

## UN MODELO DE TUBO DE FLUJO MAGNETICO CILINDRICO PARA LA ANOMALIA MAGNETICA DEL ATLANTICO SUR EN LA REGION DEL PLASMA

*Patricia Alejandra Sallago*

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Paseo del Bosque s/n, 1900, La Plata,  
Argentina. e-mail: pato@fcaglp.unlp.edu.ar

### RESUMEN

La Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAA) es una región del espacio en la que el campo de inducción magnética presenta una distorsión tal que permite el ingreso de partículas cargadas hacia regiones de menor altura. Las mismas provocan reacciones en el plasma de la ionosfera que pueden ser detectadas tanto mediante sondeos ionosféricos como mediante registros de dosaje de radiación. La intensidad de estas reacciones está directamente relacionada tanto con la intensidad de los parámetros del viento solar, como con la intensidad de la actividad solar propiamente dicha. Las perturbaciones geomagnéticas que se registran en la región subyacente presentan peculiaridades tanto en su comportamiento como en la distribución espacial. Se propone un modelo simplificado que represente en forma local al campo de inducción magnética en la región de SAA que se encuentra ocupada por el plasma. Dicho modelo corresponde a un tubo de flujo magnético cilíndrico. El tubo representa localmente al campo de inducción magnética resultante de la superposición entre las contribuciones de origen interno y externo. Con este modelo pueden explicarse las determinaciones de los parámetros físicos realizadas por otros autores (Jayanthi *et al.*, 1997; Mendes da Costa, 2000; Nishino *et al.*, 2002; Trivedi *et al.*, 2005). Su verosimilitud se funda en el hecho de que hayan sido detectadas pulsaciones Pc5 en la región del SAA. Se discuten las posibles configuraciones de los campos para el tubo de flujo magnético. **Palabras clave:** plasmas magnetosféricos-ondas de Alfvén-Anomalía Magnética del Atlántico Sur.

### ABSTRACT

The South Atlantic Magnetic Anomaly (SAA) is a region where the induction magnetic field is distorted in such a way that it allows the injection of charged particles to lower altitude regions. These particles produce reactions in the ionospheric plasma that can be detected by ionospheric records or by measurements of radiation doses. The intensity of those reactions is connected to the intensity of the solar wind parameters, and the intensity of the solar activity also. The geomagnetic perturbations recorded at SAA show a particular behaviour and spatial distribution. It is assumed a model for the induction magnetic field at SAA; let it be a cylindrical magnetic flux tube. Such a tube represents locally the induction magnetic field given by the internal and external contributions to them, in the region of the space that can be considered filled by a plasma. It is possible to explain the behaviour of some physical parameters, recorded and studied by other authors (Jayanthi *et al.*, 1997; Mendes da Costa, 2000; Nishino *et al.*, 2002; Trivedi *et al.*, 2005), using this model. Since some authors have reported the detection of pulsations Pc5 at SAA, the verisimilitude of this model is confirmed. The possible configurations for the cylindrical magnetic flux tube are discussed.

**Keywords:** magnetospheric plasmas-Alfvén waves-South Atlantic Magnetic Anomaly.

## INTRODUCCION

La anomalía magnética del Atlántico sur (SAA) es una región del espacio conocida por su peculiaridad de comportarse como una "zona auroral". Su origen se relaciona con el comportamiento del geodínamo que da sustento al campo geomagnético de origen interno y su presencia distorsiona la distribución de la región de captura de partículas cargadas, constituyendo lo que algunos autores llaman un sumidero para las partículas del cinturón interno de van Allen (Dessler, 1959; Mendes da Costa, 2000).

Por otra parte, es común proponer estructuras del tipo de los tubos de flujo magnético cilíndricos para la descripción de fenómenos dentro de la física de plasmas (Priest, 1982; Roberts, 2004). Su comportamiento es conocido, en la aproximación magnetohidrodinámica (MHD), respecto de las inestabilidades que pueden soportar y las ondas que pueden propagarse en los mismos (Uchida *et al.*, 2001; Petrie *et al.*, 2002; Noble *et al.*, 2003). En un trabajo reciente Sallago y Platzeck (2006) probaron que es posible la propagación de ondas de Alfvén de amplitud finita en tubos de flujo magnético cilíndricos.

