moderada, por su parte las tormentas generadas por ICME se inclinan a introducir variaciones abruptas y dramáticas en la ionósfera, **Echer et al. (2008)**; **Borovsky and Denton (2006)**. El comportamiento de la componente Bz del IMF sirve para discriminar claramente los eventos CIR de los eventos ICME. En el caso de eventos CIR la componente Bz varía rápidamente y fluctúa entre direcciones norte y sur por varios días. Por el contrario, durante los eventos ICME, Bz se mantiene aproximadamente estacionaria y con dirección sur.

La contribución a la variabilidad ionosférica día a día de origen meteorológico es comparable a la debida a fuentes geomagnéticas, mientras que la contribución de la radiación solar es menor y parece cobrar importancia en la variabilidad mes a mes y año a año, **Rishbeth y Mendillo (2001)**; **Forbes et al. (2000)**. Se pudo determinar que la actividad geomagnética contribuye de forma significativa a la variabilidad ionosférica en escalas de tiempo de 2 a 30 días, y está asociada a periodicidades de 5, 10 y 13,5 días, **Xiong et al. (2006)**.

Lei et al. (2008) concluyeron que la variabilidad del contenido electrónico total (TEC) global con períodos de 9 y 7 días está asociada con variaciones en la corriente de viento solar y con actividad geomagnética. Un comportamiento similar fue observado para las oscilaciones de la densidad de masa termosférica con períodos de 5, 7 y 9 días, que se correlacionaron con periodicidades similares presentes en la velocidad del viento solar y en el índice Kp, **Thayer et al. (2008)**.

Se ha observado que la respuesta ionosférica es diferente a distintas latitudes. **Wang et al. (2011)** encontraron que para períodos de baja actividad solar en latitudes medias la variabilidad ionosférica día a día presenta las mismas periodicidades que el viento solar y el IMF, con períodos de 5, 7, 9 y 13,5 días. En el ecuador geomagnético el período más importante es de 7 días, éste se atribuye al resultado de campos

eléctricos penetrantes ya que se observa el mismo período en IMF. En la región de la anomalía ecuatorial la variabilidad es más complicada, con un período dominante de 9 días presente también en el viento solar. Esta periodicidad también fue observada por Liu et al. (2012), quienes la atribuyen a efectos de las corrientes de alta velocidad.

En este trabajo se investiga la variabilidad día a día o de "bajo nivel" del CET y su relación con las variaciones del viento solar y del IMF para cinco estaciones de la región ecuatorial durante noventa días del año 2008 (día 32 a día 122). La baja actividad solar presentada en este período hace posible no considerar la influencia de la radiación solar.

Del análisis espectral se encontró que la variabilidad del TEC presenta periodicidades de 9, 23-145,5 y 21-22 días durante los días considerados; los dos primeros picos coinciden con lo observado para el viento solar y el índice Kp, mientras que el segundo está presente también en la componente Bz de IMF. La periodicidad de 21-22 días no se observa en el viento solar ni en la actividad geomagnética.

Análisis de datos

Se analizaron datos de TEC obtenidos de las redes: Low-latitude Ionospheric Sensor Network (LISN); Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) y South Andes Project (SAP), para cinco estaciones GPS de la región ecuatorial: Belem Du Para, Maraba, Guajara-Mirim, La Paz y Ancón. Las coordenadas geomagnéticas y geográficas de estas estaciones se muestran en la tabla 1. El período analizado va desde el día 32 al día 122 del año 2008, el cual se caracterizó por una actividad solar muy baja, como se puede ver por los valores que tomó el índice F10.7 (figura 1).

