



PRECIPITACIÓN DE PARTÍCULAS EN LA SAMA Y SUS EFECTOS GEOMAGNÉTICOS

Ramón Caraballo^{1,2}, Cleiton Da Silva Barbosa³, L. Sánchez Bettucci^{1,2,4}

¹ Laboratorio de Geofísica y Geotectónica, Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Iguá 4225, Montevideo 11400, Uruguay

² Observatorio Geofísico de Aiguá, Ruta 39 km 60, Maldonado 22500, Uruguay

³ Observatório Nacional, Rua General José Cristino, 77, 20921-400 Rio de Janeiro, Brazil

⁴ Dirección Nacional de Minería y Geología. Ministerio de Industria y Energía, Hervidero 2861, Montevideo 11800, Uruguay
e-mail: jolinar35@gmail.com

ABSTRACT

Particle precipitation events in the South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA) have been correlated with impulses in the H component of the geomagnetic field. Sudden changes in the H component of the geomagnetic field can produce high intensity peaks in geomagnetic induced currents (GIC) at the Earth's surface. The effects related to electron precipitation on the upper and middle atmosphere are still not well understood, especially in the area of the SAMA. This study focuses on the Halloween magnetic storm (29-31 October 2003) and two of the largest magnetic storms occurred in 2011. Data from POES and DMSP satellites have been contrasted with the Vassouras magnetic observatory records and the GIC in a HV transformer neutral at Itumbiara substation (central Brazilian area) to look for possible correlations between dH, the GIC and the precipitation flux of ultrarelativistic electrons. The observations suggest some overlap between episodes of intense precipitation of electrons in the inner radiation belt and impulsive changes in these variables.

Keywords: Particle Precipitation, Geomagnetic Variations, Electromagnetic Induction.

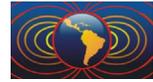
RESUMEN

Eventos de precipitación de partículas en la Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAMA) han sido correlacionados con impulsos en la componente H del campo geomagnético. Variaciones súbitas en la componente H del campo geomagnético pueden producir picos de alta intensidad en las corrientes geomagnéticas inducidas (GIC) en la superficie terrestre. Los efectos relativos a la precipitación de electrones sobre la alta y media atmósfera no son bien entendidos aún, especialmente en el área de la SAMA. Este estudio se focaliza en eventos ocurridos durante las tormentas magnéticas de Halloween (29-31 de Octubre de 2003) y durante dos de las mayores tormentas magnéticas de 2011. Datos de los satélites DMSP y POES han sido contrastados con registros del observatorio magnético de Vassouras a fin de buscar posibles correlaciones entre dH, Dst, la GIC y el flujo de precipitación de electrones ultrarelativistas. Las observaciones sugieren cierta coincidencia entre episodios de precipitación intensa de electrones en el cinturón interno de radiación y variaciones impulsivas en las mencionadas variables.

Palabras clave: Precipitación de Partículas, Variaciones Geomagnéticas, Inducción Electromagnética.

Introducción

De acuerdo con el modelo IGRF 2015, la Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAMA) continúa incrementando su extensión mientras deriva lentamente hacia el oeste en un ritmo cercano a $0.3^\circ \text{ yr}^{-1}$ (Badhwar 1997). A medida que disminuye el campo geomagnético en toda la zona de la SAMA se profundiza la penetración de partículas de alta energía en la atmósfera superior. La disminución campo magnético conlleva un ensanchamiento del cono de pérdida para la radiación atrapada en los cinturón interno de radiación ($1.2 < L < 2$).