Es común proponer modelos locales cuando se estudian fenómenos de pequeña escala relativo al cuerpo en el que tienen lugar. Para ejemplos sobre este caso puede recurrirse al trabajo de Ruderman, (2003) y las referencias allí citadas. Debido a que SAA se comporta como una región auroral es posible modelarla, en la zona del espacio que se encuentra ocupada por un plasma, como un tubo de flujo. Dicho tubo representa localmente al campo de inducción magnética resultante de la superposición de campo de origen interno y externo (Kivelson *et al.*, 1984).

Por otra parte, las pulsaciones magnéticas son perturbaciones del campo geomagnético de origen externo cuyos periodos yacen en

rangos del orden de 0.1 a 100 segundos. Se considera como una posible fuente de las pulsaciones magnéticas a la propagación de ondas de Alfvén en el campo de inducción magnética terrestre (Hasegawa, 1971). Varios autores han estudiado este problema pero han partido de un sistema de ecuaciones linealizadas y un desarrollo en ondas monocromáticas para las perturbaciones (Bellan, 1996 a). Además, algunos autores (Kivelson y Southwood, 1985, 1986; Nosé *et al.*, 1995) explican el origen de las pulsaciones observadas en la magnetósfera mediante el concepto de resonancia. Sin embargo, tal resonancia en la MHD ideal, es un resultado matemático artificial (Bellan, 1996 b); esto proviene del hecho contradictorio de encontrar perturbaciones cuyas amplitudes tienden a infinito en una región, cuando se ha partido de un sistema de ecuaciones linealizadas y un desarrollo en ondas monocromáticas para las perturbaciones. En lugar del mencionado procedimiento, Sallago y Platzeck (2000) hallaron las soluciones del sistema de ecuaciones siguiendo una metodología desarrollada anteriormente cuando los campos de fondo dependían espacialmente de una variable cartesiana. Luego de probar la propagación de ondas de Alfvén en forma teórica, Sallago (2004) consideró la posibilidad de aplicación del modelo para explicar el origen de las Pc5, teniendo en cuenta la viabilidad de las aproximaciones para el caso, principalmente que para las perturbaciones de baja frecuencia puede aplicarse MHD, en especial para las perturbaciones de Alfvén. El modelo simplificado que se tomó para simular el problema está constituido por un plasma conductor perfecto, totalmente ionizado, para el que es suficiente considerar la ley de Ohm simple. Debajo de la ionósfera se encuentra la atmósfera que es un gas neutro; al arribar las distintas perturbaciones a esta discontinuidad, las ondas de Alfvén generan ondas electromagnéticas de baja frecuencia que se

propagaran con distinta velocidad, pero con las mismas características en cuanto a polarización, que la de las ondas que les dieron origen (Kelley, 1989). Aplicando estos resultados se explicaron las pulsaciones geomagnéticas Pc5 (Sallago, 2004) que habían sido analizadas en otro contexto por otros autores (Schott *et al.*, 1998; Baishev *et al.*, 2000; Kleimenova *et al.*, 2002; Pilipenko *et al.*, 2002).

Resumiendo: se conoce el comportamiento peculiar de SAA debido a mediciones, ya sea de perfiles ionosféricos, de densidad de partículas precipitadas, dosaje de radiación y detección de pulsaciones Pc5 en la región subyacente.

a- Se observa un flujo de partículas enfocado hacia una región delimitada del espacio por lo que puede considerarse confinamiento.

b- El dosaje de radiación e intensidad de ruido de radio se incrementa hacia el interior de la región de SAA, esto da lugar a que pueda considerarse tanto la aceleración de cargas como el fenómeno de interacción onda-partícula.

c- Los fenómenos observados en SAA han sido descritos desde hace más de cuarenta años por lo que puede considerarse que SAA es una estructura estable.

d- Las pulsaciones Pc5 reportadas por Trivedi *et al.* (2005), ondas hijas de las ondas de Alfvén que se propagan en el plasma, inducen a considerar para SAA una estructura del tipo tubos de flujo magnético cilíndrico.

En el presente trabajo se propone que las fuentes de origen interno del campo geomagnético en la zona del SAA y las de origen externo, tales como la corriente efectiva producida por la deriva de partículas del cinturón de van Allen, constituyen un tubo de flujo magnético cilíndrico en la región del espacio que puede considerarse ocupada por un plasma. Las determinaciones anteriormente mencionadas dan fundamento al modelo propuesto para SAA en la región del plasma.