Los datos GPS utilizados tenían una resolución de 10, 15 y 30s dependiendo de la estación, aunque no todos los días contaban con datos completos. En este caso interesa la variabilidad día a día por lo que se consideraron los promedios diarios de los datos, se tuvieron en cuenta solamente los días con más de 18 horas de datos completos y se contaron con por lo menos 85 días de datos para el periodo de estudio en cada estación. Para el análisis espectral se utilizó el periodograma de Lomb-Scargle, Lomb (1976) ya que

Tabla 1: Coordenadas de las estaciones utilizadas, también se indica la red a la que pertenecen.

Ciudad	Código de la estación	País	RED	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)
Ancon	ANCN	Perú	LISN	11°44'00"	77°09'00"
La Paz	LPAZ	Bolivia	SAP	16°29'39"	68°08'51"
Guajara-Mirim	ROGM	Brasil	SIRGAS	10°46'58"	65°20'22"
Belem Du Para	BELE	Brasil	SIRGAS	01°27'00"	48°30'00"
Maraba	MABA	Brasil	SIRGAS	05°22'08"	49°07'04"

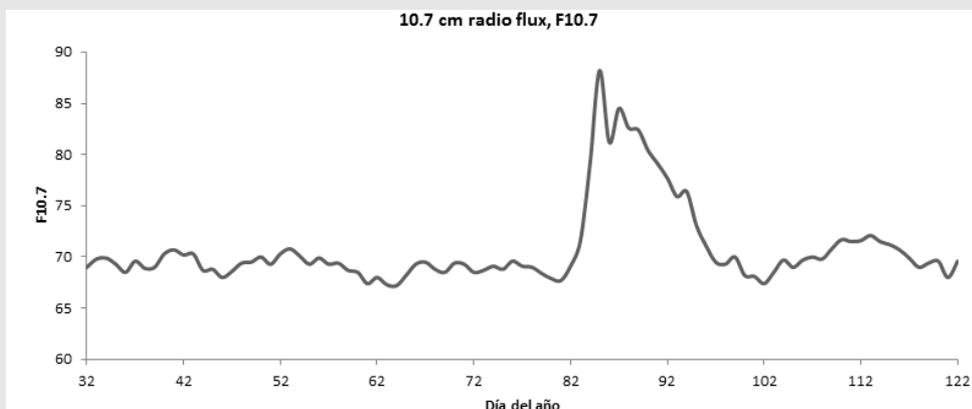


Fig. 1 Índice F10.7 para el período comprendido entre los días 32 y 122 del año 2008.

los datos, como se mencionó anteriormente, estaban distribuidos de forma desigual, **Horne y Baliunas** (1986).

Las condiciones geofísicas se obtuvieron de la base de datos OMNI (<http://omniweb.gdsc.nasa.gov>). Se analizaron las variabilidades día a día de la velocidad de

de viento solar (Sw), la densidad del viento solar (Nn), la componente Bz de IMF, el índice de actividad geomagnética Kp y el índice $F10.7$, desde el día 32 al día 122 en 2008. Los gráficos de los valores promedios diarios de estos parámetros y sus respectivos periodogramas de Lomb-Scargle se muestran en la figura 2.