Debido a la asimetría inherente al campo geomagnético, el mínimo del campo actualmente ubicado al sur de Brasil no deriva de la misma forma que el máximo de precipitación de partículas (Grigoryan O. R. 2005). En este sentido los fenómenos de precipitación en la SAMA asemejan mucho a las regiones polares. Desde los 60's se admite que la SAMA constituye un sumidero importante para partículas atrapadas en los cinturones de radiación (Dessler 1959; Roederer 1972). En este sentido es de interés evaluar el impacto de la precipitación de partículas sobre la ionosfera y a nivel de superficie en la zona comprendida por la SAMA. La precipitación de electrones y protones de alta energía a altitudes entre 60 y 100 km incide en la producción de radicales NOx y HOx los cuales contribuyen a la destrucción del ozono atmosférico. Asimismo, la formación de pares de iones como resultado de colisiones entre dichas partículas y moléculas naturales de la atmósfera incrementa el contenido electrónico total de la ionosfera (TEC). Este incremento en la densidad electrónica afecta las transmisiones ionosféricas de señales VLF así como produce cintilación y atenuamiento de señales provenientes del espacio. La precipitación de partículas también produce distorsiones en las corrientes ionosféricas las cuales producen variaciones geomagnéticas locales. Dichas variaciones pueden ser estudiadas analizando la evolución temporal de la componente horizontal del campo geomagnético H. En este sentido, la precipitación de electrones en las regiones ionosféricas D y E han sido atribuidas como causas de los incrementos impulsivos en la componente H registrada cerca del centro de la SAMA (Trivedi *et al.* 2005). Estos impulsos súbitos, en especial durante los comienzos súbitos de tormentas magnéticas (SSC), implican picos de intensidad en el campo geoelectrico en la superficie. Esto último puede generar picos de corrientes geomagnéticas inducidas (GIC) en la infraestructura conductora sobre superficie. De acuerdo a la literatura parece existir una relación entre eventos de precipitación de partículas y tormentas magnéticas mediante la interacción onda-partícula en el cinturón externo de radiación (*e.g.* ondas ULF, radiación ion-ciclotrón, etc.) (Thorne & Kennel 1971).

Resultados y Discusión

Se analizaron magnetogramas correspondientes a la tormenta de Halloween (29-31 de Octubre 2003) y a dos tormentas magnéticas severas del ciclo 24 (5-7 de Agosto y 26-28 de Septiembre de 2011). Se estudiaron datos de los días más próximos al día del evento, (*i.e.* el día anterior, el día del mínimo Dst y el día posterior). Todos estos eventos fueron producidos por impacto de CME¹. En cuanto a los datos de satélite, se analizaron registros de los satélites DMSP y POES/METOp. Dichos satélites se ubican en órbita heliosincrónica con inclinación de 98° a 850 km de altitud y efectúan 14.1 rev./día con un período de 101 min. Una suite de instrumentos a bordo analiza los flujos de partículas y radiación a medida que progresan en sus órbitas. Se estudiaron datos proporcionados por el sensor MEPED (Medium Energy Electron and Proton Detector) a bordo de los satélites POES 15/16/17/18 y METOp 02 respectivamente. Este sensor registra flujo diferencial de partículas mediante seis telescopios de electrones y seis telescopios de protones. El rango de energías correspondiente a los telescopios de electrones es:

- 30 keV - 1.1.MeV : canales 1 & 4
- 100 keV - 1.1 MeV : canales 2 & 5
- 300 keV - 1.1 MeV : canales 3 & 6

Los canales 1-3 orientados hacia el zenit local del satélite mientras que los canales 4-6 apuntan en sentido opuesto al desplazamiento del satélite (*i.e.* 90° zenit). De esta forma en bajas latitudes geomagnéticas los canales 4-6 observan mayoritariamente electrones en el cono de pérdida local. En cambio los canales 1-3 observan electrones atrapados. Dicha situación se revierte en la región auroral donde las partículas en el cono de pérdida son captadas por los canales 1-3 y las atrapadas por los canales 4-6. En latitudes características de la SAMA los telescopios a 90° registran electrones precipitando. Es importante notar que el sensor MEPED de electrones tiene respuesta limitada en la SAMA debido al incremento significativo del flujo de fondo de protones energéticos, lo cual genera baja respuesta al flujo de electrones.

Análogamente, el sensor SSUSI (Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager) a bordo de los satélites DMSP F15/F18, captan el espectro ultravioleta lejano en dirección del nadir local. Estos fotómetros operan únicamente en el lado nocturno del planeta. SSUSI observa la ionosfera y la aurora aproximadamente



a la misma hora local en todas las órbitas. Este sensor detecta precipitación de partículas en la SAMA mediante la fluorescencia UV en 428 nm. A esta longitud de onda, la emisión UV es proporcional al flujo de precipitación.

Para los eventos considerados se estudió la evolución del flujo de electrones registrada por el sensor MEPED en el canal 6 ($E > 300$ keV) para valores L entre 1.1 y 7 lo cual abarca la región comprendida por ambos cinturones de radiación. Valores L entre 1.1 y 2 corresponden a capas-L dentro del cinturón interno. Las líneas de fuerza del campo magnético en esta capa L tienen pies entre 10° S y 45° como es el caso de la SAMA. Por lo tanto a estos valores estamos observando principalmente electrones precipitando. Adicionalmente para los eventos del año 2011 se estudiaron mapas de fluorescencia UV de la región de la SAMA para cuatro días próximos al inicio de cada tormenta magnética. Fue imposible obtener mapas de fluorescencia UV para la Tormenta de Halloween.