Con esta propuesta pueden explicarse tanto las observaciones satelitales y registros terrestres de los parámetros físicos del plasma, realizados por otros autores, como el hecho de haberse registrado pulsaciones Pc5 en la región subyacente reportadas por Trivedi *et al.* (2005), ya que estas últimas han sido explicadas como ondas hijas de las ondas de Alfvén que se propagan en el plasma (Sallago, 2004), ondas de Alfvén que se ha probado que pueden propagarse en tubos de flujo (Sallago y Platzek, 2006). Se discuten diferentes tipos de configuraciones para los campos del tubo de flujo magnético cilíndrico.

### **MODELO DEL TUBO DE FLUJO MAGNETICO CILINDRICO PARA SAA**

En esta sección se realiza el análisis del modelo del tubo de flujo magnético. Para facilitar su posterior comparación con los parámetros medidos y registrados por otros autores, se considerará el estudio del movimiento de las partículas cargadas dentro del mismo utilizando la teoría de órbitas (Rossi y Olbert, 1970). Sea un sistema de coordenadas cilíndricas ( $r, \phi, z$ ), con  $z$  que apunta en la dirección exterior a la tierra y es paralelo al eje de un cilindro de radio  $a$ . Consideremos una partícula cargada que se mueve en un plasma eléctricamente neutro. En presencia de un campo de inducción magnética de fondo no uniforme experimentará desviaciones de su trayectoria comúnmente llamadas derivas. Ellas son las derivas de gradiente  $|\mathbf{B}|$  y de curvatura de las líneas  $\mathbf{B}$ , que establecen corrientes en el plasma neutro. Dichas corrientes son: la corriente de magnetización, de gradiente y de curvatura (Chandrasekhar, 1962).

Además, si las partículas se mueven en un ambiente en el que se propagan ondas electromagnéticas, las partículas experimentarán una deriva adicional en la dirección de

propagación de la onda. En particular, cuando las ondas que se propagan son tales que su campo eléctrico presenta una variación espacial de la intensidad, las partículas experimentarán una aceleración que, en el caso de ondas planas puede expresarse como

$$\langle \ddot{\mathbf{r}} \rangle = - (e / 2 m \omega)^2 E_w^2(0),$$

donde  $m$ ,  $\omega$ ,  $E_w(0)$  son la masa de la partícula, la frecuencia de la onda y la amplitud del campo eléctrico de la onda evaluado en la posición media de la partícula (Boyd y Sanderson, 1969). De la teoría electromagnética se sabe que las cargas aceleradas emiten radiación, sin embargo este efecto no puede analizarse bajo la teoría de órbitas (Goldston y Rutherford, 1995). El efecto resultante es la atenuación de la onda.

Para el modelo de tubo de flujo cilíndrico se propone que el campo de inducción magnética de fondo sea de forma tal que como resultado se esté en presencia de un pinch magnético que confina el plasma. Además se propone que el plasma en estado estacionario se encuentre en equilibrio si satisface que la presión total, suma de la presión del plasma más la magnética, sea constante. Esta condición puede darse en un tubo de flujo magnético cilíndrico en el que se propagan ondas de Alfvén.

### PROPAGACION DE ONDAS DE ALFVEN EN EL PLASMA NO UNIFORME DEL MODELO PARA SAA

Uno de los fenómenos que caracteriza a SAA es la detección en las estaciones geomagnéticas de pulsaciones del tipo Pc5. Estas últimas han sido explicadas como ondas hijas de las ondas de Alfvén que se propagan en el plasma (Sallago, 2004). Se ha probado anteriormente que las ondas de Alfvén de gran amplitud pueden propagarse en tubos de flujo

magnético cilíndrico (Sallago y Platzek, 2006). En esta sección se muestra el procedimiento por el cuál se obtienen las soluciones de la MHD para las ondas de Alfvén en plasmas no uniformes, realizado por Sallago y Platzek (2006), cuando los campos de fondo del tubo de flujo magnético cilíndrico variaban con una sola variable. Se propone que la densidad de fondo  $\rho_0(r)$ , la presión del plasma  $p_0(r)$ , la velocidad del plasma  $\mathbf{V}_0 = V_{0\phi}(r) \mathbf{e}_\phi + V_{0z}(r) \mathbf{e}_z$ , y el campo de inducción magnética  $\mathbf{B}_0 = B_{0\phi}(r) \mathbf{e}_\phi + B_{0z}(r) \mathbf{e}_z$ , dependan sólo de  $r$ . Dicho tubo representa localmente al campo de inducción magnética resultante de la superposición de campo de origen interno y externo (Kivelson *et al.*, 1984).