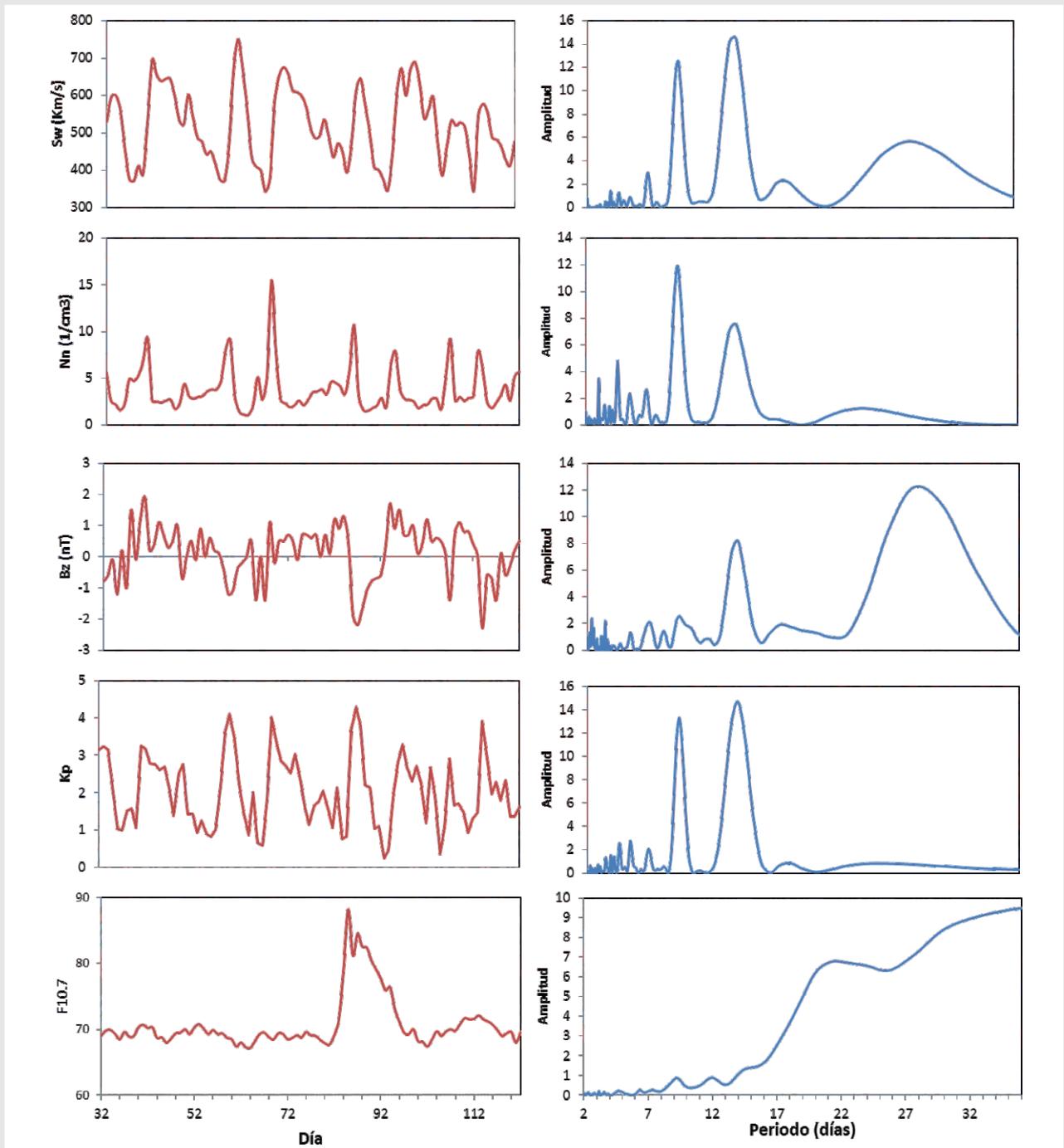


Fig. 2 Variación de la velocidad del viento solar (Sw , Km/s), la densidad del viento solar (Nn , cm^{-3}), la componente Bz de IMF (nT), el índice Kp y $F10.7$ para el período comprendido entre los días 32 y 122 del año 2008 (izquierda) y sus respectivos periodogramas de Lomb-Scargle (derecha).

De los gráficos se observa que los picos en la velocidad del viento solar se producen entre uno y tres días después que los correspondientes a la densidad del viento solar y ambos presentan picos espectrales de períodos de 13,8 y 9 días. Por otro parte, la componente Bz de IMF oscila con amplitudes que varían entre 1 y 4 nT, este comportamiento es característico de las tormentas CIR, **Tsurutani et al. (2006); Guarnieri et al. (2006)**; además, se puede observar un pico espectral de 13,8 días y uno más intenso de 27,6 días.