La Figura 1 muestra un stack plot característico para la distribución de precipitación de electrones con $E > 300$ keV respecto a L en el panel superior. El índice Dst en el panel central y en la parte inferior la GIC calculada para el neutro de un transformador de la central eléctrica de Itumbiara (Goiás, Brasil) junto con la variación dH del campo magnético registrada en el observatorio de Vassouras (22.4° S y 43.6 W). Las líneas verticales verde oscuro señalan variaciones súbitas en el lapso de 15 minutos en el flujo de electrones con picos prominentes en la GIC. Análogamente, las líneas verde claro indican coincidencias entre variaciones súbitas en H respecto del flujo de partículas.

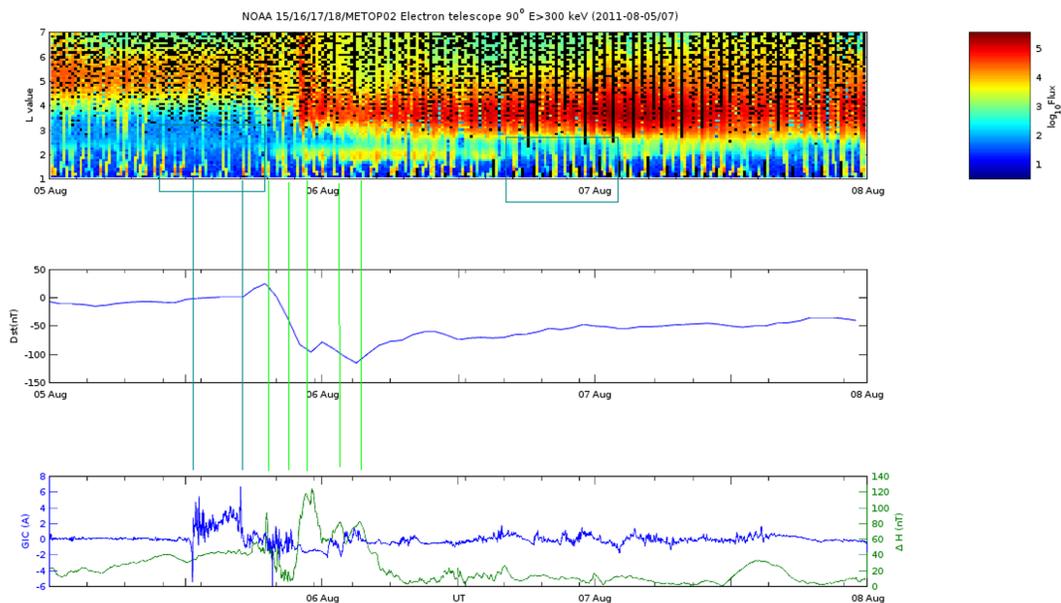


Figura 1. Flujo de precipitación de e⁻ del índice Dst (medio); GIC estimada en Itumbiara y dH medida en Vassouras (abajo). Tormenta magnética del 5-7 de Agosto de 2011.

Por otra parte se puede observar que las variaciones prominentes en la GIC parecen preceder a episodios de incremento de flujo en la región externa del cinturón interno ($L \sim 2$), así como a repoblamientos del slot ($2 < L < 4$) entre ambos cinturones.

En la Figura 2 datos del sensor SSUSI muestran un decremento marcado en la tasa de fluorescencia el día del impacto de la CME respecto a días anteriores. Luego de este descenso, se registra un suave incremento en la tasa de fluorescencia. Esto se puede apreciar observando el cambio de coloración de los píxeles del borde del máximo central en cada figura. Este comportamiento se observa en ambos casos para los eventos de 2011.

Para la tormenta de Halloween de 2003, en el stack plot de la Figura 3 se vuelven a repetir ciertas características observadas en la Fig. 1, en este caso la tormenta magnética es considerablemente mayor como se puede apreciar en la marcada variación del índice Dst (~ 400 nT) y por el intenso flujo de electrones en la región slot.