Los campos de fondo deben satisfacer, además de la condición de equilibrio, una condición adicional que permite la propagación de ondas de Alfvén en el plasma, tal condición puede expresarse como que la componente acimutal de la velocidad de grupo de las ondas de Alfvén debe anularse. La característica más destacable de las ondas de Alfvén en plasmas de fondo uniformes es que se propagan sin deformarse con una velocidad de grupo paralela al campo de inducción magnética de fondo en el sistema de referencia en que el plasma se encuentra localmente en reposo, las perturbaciones son incompresibles, existe una relación entre las perturbaciones en velocidad y campo de inducción magnética, y la perturbación en presión total es nula en la región de perturbación. La metodología desarrollada anteriormente para el caso en que los plasmas de fondo varían en una dirección rectilínea consiste en no linealizar el sistema de ecuaciones de la MHD y pedir que las perturbaciones sigan satisfaciendo las características que presentaban las ondas de Alfvén cuando los campos de fondo son uniformes. De esta manera, se pide que las perturbaciones satisfagan las siguientes condiciones:

1-Las perturbaciones en densidad, presión del plasma, velocidad y campo de inducción magnética sean funciones de  $r'=r - V_A(r) t$ , donde  $V_A = B_0 / (4 \pi \rho)^{1/2}$  es la velocidad de grupo de las ondas de Alfvén.

2-La perturbación es incompresible:

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}_1 = 0.$$

3-La perturbación en presión total es nula:

$$P_1 = 0.$$

4-Las perturbaciones en velocidad y campo de inducción magnética se relacionan:

$$\mathbf{V}_1 = - \mathbf{B}_1 / (4 \pi \rho)^{1/2} + \alpha,$$

donde  $\rho$  es la densidad total y  $\alpha$  es un vector que debe anularse tanto si los campos de fondo son uniformes como si no hay perturbación.

Se encuentra que existen dos tipos de soluciones, una con  $B_1 r = 0$  y otra que indica que  $\alpha$  debe ser invariante en la dirección de  $dV_{AZ}/dr$ . Si  $B_1 r = 0$ , las ondas de Alfvén pueden propagarse con las mismas características que en campos de fondo uniformes. Si  $B_1 r \neq 0$ , todas las cantidades perturbadas se calculan a partir del valor de las perturbaciones en campo de inducción magnético. En conclusión, es posible la propagación de las ondas de Alfvén en campos de fondo no uniformes, con la configuración propuesta, si todas las cantidades perturbadas son invariantes en la dirección de variación de la velocidad de grupo. Esta invariancia es necesaria para que las ecuaciones de la MHD no dejen de satisfacerse debido a la variación de  $V_{AZ}$  con el tiempo.

## DETERMINACIONES DE OTROS AUTORES

Las determinaciones mencionadas a continuación dan fundamento al modelo propuesto para SAA en la región del plasma. Gran cantidad de autores reportan aumento en el número de partículas precipitadas en la región del SAA, ya sea en durante tormentas geomagnéticas como en tiempos geomagnéticos calmos (Mendes da Costa, 2000). Las

referencias en ese trabajo dan cuenta del estado actual del estudio del tema. Con respecto a la radiación, los estudios abarcan un amplio rango en alturas: mediciones por globo Jayanthi *et al.*, (1997) (realizadas en Cachoeira Paulista), satelitales y terrestres en la región del SAA (Nishino *et al.*, 2002). Asimismo, el incremento en la intensidad de la radiación en la zona se ha conocido desde el tiempo del SKYLAB, debiendo considerarse sistemas de protección para equipos (Heirtzler, 2002), llegándose a realizar las mediciones por fuera de la zona del SAA como en el caso de los instrumentos NINA (altura orbital 830 km) NINA-2 (altura orbital 450km), a bordo de los satélites Resus-01-N4 y MITA respectivamente (Bidoli *et al.*, 2002), o apagando los sistemas como en el caso del telescopio espacial HUBBLE (altura orbital 600km) (Zwintz *et al.*, 1999).

