

## EFECTOS DE LAS ONDAS DE CHOQUE EN LOS REGISTROS DIGITALES DE TRELEW

*Julio César Gianibelli<sup>1</sup>, Nicolás Quaglino<sup>2</sup> y Mónica Mac William<sup>3</sup>*

<sup>1,2,3</sup> Dep. de Geomagnetismo y Aeronomía de la Fac. de Cs. Astronómicas y Geofísicas, UNLP.

<sup>1</sup> E-mail: geofisicogianibelli@yahoo.com.ar - TE: (0221)4236593/4 int 132

### RESUMEN

Un aspecto importante en la conexión Sol-Tierra son los eventos de eyección de masa coronal y su relación con las ondas de choque que producen. Diversas constelaciones de sondas patrullan la cavidad magnetosférica y el espacio interplanetario. Entre ellas la sonda ACE (Advanced Composition Explorer) a 235  $R_e$ , sonda SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) a 220  $R_e$ , sonda WIND a 100  $R_e$  y en la cavidad magnetosférica, las sondas Inball, Polar y Geotail, entre otras, cubriendo la región menor a 10  $R_e$ . En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al comparar los registros magnéticos del Observatorio digital de Trelew (TRW, Lat.: -43°.3; Long.: 294° .7), miembro de la Red Intermagnet, con las observaciones de los procesos de onda de choque detectados por las sondas ACE y SOHO.

Las variables, velocidad y densidad de partículas del viento solar, son los elementos que se comparan en cada evento (de confiabilidad del 90 %), con los registros de la Intensidad Total del Campo Magnético registrado en Trelew.

Los resultados muestran que los efectos geomagnéticos presentan confirmación cuando la densidad y la velocidad de las partículas provenientes del Sol tienen un crecimiento brusco que originan una onda de choque, detectable por el grupo de sondas, y producen tormentas magnéticas de magnitudes importantes. Como referencia se tienen las tormentas magnéticas ocurridas en enero 6-11 de 1997 y enero 20-23 de 2005, las que se compararon con los registros de densidad y velocidad del viento solar.

Se concluye que la ubicación del observatorio permanente de Trelew es importante como control y confiabilidad de los procesos de onda de choque y su efecto en superficie del acoplamiento viento solar-magnetósfera.

**Palabras clave:** Sol, Onda de Choque, Viento Solar, Observatorio Magnético, Geomagnetismo.

### ABSTRACT

A very important aspect in the Solar-Terrestrial connection are the coronal mass ejection events and their relationship with the shock waves they produce. Several spacecrafts patrol the magnetospheric cavity and the interplanetary space. Among these the ACE (Advanced Composition Explorer) sonde at a distance of 235 Earth's radii ( $R_e$ ), the SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) at a distance of 220  $R_e$ , the WIND (from Solar Wind) at 100  $R_e$ , and in the magnetospheric cavity the Inball, Polar (for Polar Region) and Geotail (for Geomagnetic Tail) sondes, and others, covering a region within the 10  $R_e$ .

In this work we present the obtained results when compare the digital record of the Trelew Magnetic Observatory (TRW, Lat.: -43° .3; Long.: 294° .7), member of INTERMAGNET Net, with the measurements of shock wave processes detected by the sondes ACE and SOHO. The variables velocity and particle density of the solar wind, are the elements compared in each event (that have a 90% of confidence), with the digital records obtained in the Magnetic Observatory of Trelew.

The results shows that, when the velocity and particle density coming from the Sun and detectable by these sondes presents a sudden increment, the geomagnetis effects presents confirmation, and produce geomagnetic storms of considerable magnitude. As a reference it is have the geomagnetic storms occurred

in the dates 6-11 January of year 1997, and 20-23 January of year 2005, which are compared with the records of solar wind velocity and density.

It is concluded that the location of Trelew Observatory is important as a control and confidence of the shock wave processes and their effect in the Earth's surface of the Solar Wind-Magnetosphere coupling.

**Keywords:** Sun, Shock wave, Solar wind, Magnetic Observatory, Geomagnetism.

## INTRODUCCION

La conexión entre el Sol y la Tierra tiene procesos electrodinámicos y magneto-hidrodinámicos propios, que al interactuar desarrollan en los sistemas creados por el hombre y su entorno impactos ambientales que modifican su adaptabilidad. En este trabajo se analizan los resultados de tormentas geomagnéticas registradas en el Observatorio Magnético de Trelew y los datos en diferentes escalas temporales, de los parámetros provenientes del Viento Solar, para corroborar efectos de las ondas de choque provocadas por eyecciones de masa coronal.

