



Análisis de flujos extremos de electrones en los cinturones de radiación de Van Allen a partir de datos de SAC-D

V. Lanabere¹ y S. Dasso^{1, 2, 3}

¹ *Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Buenos Aires, Argentina. vlanabere@at.fcen.uba.ar*

² *CONICET - Universidad de Buenos Aires, Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Buenos Aires, Argentina.*

³ *Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, Buenos Aires, Argentina.*

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es estudiar las alas de alta energía de la función de distribución de los promedios diarios de flujos de electrones, para diferentes canales de energía entre 0.249 – 1.192 MeV, obtenidos por el detector de partículas ICARE-NG/CARMEN-1 a bordo del satélite argentino de órbita polar SAC-D. Se utilizó la teoría de valores extremos para estimar los máximos valores esperados del flujo en el cinturón de radiación exterior a diferentes tiempos de retorno. Se encontró que los flujos presentan un límite superior finito en (1) el centro del cinturón de radiación exterior para los canales de menor energía y (2) en el borde interno del cinturón exterior en el caso del flujo de electrones con energías mayores a 0.653 keV. Los resultados presentados en este trabajo son de gran importancia para caracterizar las condiciones de la Meteorología del Espacio.

Palabras clave: Meteorología del Espacio - Cinturones de radiación – Medio interplanetario

Introducción

Los cinturones de radiación fueron descubiertos en el año 1958 por van Allen. Estas regiones en el entorno espacial terrestre presentan iones y electrones energéticos (Prölss, 2012) atrapados por el campo geomagnético. En particular, la población en el cinturón de radiación exterior presenta gran variabilidad en el tiempo y pueden aumentar significativamente, principalmente durante tormentas magnéticas, debido a perturbaciones en el plasma interplanetario cercano a la Tierra (e.g., Lugaz y otros, 2016). Estos electrones supratérmicos pueden afectar a las tecnologías satelitales de diferentes formas según su energía. Los electrones con energías de centenas de keV pueden producir daños en los materiales superficiales del satélite (Koons y Fennell, 2006). Los de mayor energía, algunas decenas de MeV, pueden penetrar la protección exterior del satélite y producir daños en el interior (Wrenn y otros, 2002). Por lo tanto, es de gran importancia tener un conocimiento acerca de los flujos extremos de electrones energéticos para el desarrollo de nuevas tecnologías satelitales.

Koons (2001) y Meredith y otros (2015) estudiaron los promedios diarios del flujo de electrones con energías mayores a 2 MeV con observaciones del satélite GOES y utilizando el método de picos sobre un umbral (POT, debido a su acrónimo en inglés *Peaks Over Threshold*). Por otro lado, un estudio con el método de máximo por



bloques y con canales de energía en el rango de keV – MeV fueron realizados por O'Brien y otros (2007) y Meredith y otros (2016).

En este trabajo proponemos realizar un análisis de los flujos extremos de electrones en varios canales de energía a partir de datos del satélite de órbita polar SAC-D, utilizando el método POT y en dos regiones del cinturón de radiación exterior: El borde interior ($L=3.5—3.75$) y en el centro ($L=4.75—5$), con L el parámetro de McIlwain.

En la sección “Métodos” se describe el análisis de valores extremos utilizado para estudiar los extremos del flujo de electrones en el cinturón de radiación exterior. En la sección “Resultados” se muestran los valores obtenidos del ajuste de las colas de la distribución para los flujos de electrones en las dos regiones mencionadas y los valores de retorno obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

Métodos

La teoría de valores extremos brinda una estimación de las colas de la distribución original haciendo uso solamente de los valores extremos de la serie de datos. En este trabajo se reconstruye la serie de valores extremos utilizando el método POT. Se utilizaron promedios diarios del flujo de electrones medidos por el detector ICARE-NG a bordo del satélite Argentino SAC-D durante el período de la misión (i.e., agosto/2011 a junio/2015). Dado que estos flujos se ven contaminados por protones durante eventos de protones solares (SPE, debido a su acrónimo en inglés *Solar Proton Event*), fue necesario remover los datos correspondientes a eventos SPE. Para remover estos eventos, se procedió a definir un evento SPE cuando el flujo de electrones en el rango $L=7—7.25$ supera los dos desvíos estándar respecto al valor medio en dicha región. Luego, se contrasta que los días eliminados se encuentren en el listado de SPE documentado por NOAA (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/SPE.txt>).