El índice Kp presenta valores mayores a 3 durante el período estudiado, lo que indica actividad geomagnética moderada. En cuanto al análisis espectral, aparecen picos de 13,8 y 9 días, esto concuerda con lo que se observa para la velocidad y la densidad del viento solar. Finalmente, para F10.7 no se observan picos espectrales con períodos menores a 27 días. En la tabla 2 se resumen las periodicidades presentes en el viento solar, IMF, F10.7 y Kp para los 90 días considerados en este trabajo.

las cinco estaciones utilizadas en el trabajo. Al comparar la variabilidad de los TEC con la de los parámetros geomagnéticos analizados, se observa que el pico espectral de 13-14,5 días también está presente en el viento solar, en IMF y en el índice Kp. Por otra parte, la periodicidad de 9 días se observa, además, para la velocidad y la densidad del viento solar y para Kp.

Finalmente, no se observó ningún pico de 21-22 días para el viento solar, IMF o Kp, lo que sugiere que probablemente esta periodicidad no tiene relación con la actividad geomagnética ni con las condiciones del viento solar. La tabla 3 resume las periodicidades observadas en la variabilidad diaria para los TEC obtenidos de las cinco estaciones GPS ecuatoriales para los 90 días estudiados.

Tabla 2: Picos espectrales presentes en el viento solar (Sw), densidad del viento solar (Nn), componente Bz de IMF, índice Kp y F10.7 durante los 90 días del año 2008 considerados en este trabajo (día 32 a día 122) ordenados según su intensidad relativa.

Parámetro	Período (Días)
Sw (Km/s)	13,8; 9
Nn (cm-3)	9; 13,8
Bz (nT)	27,6; 13,8
Kp	13,8; 9
F10.7	-

Tabla 3: Periodicidad observada en los TEC para las cinco estaciones ecuatoriales estudiadas durante los 90 días del año 2008 (día 32 a día 122). El orden está de acuerdo con la intensidad de los picos espectrales.

Estación	Período (Días)
Belem Du Para	21; 9; 13
Maraba	22; 9; 14,5
Guajara-Mirim	21; 9; 14
La Paz	21; 9; 14
Ancón	21; 13,5; 9

Resultados

En la figura 3 se muestra la variación de los valores promedios diarios de TEC en función del día para el intervalo comprendido entre los días 32 y 122 del año 2008 para cinco estaciones de la región ecuatorial de América (izquierda) junto con sus respectivos periodogramas de Lomb-Scargle (derecha).