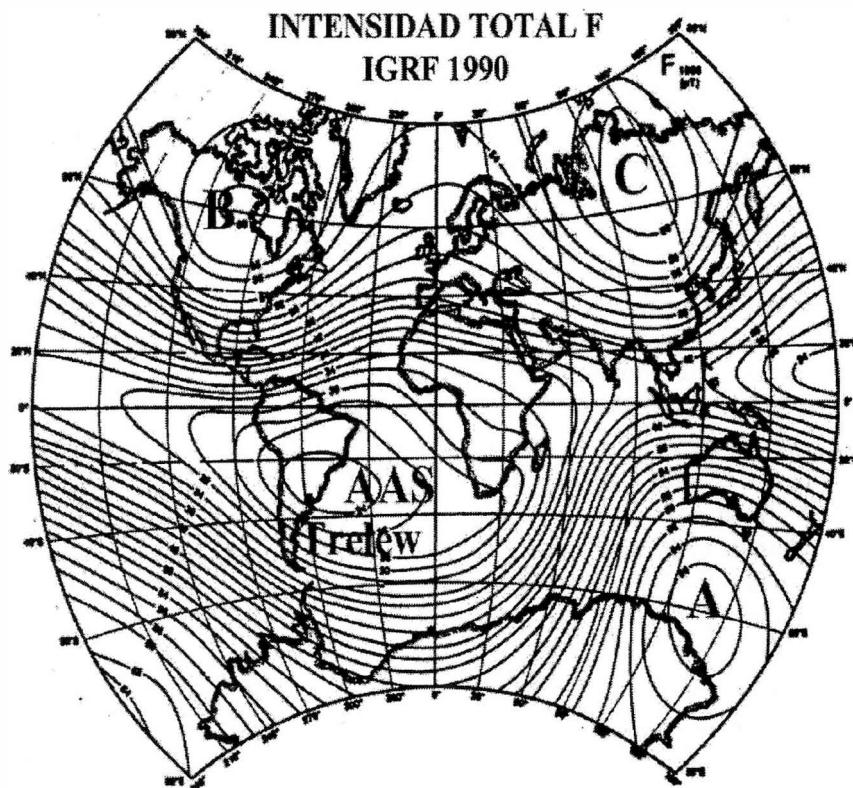
El Observatorio Magnético de Trelew (TRW, Lat.:  $-43^{\circ}.3$ ; Long.:  $294^{\circ}.7$ ) está situado en la región del sistema de corrientes ionosféricas equivalentes del Hemisferio Sur. Estas oscilan, intensificando en verano y disminuyendo en invierno su intensidad. Las variaciones diurnas regulares de los elementos geomagnéticos y en particular la Intensidad Total F del Campo Geomagnético registrada en Trelew muestran estos efectos, en especial en días calmos.

En la Figura 1 podemos observar las isolíneas de la Intensidad Total F para 1990.0, confeccionadas con el modelo IGRF (International Geomagnetic reference Field, Campo Geomagnético Internacional de Referencia) para esa época y donde claramente aparecen las expresiones de la máxima intensidad F en las regiones A (Austral) y B (Boreal) de las posiciones de los Polos Geomagnéticos, y una tercera región C, donde se vislumbra la aparición de efectos no-dipolares importantes en superficie, y que

el modelo IGRF los presenta evolutivamente cada 5 años al actualizar sus coeficientes. También se observa una gran anomalía de valores mínimos de F. Su foco está ubicado en la región que cubre el Océano Atlántico Sur, Sudamérica y África, y parte del Océano Pacífico. Se la denomina Anomalía del Atlántico Sur (AAS), y junto con Trelew (TRW), otros Observatorios importantes controlan su evolución. Estos son los Observatorios Magnéticos de Pamatai (PPT) en el Océano Pacífico, Huancayo (HUA) en Perú, Las Acacias (LAS) en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, Vasouras (VSS) en Brasil, Hermanus (HER) en Sud África. Por lo tanto el Observatorio Geomagnético de Trelew posee la propiedad de registrar los efectos estacionales del sistema de corrientes equivalentes de la Ionósfera, el efecto del decrecimiento de la Intensidad Total F del Campo Magnético interno de la Tierra y procesos de menor intensidad de inducción oceánica por estar próximo al Océano Atlántico.

Trelew inicia sus registros en septiembre de 1957 funcionando ininterrumpidamente el presente. En 1993 sus registros se transforman en digitales de alta resolución temporal y en el año 2000 ingresa en la Red INTERMAGNET.