En particular, para estudiar los flujos extremos en el cinturón de radiación exterior se utilizó el valor umbral de $10000 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ basado en el trabajo de Koons (2001).

La Figura 1 muestra la serie temporal de los promedios diarios del flujo de electrones con energías $E>0.249 \text{ MeV}$ en el borde interior del cinturón de radiación. En línea llena se muestra el valor umbral utilizado. Se puede observar que la mayor cantidad de datos caen por debajo de dicho umbral, superando el mismo únicamente en días específicos que en particular coinciden con eventos de tormentas magnéticas.

Se reconstruyeron las series de valores extremos a los 20 canales de energía en el rango de 0.249 MeV a 1.192 MeV con el mismo valor umbral de $10000 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ y para las dos regiones del cinturón de radiación exterior. En el caso del método POT, la función de distribución apropiada para realizar el ajuste es la

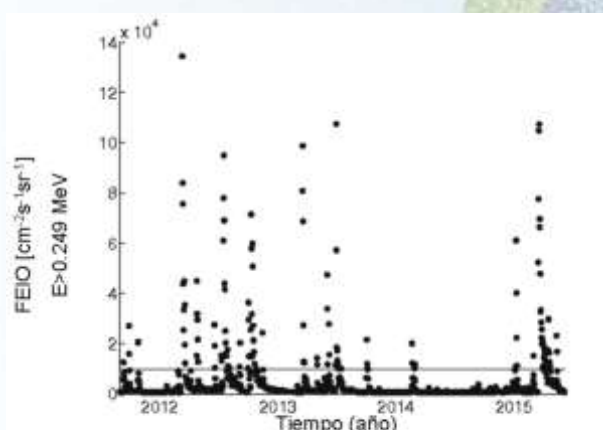


Figura 1: Promedios diarios del flujo de electrones $E>0.249 \text{ MeV}$ en $L=3.5—3.75$ en el periodo agosto/2011 a junio/2015. En línea llena se muestra el umbral utilizado ($10000 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$).

distribución Generalizada de Pareto (GP) introducida por primera vez por Picklands (1975). Se procedió a realizar un ajuste de máxima verosimilitud con la función de probabilidad acumulada Generalizada de Pareto:

$$G(\kappa, \sigma, u; X) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\kappa(X-u)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}} & \text{si } \kappa \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{X-u}{\sigma}\right) & \text{si } \kappa = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Donde, σ es el parámetro de escala, κ el parámetro de forma, X la variable aleatoria, x los datos de flujo de electrones y u el umbral elegido.

La Figura 2 muestra la frecuencia acumulada medida en función del flujo de electrones (x) en tres canales de energía en el borde interior del cinturón de radiación exterior. También se muestra la curva (línea negra discontinua) que mejor ajusta a la ec. 1, es decir $P[X > x]$, teniendo en cuenta que solo se consideran flujos que exceden el umbral u .

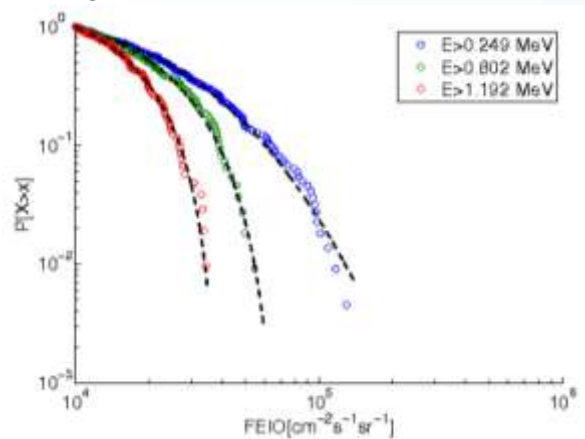


Figura 2: Análisis de valores extremos para tres canales de energía: $E > 0.249$ MeV (Azul), $E > 0.802$ MeV (verde) y $E > 1.192$ MeV (rojo). En color se muestra el gráfico de probabilidad acumulada estimada a partir de las observaciones. En línea llena el ajuste con la distribución Pareto.