Además, Nishino *et al.* (2002) muestran un registro del incremento del ruido de radio durante una perturbación geomagnética asociada con un fenómeno de precipitación de partículas (determinaciones realizadas en INPE, cercano a Santa María). Trivedi *et al.* (2005) han reportado pulsaciones geomagnéticas del tipo Pc5 en la región del SAA, en los registros de las estaciones Sao Marino da Serra y Ji-Parana, en particular para el 8 de noviembre del 2000. Estas pulsaciones pueden interpretarse como ondas generadas por las ondas de Alfvén de gran amplitud que se propagan por el tubo de flujo magnético cilíndrico al llegar a la interfase con la atmósfera (Sallago, 2004).

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se muestra que un modelo válido para SAA, en la región que se encuentra ocupado por el plasma, es el de una configuración de campos de fondo tal que resulte en tubo de flujo magnético cilíndrico. Además, con la configuración de tubo de flujo

magnético cilíndrico se puede explicar el comportamiento reportado por las mediciones de los autores mencionados en este trabajo, tanto en lo relativo al aumento de la densidad de partículas precipitadas como al incremento en el dosaje de radiación o incremento del ruido de radio.

En un tubo de flujo magnético cilíndrico del tipo pinch, la corriente acimutal generada por las partículas precipitadas contribuye al campo de inducción magnética axial, en el que se propagan los paquetes de ondas de Alfvén que dan origen a las pulsaciones Pc5 en la región subyacente. Sin embargo, un ajuste del modelo teórico es conveniente pues deben considerarse tanto la fuerza de gravedad como una configuración de campo de inducción magnética de fondo más compleja.

## REFERENCIAS

- Baishev, D.G., E.S. Barkova, S.I. Solovyev, K. Yumoto, M.J. Engebretson and A.V. Koustov, 2000. Formation of large-scale "giant" undulation at the equatorial boundary of diffuse aurora, y Pc5 magnetic pulsations during the January 14, 1999 magnetic storm; Proc. 5th International Conference of Substorms, St. Petersburg, Rusia, 16-20 Mayo 2000, 427-430 (ESASP-443, Julio 2000).
- Bellan, P.M. 1996 (a). New model for ULF Pc5 pulsations: Alfvén cones, *J. Geophys. Res.* 23, 1771-1720.
- Bellan, P.M. 1996 (b). Mode conversion into non-MHD waves at the Alfvén layer: The case against the field line resonance concept, *J. Geophys. Res.* 101, 24887-24898.
- Bidoli, V., M. Casolino, M.de Pascale, G.Furano, A. Iannucci, A. Morselli, P. Picozza, R. Sparvoli, A. Bakaldin, A. Galper, S. Koldashov, M. Korotkov, A. Leonov, V. Mikhailov, S. Voronov, M. Boezio, V. Bonvicini, A. Vacchi, G. Zampa, N. Zampa, M. Ambriola, F. Cafagna, M. Circella, C. de Marzo, O. Adriani, P. Papini, P. Spillantini, S. Straulino, E. Vannuccini, M. Ricci and G. Castellini. 2002. Energy spectrum of secondary protons above the atmosphere measured by the instruments NINA and NINA-2, *Annales Geophysicae*, 20, 1693-1697.
- Boyd, T.J.M. and J.J. Sanderson. 1969. *Plasma Dynamics*, Thomas Nelson and Sons Ltd., Great Britain.
- Chandrasekhar, S. 1962. *Plasma Physics*, The University of Chicago Press, Chicago.
- Dessler, A.J., 1959. *J. Geophys. Res.* 64, 713-719.
- Goldston, R.J. and P.H. Rutherford. 1995. *Introduction to Plasma Physics*, Institute of Physics Publishing, London.
- Hasegawa, A. 1971. Plasma Instabilities in the Magnetosphere, *Reviews of Geophys. and Space Phys.*, 9, 703-772.
- Heirtzler, J.R. 2002. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 64, 1701-1708.
- Jayanthi, U.B., M.G. Pereira, I.M. Martin, Y. Stozkov, F.M. D'Amico and T. Villela. 1997. Dynamic Current Injection into Magnetic Loops in Active Regions, I. Supplies of Energy and Mass to Active-Region Corona in the Form of Dynamic Loop Brightenings. *J. Geophys. Res.* 102, 24069-24073.
- Kelley, M.C. 1989. *The Earth's ionosphere*, Plasma Physics and Electrodynamics, International Geophys. Series, 43, Academic Press Inc., CA, USA.
- Kivelson, M.G. and D.J. Southwood. 1985. Resonant ULF waves: A new interpretation, *Geophys. Res. Lett.*, 12, 49-52.
- Kivelson, M.G. and D.J. Southwood. 1986. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances, *J. Geophys. Res.*, 91, 4345- 4351.
- Kivelson, M. G., J. Etcheto and J. G. Trotignon. 1984. Global, compressional oscillations of the terrestrial magnetosphere: the evidence and a model; *J. Geophys. Res.* 89, 9851-9856.
- Kleimenova, N.G., O.V. Kozyreva, J.J. Schott, M. Bitterly, J. Bitterly and P. Ivanova. 2002. Dayside geomagnetic Pc5 pulsations in the conditions of a strongly disturbed solar wind during the magnetic storm of 21 February 1994; *Inter-national Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 3, 3, publicación online (<http://>