Las perturbaciones que reflejan la intensificación de las ondas de choque, producto del flujo particulado del Sol, que denominamos Viento Solar, se traducen en las llamadas tormentas magnéticas. Un aspecto importante es observado con el crecimiento industrial en el Hemisferio Norte, debido a que el Polo Norte Magnético se encuentra en la



**Figura 1.** Mapa de isolíneas para 1990.0 basada en el Campo Geomagnético Internacional de Referencia obtenido a partir de un desarrollo en esféricos armónicos hasta el orden 10. Se marcan las regiones más importantes A: Polo Geomagnético Austral; B: Polo Geomagnético Boreal; C: máximo secundario; AAS: Anomalia del Atlántico Sur, con un valor mínimo de 24000 nT, donde se marca la ubicación del Observatorio Magnético de Trelew.

región canadiense, mientras que el Polo Sur Magnético se halla en el Sur del Océano Indico (Fig. 1), donde las tormentas magnéticas manifiestan su intensificación en ambos. Su efecto inductivo en la región del polo norte, donde las corrientes alineadas con el campo y el efecto chorro polar producto de la acción colectiva de las partículas, generan sistemas de corrientes equivalentes muy intensas, (Sonkowsky *et al.*, 1996), que perturban por inducción los sistemas de suministro de energía eléctrica, y producen corrientes parásitas en las redes eléctricas, gasoductos y oleoductos.

Las ideas sobre crucpición y eyeccciones de masa provenientes del Sol son más antiguas que el conocimiento del Viento Solar y la actual

observación de las eyeccciones de masa coronal es por medio de los coronógrafos montados en las sondas y satélites. Lindemann (1919) es quien realiza los primeros comentarios sobre la asociación entre varias formas de la actividad solar observada en aquella época y las tormentas geomagnéticas. Es el primero en sugerir que las tormentas geomagnéticas son el producto de la interacción de las eyeccciones transitorias de plasma solar que impacta con el Campo Magnético Terrestre; con un retraso de varios días después de su emisión. Cocconi *et al.* (1958) y Piddington (1958) indican que las eyeccciones de material solar arrastran estructuras magnéticas con alta conductividad hacia el espacio interplanetario,

indicando implícitamente el congelamiento de las líneas de campo. Desde 1958 hasta la actualidad se han realizado una gran cantidad de aportes científicos significativos, quedando plasmados en los trabajos de Pröls (2004), Kallenrode (2004) y Aschwanden (2006).

El Sol, tiene dos formas de pérdida de masa, la primera es a través del Viento Solar que fluye en estado estacionario y las eyecciones esporádicas de grandes estructuras de plasma llamadas eyecciones de masa coronal (EMC). Los valores del Viento Solar que fluyen de los agujeros coronales es de aproximadamente  $2 \times 10^{-10}$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y de menos de  $4 \times 10^{-11}$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) en las regiones activas. El fenómeno de EMC ocurre con una frecuencia de pocos eventos diarios eyectando una masa del orden de  $10^{14}$ - $10^{16}$  gr lo cual es una pérdida de masa de  $2 \times 10^{14}$  a  $2 \times 10^{12}$  ( $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), menos que el 1% de la pérdida de masa por el viento solar eyectado de los agujeros coronales o del orden del 10% de la masa eyectada en las regiones activas. Una eyección de masa coronal es una estructura dinámica que envuelve un plasma que se propaga expandiéndose y llevando congelado un campo magnético desde el Sol al espacio interplanetario contenido en la heliosfera (Aschwanden, 2006). Klinchuck (2001) explica, en un sentido fácil de interpretar, que EMC es material supercalentado que fluye del Sol a muy alta velocidad. El tamaño de una EMC estimado transversalmente puede cubrir desde fracciones hasta más que un radio solar, con velocidades del plasma del orden  $V_{EMC} \approx 10^2 - 2 \times 10^3$  ( $\text{km/s}$ ). El consenso general de los investigadores es relacionar las EMC con la descarga de energía magnética en la corona solar a pesar que los intensos flares solares no conllevan asociados EMC en el 40 % de los casos (Aschwanden, 2006).

Klinchuck (2001) presenta como posibles diferentes formas de producción de las EMC: A) Explosión térmica; B) Procesos de dínamo; C) eyección por carga de masa; D) Corte de

las ataduras, ruptura y proceso de descarga (eyección); E) Proceso de tensión excesiva, ruptura de las ataduras y proceso de descarga.

Las EMC que transitan en el ambiente interplanetario se encuentran además con el viento solar, tienen velocidades que están dentro de un amplio rango de variabilidad, e implicando también una interacción con el Viento solar. Las que tienen bajas velocidades tienden a retardar al Viento Solar, pero éste las arrastra, y entonces son aceleradas. Por el contrario las EMC con velocidad mayor que la del viento solar, lo barren y desarrollan en su frente una onda de presión que puede convertirse, si las condiciones son favorables, en una onda de choque. Las EMC que son eyectadas con muy altas velocidades son las que desarrollan perturbaciones compresivas dentro del medio interplanetario, y se propagan a través de él.