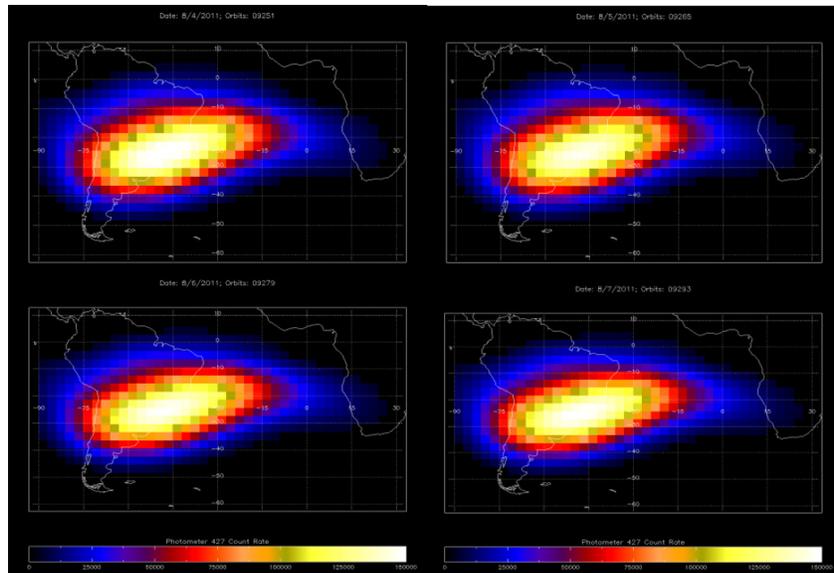


Figura 2. Fluorescencia en UV (428 nm) registrada por el sensor SSUSI para el 4-7 de Agosto de 2011 en la región de la SAMA. Las cuentas son proporcionales al flujo de precipitación.

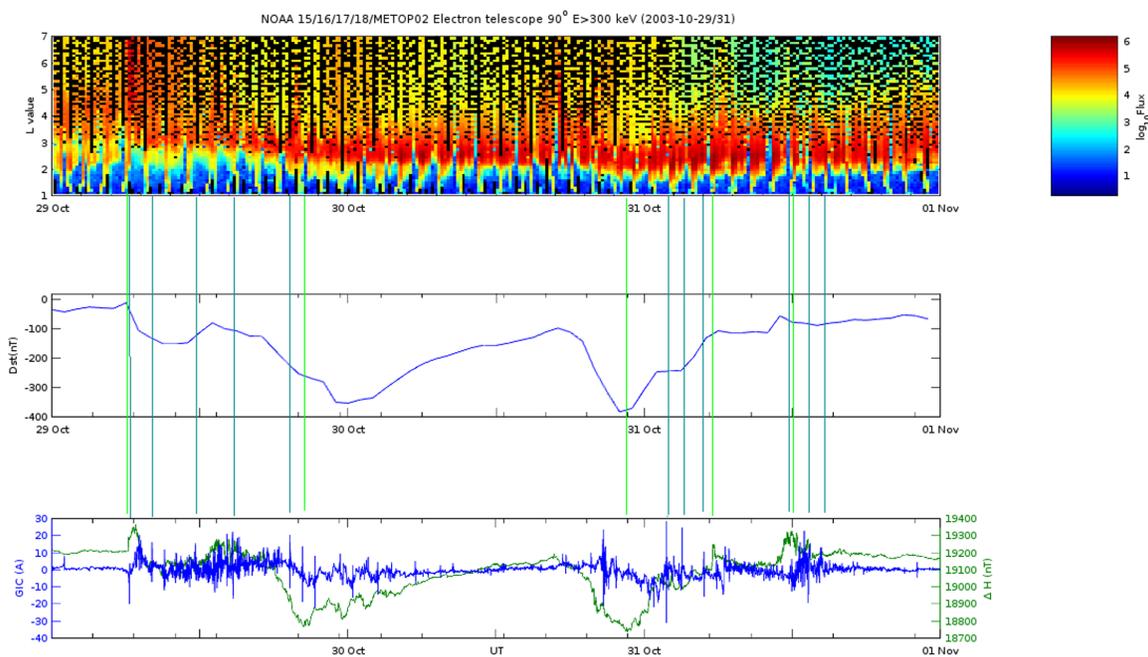


Figura 3. Flujo de precipitación de e- del índice Dst (medio); GIC estimada en Itumbiara y dH medida en Vassouras (abajo), para la tormenta de Halloween (29-31 de Octubre de 2003).

Similar evolución temporal podemos apreciar en la Figura 4 con datos del satélite POLAR durante el año 1997, (ciclo solar 22). Se pueden observar varios episodios de incremento de la población de electrones en el rango 1.2-2.4 MeV en el cinturón externo de radiación. En este caso las variaciones súbitas en el índice Dst parecen corresponder bastante bien con reconfiguraciones en la población de partículas del cinturón.