Existen periodicidades de 21-22, 9 y 13-14,5 días en



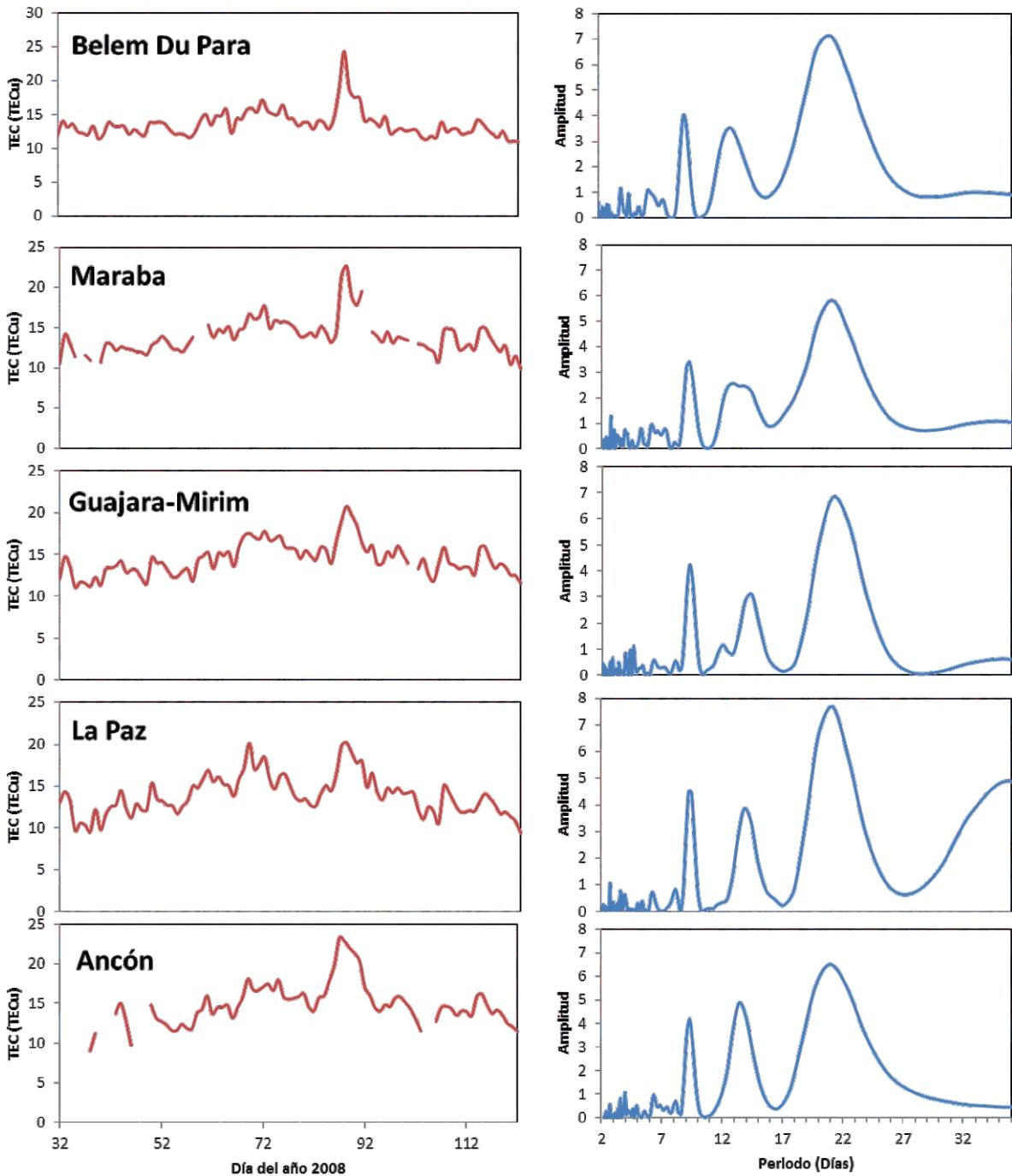


Fig. 3 Valores de TEC (izquierda) y su correspondiente periodograma de Lomb-Scargle (derecha) para las estaciones analizadas (de arriba hacia abajo): Belem Du Para, Maraba, Guajara-Mirim, La Paz y Ancón entre los días 32 y 122 del año 2008.

Discusión y conclusiones

Se ha analizado la variabilidad día a día de los valores promedios diarios de TEC para cinco estaciones GPS de la región ecuatorial para un intervalo de 90 días de baja actividad solar (día 32 a 122 de 2008). El análisis espectral reveló que las variaciones de TEC presentan periodicidades de 9, 13-14,5 y 21-22 días, en todos los casos.

Las periodicidades de 9 y 13-14,5 días también están presentes en el viento solar y en el índice Kp., mientras que sólo el periodo de 13-14,5 días aparece también en la componente Bz de IMF. Esto coincide con lo observado por **Lei et al. (2011)** y **Wang et al. (2011)**. Estas periodicidades sugieren que las variaciones en la velocidad y en la densidad del viento solar son las fuentes más efectivas de variabilidad del TEC en la región ecuatorial durante el periodo considerado.