Dos perturbaciones  $u_1$  y  $u_2$  transitan el viento solar, la primera comprime y calienta el plasma a medida que recorre el medio, dejando detrás de ella plasma recalentado. La perturbación siguiente atravesará este plasma con una velocidad que es mayor que la correspondiente a la primera, debido a que el plasma se ha calentado y la velocidad del sonido se ha incrementado. Por lo tanto, la segunda perturbación alcanza a la primera sin poder pasarla, debido a que el plasma que está adelante está más frío y por ende es frenada. Las sucesivas perturbaciones se apilan sucesivamente formando una región límite. Gradualmente este apilamiento de perturbaciones crece. La superposición de una gran cantidad de pequeñas perturbaciones tiende a una gran perturbación. El perfil de la velocidad local se hace cada vez más empinado hasta que se disipa la energía puesta en esta región (Wimmer-Schweingruber, 2005). Los procesos de disipación pueden ser por conducción de calor, conductividad, viscosidad, o dispersión, que producen características diferentes en las ondas de choque.

## ANÁLISIS DE LOS DATOS Y RESULTADOS

Para este estudio se seleccionaron dos tormentas geomagnéticas vinculadas a EMC registradas mediante el sistema digital instalado en 1993 en el Observatorio Magnético de Trelew. La primera corresponde a las perturbaciones de los días 6-11 de enero de 1997 y la segunda desde el 20 al 23 de enero del 2005. Se procesaron los datos digitales de la Intensidad Total del Campo Geomagnético registrados por un magnetómetro Elsec de precesión protónica modificado para la obtención de datos cada 1 minuto. Se procedió a filtrar pulsos esporádicos y se generaron las series de tiempo para ser correlacionadas con la densidad ( $d$ ) y velocidad ( $v$ ) registradas por las sondas SOHO (a disposición de la comunidad científica en la página web: <http://umtof.umd.edu/pm>) y ACE (a través de la página web: <http://www.srl.caltech.edu/ACE>).

La EMC correspondiente al evento de Enero de 1997 fue registrada por la sonda SOHO. La información de  $v$  y  $d$  del Viento Solar que se disponen son promedios horarios. La Figura 2 muestra la relación entre los eventos del Viento Solar y Campo Magnético. En el intervalo desde las 00:00 Hs. TU. del 8 de Enero hasta las 00:00 Hs. TU. del día 13 de Enero de 1997, se determinaron 4 eventos denominados "A", "B", "C" y "D", donde las variables de  $v$  y  $d$  tienen cambios notables y la respuesta son los Impulsos Bruscos (IB) y posterior decaimiento de la Intensidad Total del Campo Magnético de la Tierra. En el proceso "A" se observa un crecimiento de la velocidad  $v$  desde los 400 a 450 km/s., con un cambio de densidad  $d$  de 8 a 12 p cm<sup>-3</sup>. ( $p$ : protones), generando un IB = 30 nT. En el proceso "B",  $\Delta v=200$  km/s y  $\Delta d=8$  p/cm<sup>3</sup>, generando un IB = 20 nT., y un desarrollo de procesos de diferentes IB con amplitud creciente, generando un proceso de tormenta