Conclusiones

Se analizaron variaciones en la componente H medida en el observatorio de Vassouras, la GIC estimada en el neutro de un transformador en el central de Itumbiara localizada cerca del ecuador magnético.

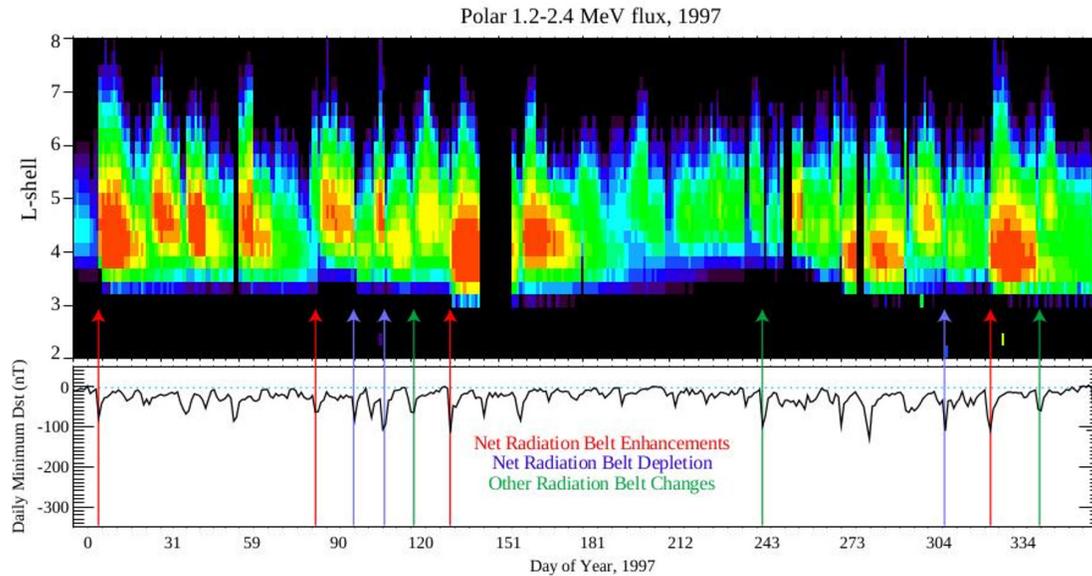
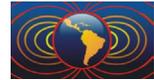


Figura 4. Variaciones del índice Dst vs flujo de electrones en el cinturón externo de radiación para 1997 (Reeves et al. 2003)

Dichas variaciones se compararon con variaciones súbitas en el flujo de electrones ultrarelativistas a valores L típicos del cinturón interno de radiación. De acuerdo a las comparaciones realizadas, se observan ciertas correspondencias entre los picos de intensidad de la GIC y en las variaciones de H con respecto a cambios súbitos en el flujo de radiación a valores L entre 1.1 y 2. Para todos los eventos del ciclo 24 se observa una disminución marcada en el flujo neto de precipitación en la SAMA para el día de inicio de la tormenta magnética sucedido de un incremento gradual en días posteriores. Los resultados sugieren cierta concordancia entre episodios de precipitación de electrones ultrarelativistas en la SAMA e impulsos súbitos en H y en la GIC.

Agradecimientos

Los autores agradecen al NOAA-NCEI (National Centers for Environmental Information) y a INTERMAGNET por haber proporcionado los datos necesarios para la realización de este trabajo.

Referencias

- Badhwar, G. D., 1997. Drift rate of the South Atlantic Anomaly, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 102, 2343-2349.
- Dessler, A. J., 1959. Effect of magnetic anomaly on particle radiation trapped in geomagnetic field. *Journal of Geophysical Research* 64, 713-715.
- Grigoryan O. R., A. N. Petrov, V. R. V. B., 2005. On the Drift of the South Atlantic Anomaly, WDS'05 Proceedings of Contributed Papers, Part II : 251-256.
- Reeves, G. D.; McAdams, K. L.; Friedel, R. H. W., O'Brien, T. P., 2003. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters* 30, 36-1:4.
- Roederer, J. G., 1972. Geomagnetic field distortions and their effects on radiation belt particles., *Reviews in Geophysics* 10, 599-630.
- Thorne, R. M., Kennel, C. F., 1971. Relativistic electron precipitation during magnetic storm main phase, *Journal of Geophysical Research* 76, 4446-4453.
- Trivedi, N., Abdu, M., Pathan, B., Dutra, S., Schuch, N., Santos, J., Barreto, L., 2005. Amplitude enhancement of events in the South Atlantic anomaly region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67 1751- 1760.