El origen de estas variabilidades también puede atribuirse a tormentas CIR; el comportamiento de la componente Bz de IMF que oscila rápidamente de norte a sur durante todo el período considerado es una característica de este tipo de eventos, **Tsurutani et al. (1995)**; **Solomon et al. (2012)**. Como resultado, puede suceder que múltiples pulsos de campo eléctrico penetren de manera intermitente debido al corto período de oscilación de Bz, **Gonzales et al. (1979)**; **Kelley et al. (2003)**; **Wei et al. (2008)**. Los vientos ecuatoriales son otro factor importante que contribuye a la variabilidad en esta región, aparte de las influencias pronunciadas de los campos eléctricos.

Según lo mencionado por **Pröls (1995)**, los vientos ecuatoriales dificultan la formación de la anomalía ecuatorial y generan así los efectos negativos de las tormentas ionosféricas en las regiones de la cresta y los efectos positivos en las regiones ecuatoriales.

Para las cinco estaciones estudiadas ocurre un pico espectral de 21-22 días, pero no se observa esta periodicidad en el viento solar, ni en IMF ni en el índice Kp, lo que sugiere que probablemente esta periodicidad no tiene origen en la actividad geomagnética ni en las condiciones del viento solar. Este período puede estar relacionado con efectos meteorológicos, en particular con ondas planetarias que se propagan por la mesósfera y la termósfera provocando perturbaciones en la región de la ionósfera. Por otra parte, esta periodicidad también puede ser consecuencia de interacciones no lineales en el sistema o de otros procesos de origen meteorológico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a los datos brindados por las redes: Low-latitude Ionospheric Sensor Network (LISN); Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) y South Andes Project (SAP). Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por solventar los estipendios de la becaria Gilda González y del becario Hernán Esquivel.

Referencias bibliográficas

- Borovsky, J. E., and M. H. Denton (2006)**, "Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms", *J. Geophys. Res.*, 111, A07508, doi:10.1029/2005JA011447.
- Echer, E., W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, and A. L. C. Gonzalez (2008)**, "Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst \leq 100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006)", *J. Geophys. Res.*, 113, A05221, doi:10.1029/2007JA012744.
- Forbes, J.M., Palo, S., Zhang, X. (2000)**, "Variability of the ionosphere", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 62, 685–693.
- Gonzales, C. A., M. C. Kelley, B. G. Fejer, J. F. Vickrey, and R. F. Woodman (1979)**, "Equatorial electric fields during magnetically disturbed conditions: 2. Implications of simultaneous auroral and equatorial measurements", *J. Geophys. Res.*, 84, 5803–5812, doi:10.1029/JA084iA10p05803.

Guarnieri, F. L., Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Echer, E., Gonzalez, A. L., Grande, M., & Soraas, F. (2006). "ICME and CIR storms with particular emphasis on HILDCAA events." In *ILWS Workshop* (pp. 19-20)

Horne, J.H., Baliunas, S.L. (1986), "A prescription for period analysis of unevenly sampled time series", *Astrophys.J.* 302, 757 – 763.

Kelley, M. C., J. J. Makela, J. L. Chau, and M. J. Nicolls (2003), "Penetration of the solar wind electric field into the magnetosphere/ionosphere system", *Geophys. Res. Lett.*, 30(4), 1158, doi:10.1029/2002GL016321.

Lei, J., Thayer, J.P., Forbes, J.M., Wu, Q., She, C., Wan, W., Wang, W. (2008), "Ionosphere response to solar wind high-speed streams", *Geophys. Res. Lett.* 35, L19105. doi:10.1029/2008GL035208.

Lei, J., Thayer, J.P., Wang, W., McPherron, R.L. (2011), "Impact of CIR storms on thermosphere density variability during the solar minimum of 2008", *Solar Phys.* doi:10.1007/s11207-010-9563-y.

Liu, J., Liu, L., Zhao, B., Wei, Y., Hu, L. and Xiong, B. (2012), "High-speed stream impacts on the equatorial ionization anomaly region during the deep solar minimum year 2008", *J. Geophys. Res.*, 117, A10304, doi: 10.1029/2012JA018015.