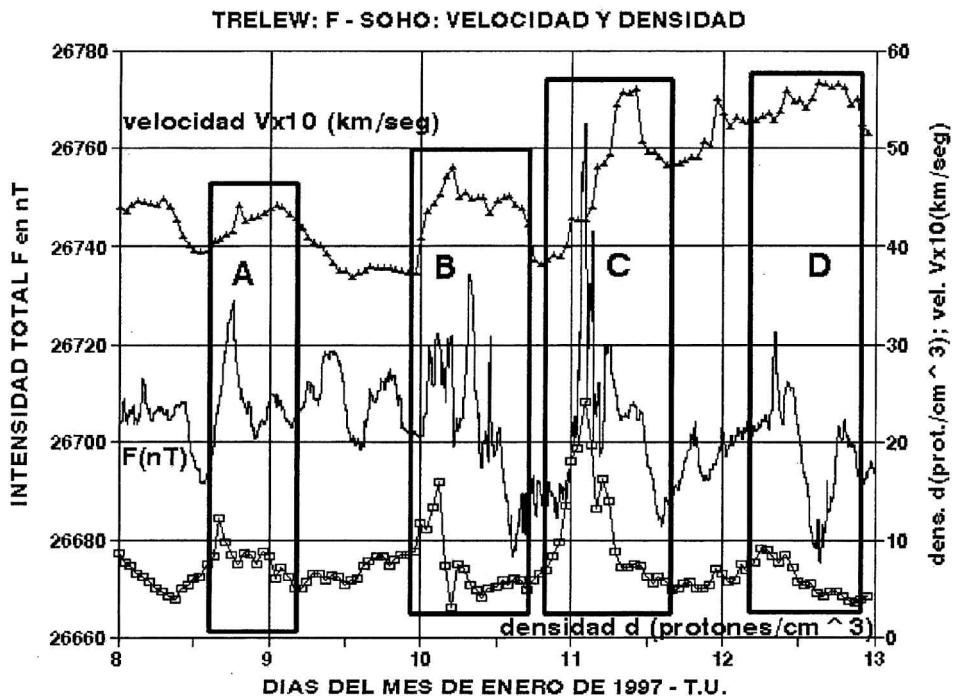


Figura 2. Composición de los registros de la Intensidad Total F cada 1 minuto, velocidad y densidad del Viento Solar y EMC cada 1 hora.

magnética con una amplitud de 57 nT. Seguidamente se sucede el proceso "C" dentro del inicio de recuperación de la Tormenta Magnética generada por el proceso "B". En este estudio se tiene la llegada de una tercera perturbación con un cambio de  $v$  desde 380 km/s. a 560 km/s., generando un  $IB = 80$  nT., generándose la fase efecto de Corriente Anillo y a posteriori comienza la fase de recuperación. El proceso "D" similar al anterior se desarrolla simplemente como llegada de otra perturbación, con  $v$  crecientes de 540 km/s a 580 km/s y un aumento de  $d$  que no llega a los  $10 \text{ p/cm}^3$ . Este fenómeno cuenta con series de tiempo de diferentes intervalos de muestreo que permiten una correlación de las causas y efectos de acuerdo con los modelos de perturbaciones de Wimmer-Schweingruber (2005). Aquí podemos inferir una importante dependencia de los cambios en el registro de  $F$  con los cambios de  $d$  y crecimiento de  $v$ .

Las Figuras 3 y 4 que presentan los efectos de la eyección de masa coronal luego que un flare de gran magnitud surgiera de la gran

mancha solar número 720 (<http://www.SpaceWeather.com/>). De las estadísticas brindadas por la Universidad de Maryland es el quinto flare más intenso registrado desde el año 2000. En estas Figuras se presentan los datos registrados por la sonda ACE correspondiente a  $v$  y  $d$ , previamente adecuados al registro en la Intensidad Total  $F$  cada 1 minuto, ya que la sonda ACE registra cada 64 segundos. La Figura 3 presenta la Tormenta Geomagnética en su desarrollo desde el día 21 hasta el día 24 de Enero del 2005. Dos crecimientos sucesivos de  $v$  y dos importantes crecimientos también sucesivos de  $d$  generan dos Impulsos Bruscos de  $F$  (Fig. 4) para luego observarse el inicio de la parte principal de la Tormenta Magnética (Parkinson 1983).

Sin embargo el mantenimiento de  $v$  del orden los 850 km/s por procesos impulsivos decrecientes de  $d$ , generan procesos magnetosféricos de Subtormentas por el ingreso de partículas en el Casquete Polar Sur, y en el Casquete Polar Norte, de auroras de un despliegue de gran intensidad.