- /ijga.agu.org/v03/gai99328/gai99328.html).
- Mendes da Costa, A. 2000. Indirect determination of the energy spectra of particles precipitated in the lower ionosphere associated with solar proton events. *Geofísica Internacional* 39, 13-19.
- Nishino, M., K. Makita, K. Yumoto, F.S. Rodrigues, N.J. Schuch and M.A. Abdu. 2002. Unusual ionospheric absorption characterizing energetic electron precipitation into the South Atlantic Magnetic Anomaly, *Earth Planets Space*, 54, 907-916.
- Noble, M.W., Z.E. Musielak and P. Ulmschneider. 2003. Torsional magnetic tube waves in stellar convection zones. I. Analysis of wave generation and application to the Sun, *Astronomy and Astrophysics*, 409, 1085-1095.
- Nosé, M., T. Iyemori, M. Sugiura and J.A. Slavin. 1995. A strong dawn/dusk asymmetry in Pc5 pulsations occurrence observed by DE-1 satellite, *J. Geophys. Res.* 22, 2053-2056.
- Petrie, G.J.D., C. Gotikakis, H. Dara and K. Tsinganos. 2002. en Proc. 10Th. European Solar Physics Meeting, 'Solar variability: from core to outer frontiers', Prague. Czech. Rep. 9-14 september 2002 (ESA SP-506), 713.
- Pilipenko, V.A., O.V. Kozyreva, M.J. Engebretson, D.L. Detrick and S.N. Samsonov. 2002. Dynamics of long-period magnetic activity and energetic particle precipitation during the May 15, 1997 storm; *J. Atmos. Terr. Phys.*, 64, 831-843.
- Priest, E.R. 1982. *Solar Magnetohydrodynamics*, D. Reidel, Norwell, Mass.
- Roberts, B. 2004. en Proc. of SOHO 13, 'Waves, oscillations and small-scale transient events in the solar atmosphere: Joint view from SOHO and TRACE', Palma de Mallorca, Balearic Islands, Spain, 29 september- 3 october, 2003 (ESA SP-547), 1-24.
- Rossi, B. and S. Olbert. 1970. *Introduction to the physics of space*, McGraw-Hill, New York.
- Ruderman, M. S. 2003, en "Turbulence, Waves and Instabilities in the Solar Plasma" NATO Science Series, edited by R. Erdelyi 239.
- Sallago, P.A. and Platzcek, A.M. 2000. Alfvén waves and wings in nonuniform plasmas, *J. Geophys. Res.* 105, 27393-27400.
- Sallago, P.A. 2004. Ondas de Alfvén como fuente de pulsaciones geomagnéticas 1- Pulsaciones aurorales. Actas de la XXII Reunión de la Asociación Argentina de Geofísica y Geodesia, (Buenos Aires).
- Sallago, P.A. and Platzcek, A.M. 2006. Large-amplitude Alfvén waves in cylindrical magnetic flux tubes, *J. of Plasma Physics*, 72, 5, 625-633.
- Schott, J.J., N.G. Kleimenova, J. Bitterly and O.V. Kozyreva. 1998. The strong Pc5 geomagnetic pulsation in the initial phase of the great magnetic storm of March 24, 1991; *Earth Planets Space*, 50, 101-106.
- Trivedi, N.B., B.M. Pathan, N.J. Schuch, M. Barreto and L.G. Dutra. 2005. *Adv. in Space Res.* 36, 2021-2024.
- Uchida, Y., T. Miyagoshi, T. Yabiku, S. Cable and S. Hirose. 2001. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 53, 331.
- Zwintz, K., R. Kuschnig, W.W. Weiss, R.O. Gray and H. Henker. 1999. Hubble Deep Field guide star photometry, *Astron. Astrophys.* 343, 899-903.