Lomb, N.R.: (1976), "Least-squares frequency analysis of unequally spaced data", *Astrophys, Space Sci.* 39,447 – 462.

Prölss, G.W. (1995), "Ionospheric F region storms, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*", vol. 2, edited by H. Volland, pp. 195–248, CRC Press, Boca Ration, Fla.

Rishbeth, H., Mendillo, M. (2001), "Patterns of F2-layer variability", *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 63, 1661 – 1680.

Solomon, S.C., Burns A.G., Emery, B.A., Mlynczak, M.G., Qian, L., Wang, W., Weimer, D.R., Wiltberger, M. (2012), "Modeling studies of the impact of high-speed streams and co-rotating interaction regions on the thermosphere-ionosphere", *J. Geophys. Res.*, 117, A00L11, doi: 10.1029/2011JA017417.

Thayer, J. P., J. Lei, J. M. Forbes, E. K. Sutton, and R. S. Nerem (2008), "Thermospheric density oscillations due to periodic solar wind high-speed streams", *J. Geophys. Res.*, 113, A06307, doi:10.1029/2008JA013190.

Tsurutani, B.T., Gonzalez, W.D., Gonzalez, A.L.C., Guarnieri, F.L., Gopalswamy, N., Grande, M., Kamide., Y., Kasahara, Y., Lu, G., Mann, I., McPherron, R., Soraas, F., Vasylunas V., (2006), "Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review." *J. Geophys. Res.* 111, A07S01. doi:10.1029/2005JA011273.

Vineeth, C., Pant, T.K., Devasia, C.V., Sridharan, R.: 2007, "Atmosphere-ionosphere coupling observed over the dip equatorial MLTI region through the quasi 16-day wave", *Geophys. Res. Lett.* 34, L12102. doi:10.1029/2007GL030010.

Wang, W., Lei J., Burns A. G., Qian L., Solomon S. C., Wiltberger M., Xu J. (2011), "Ionospheric day-to-day variability around the Whole Heliosphere Interval in 2008", *Solar Phys.*274, 457doi: 10.1007/s11207-011-9747-0

Wei, Y., Hong, M., Wan, W., Du, A., Lei, J., Zhao, B., Wang, W., Ren, Z., and Yue, X. (2008), "Unusually long lasting multiple penetration of interplanetary electric field to equatorial ionosphere under oscillating IMF Bz", *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02102, doi:10.1029/2007GL032305.

Xiong, J., Wan, W., Ning, B., Liu, L., Gao, Y. (2006), "Planetary wave-type oscillations in the ionosphere and their relationship to mesospheric/lower thermospheric and geomagnetic disturbances at Wuhan (30.61N,114.51E)", *J.Atmos. Solar-Terr. Phys.* 68, 498 – 508.

El presente trabajo fue realizado en el Laboratorio de Técnicas Satelitales de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT) en Mayo de 2014.

Gilda L. González

Licenciada en Física egresada de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán, estudiante del Doctorado en Ciencias Exactas e Ingeniería perteneciente a la FACET, Becaria del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET) y Docente auxiliar simple de la cátedra de Física de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santo Tomás de Aquino.

E-mail: gildadelourdes@gmail.com

Hernán J. Esquivel

Ingeniero en computación egresado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán, Inscripto en el Doctorado de Ciencias Exactas e Ingeniería perteneciente a la FACET, cuyo tema de tesis es "Estudio del comportamiento de la capa F de bajas y medias latitudes del hemisferio sur", posee una beca interna de finalización de doctorado del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas, Docente Auxiliar Simple en la Cátedra de Laboratorio de Inteligencia Artificial de FACET, Docente auxiliar simple de la cátedra de Física de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Santo Tomás de Aquino, cuenta con varios trabajos presentados en congresos y talleres nacionales e internacionales.

E-mail: hjesquivel@gmail.com