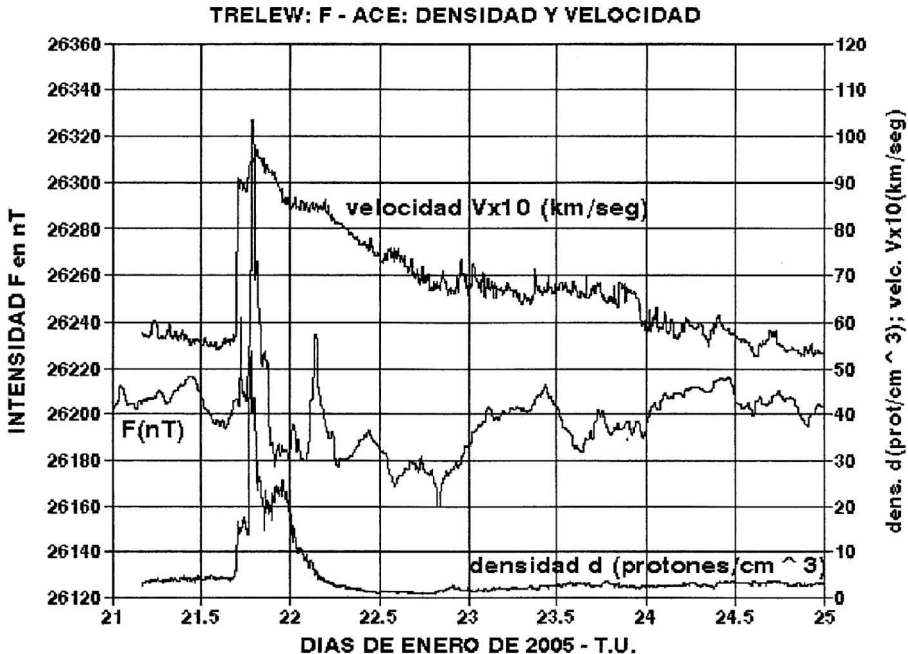
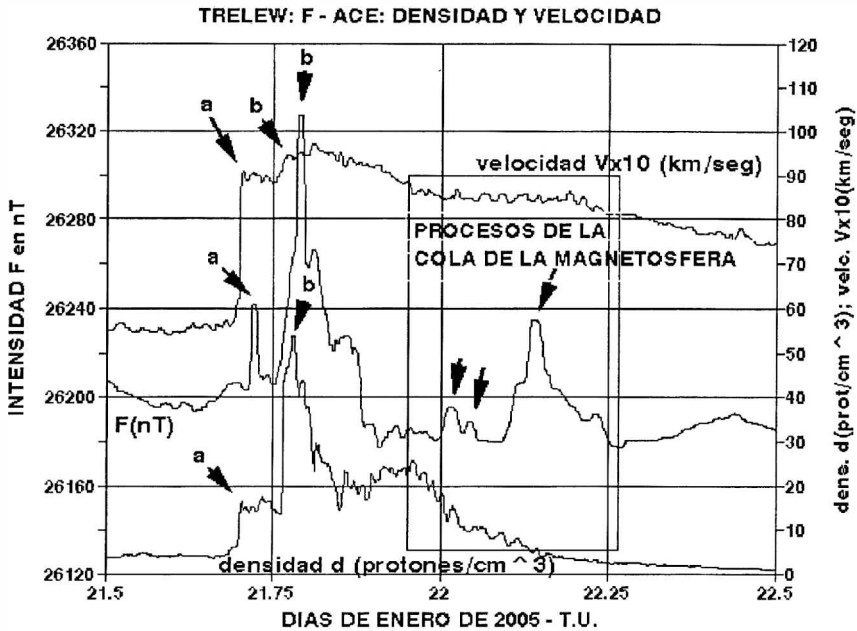


Figura 3. Registro de  $F$ , de la velocidad y densidad del Viento Solar cada 1 minuto.



**Figura 4.** Registro ampliado de la Intensidad Total F , densidad y velocidad indicándose con “a” y “b” los Impulsos correlacionados de los efectos de las EMC. Las flechas dentro del recuadro marcan procesos que corresponden a la parte nocturna de la cavidad magnetosférica donde los procesos impulsivos podran estar relacionados con un intervalo prolongado de alta velocidad , a pesar de una disminución de la densidad pero actividad pulsante.

En la Figura 5 se presenta en mayor detalle el desarrollo de las Ondas de Choque y su efecto en F.

El tiempo transcurrido entre la recepción del primer pulso de v y d y el primer Impulso Brusco en F es de 26 minutos, señalado con “a” (Fig. 5), y de 27 minutos para el mayor y más importante impulso en d y F, pero no en v. La cavidad magnetosférica es en todo este intervalo de aproximadamente 150 minutos comprimida y luego de ello comienza todo el desarrollo en el interior de dicha cavidad magnetosférica el ingreso de partículas e intensificación del efecto de la Corriente Anillo. El incremento de F depende de las oleadas de partículas que producen una intensificación apreciable de d. Esta se manifiesta con un tiempo de retardo de 25 a 30 minutos aproximadamente. La velocidad v es un indicativo de la característica de ese

retardo, pues a valores mayores de v corresponden retardos menores, y viceversa.

### CONCLUSIONES

Los aportes realizados por las sondas espaciales a la detección de las EMC, además de las mediciones de sus parámetros muestran la importancia en la interpretación, en principio somera, de los efectos que estos procesos solares producen sobre los registros en Observatorios Permanentes como el de Trelew. El registro digital de F de alta resolución temporal brinda una manera de dilucidar también las causas de las formas en estos procesos transitorios. Las aplicaciones de los datos de v y d como promedios horarios provistos por las bases de datos del SOHO (<http://umtof.umd.edu/pm/>) nos permiten en primera instancia interpretar los efectos de

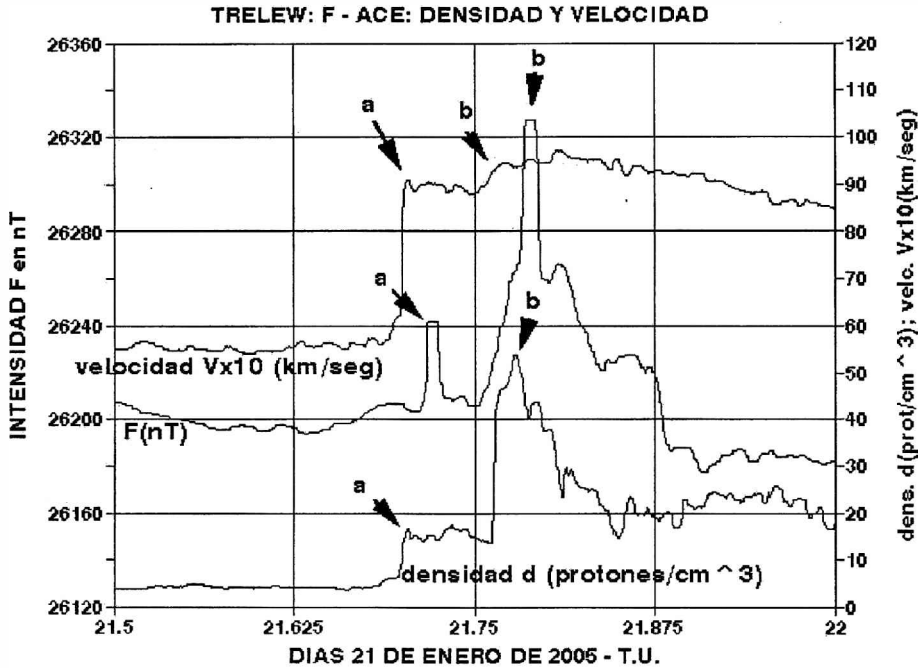


Figura 5. Detalle del desarrollo de los efectos en v, d y F de la Onda de Choque correspondiente a la EMC del flare producido en la mancha solar 720 (<http://www.SpaceWeather.com/>).

EMC y de los procesos del Viento Solar de alta velocidad que son emanados de los agujeros coronales que generan las Tormentas Magnéticas clásicas. Del análisis de estos dos fenómenos de EMC podemos concluir que los crecimientos de F dependen principalmente de los cambios o perturbaciones en d y que el parámetro v es un indicativo para la evolución del tránsito de dichas perturbaciones desde la ubicación de las sondas SOHO y ACE (a 1.5 millones de km de la Tierra), hasta su interacción con el campo magnético terrestre.

Estudios en la región de la AAS, permitirán evaluar la importancia de la tendencia decreciente de F y de la Intensidad de la EMC registrada en superficie respecto de los efectos que sufre la tecnología satelital por el ingreso de partículas energizadas en esta región produciendo daños en sus bancos de memoria (Baker 2005).

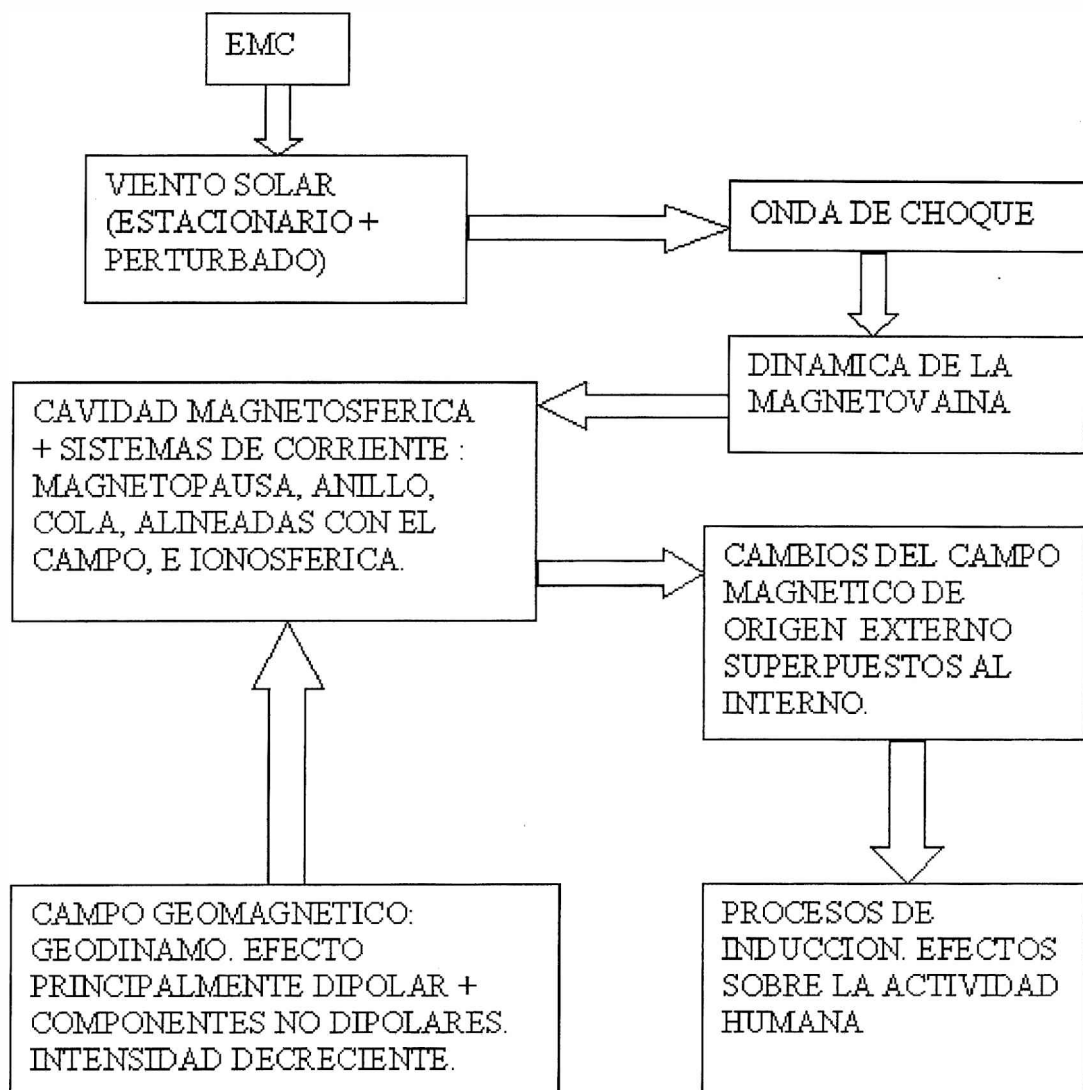
Los resultados de este estudio en un Observatorio de la Red Intermagnet aporta otra

forma de analizar las relaciones terrestres solares frente a la nueva disciplina denominada con el nombre "Climatología Espacial".

La Figura 6 concluye en forma de diagrama la relación existente Sol-Tierra como sistema integrado con procesos propios e interactivos, debido a lo global de los fenómenos y de las escalas espaciales y temporales, que los actores Sol y Tierra tienen en el escenario heliosférico. Se ha indicado un bloque especial para el espacio ocupado por la magnetovaina donde la transición de procesos magneto-hidrodinámicos, electrodinámicos, y de interconexión de líneas de campo tienen lugar.

**Agradecimientos:** Se agradece a la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los EE.UU. (NASA) y a la Agencia Espacial Europea (ESA), por las facilidades para obtener los parámetros solares de las sondas SOHO y ACE a través de sus páginas web: "<http://umtof.umd.edu/pm>" y "[98](http://</a></p>
</div>
<div data-bbox=)





**Figura 6.** Diagrama conceptual de los procesos que actúan sobre la Cavity Magnetosférica, indicándose la disminución de la Intensidad del Campo Geomagnético.

[www.srl.caltech.edu/ACE/](http://www.srl.caltech.edu/ACE/)", respectivamente.

### REFERENCIAS

Aschwanden M. 2006. Physics of the Solar corona. Reprinted with correction. Springer, Berlin. Pp. 1-892.  
 Baker D. N. 2005. Introduction to Space Weather in Space Weather. Ed by K. Scherer, H.

Fichtner, B. Heber and C. Mall, lectures notes in physics. Springer Berlin. Vol. 656. pp. 2-20.  
 Cocconi G., T. Gold, K. Greisen, S. Hayaka, J. P. Morrison. 1958. the Cosmic Ray Flare Effect. Nuovo Chimento 8 pp.161.  
 Kallenrode M. B. 2004. Space Physics 3 rd ED. Springer-Berlin pp. 1-484.  
 Klimchuk J. A. 2001. Theory of Coronal Mass Ejection in Space Weather. Ed. By Song P., H. J.

*Julio César Gianibelli, Nicolás Quaglino y Mónica Mac William*

- Singer and G. L. Siscoe. Geophysical Monograph 125. American Geophysical Union. Washington D. C.
- Lindemann F. A. 1919. Note on the Theory of Magnetic Storms. *Phil. Mag.* 38. pp. 669.
- Parkinson W. D. 1983. Introduction to Geomagnetism. Scottish Academic Press-Edinburgh. Pp. 1-433.
- Piddington J. H. 1958. Interplanetary Magnetic Field and its control of cosmic-ray variation. *Phys. Rev.* 112. pp. 589.
- Pröls G. W. 2004. Physics of the Earth's Space. Environment Springer-Berlin pp. 1-533.
- Wimmer-Schweingruber R. F. 2005. Interplanetary Disturbances in Space Weather. Ed. By K. Scherer, H. Fichtner, B. Heber and C. Mall, lectures notes in physics. Springer Berlin. Vol. 656. pp. 71-129.