Este análisis se repitió para los 20 canales de energía en el centro del cinturón exterior. De esta forma se obtuvieron los parámetros de escala y de forma para los 20 canales de energía. El parámetro de forma (κ) tiene particular interés dado que controla el comportamiento de la cola de la distribución. Si $\kappa < 0$, la distribución GP presenta un límite superior finito. Mientras que si $\kappa \geq 0$, la distribución GP no presenta límite superior.

Resultados y discusión

Los valores de κ y los intervalos de confianza al 95% para los 20 canales de energía en el borde interior y en el centro del cinturón de radiación se muestran en la Figura 3 para los 20 canales de energía. Se observa en la Figura 3a que para los canales de mayor energía ($E > 0.653$ MeV a $E > 1.192$ MeV) el parámetro de forma es negativo con un 95% de confianza. Mientras que en los canales de menor energía, no es posible determinar el signo de κ . Un comportamiento diferente se observa en el centro del cinturón de radiación exterior (Figura

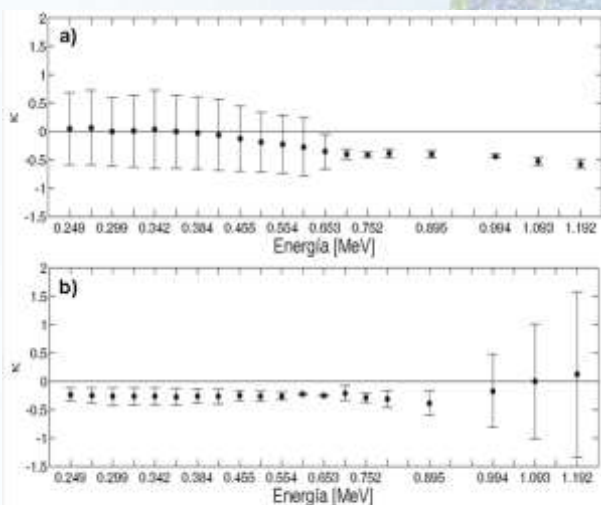


Figura 3: Valores del parámetro de forma (κ) para 20 canales de energía entre 0.249 MeV y 1.192 MeV. a) En $L=3.5-3.75$. b) En $L=4.75-5$. En barras se muestra el intervalo de confianza al 95%.



3.b). Se observa, en este caso, que los canales de menor energía presentan valores de κ significativamente negativos, es decir, la distribución de valores extremos presenta un límite superior finito. Con los resultados obtenidos a partir de este análisis es posible determinar los valores de retorno, es decir, los valores de promedio diario de flujo de electrones esperados en un dado período de tiempo. Se muestra en la Tabla 1 los valores de retorno esperados en periodos de 10, 50 y 100 años.

Tabla 1: Valores de retorno esperados para el flujo diario de electrones de $E > 1.192$ MeV en borde interior del cinturón de radiación exterior y para energías $E > 0.249$ MeV en el centro del cinturón de radiación exterior.

	L = 3.5—3.75 $E > 1.192$ MeV [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$]	L = 4.75—5 $E > 0.249$ MeV [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$]
10 años	2.5×10^4	5.0×10^4
50 años	2.7×10^4	5.4×10^4
100 años	2.8×10^4	5.5×10^4

Conclusiones

Se ha realizado un estudio estadístico de los valores extremos del promedio diario de flujo de electrones en el rango de energías $E > 0.249$ MeV a $E > 1.192$ MeV en dos regiones del cinturón de radiación exterior. Para ello, se utilizaron datos de SAC-D entre agosto/2011 y junio/2015. Nuestros resultados muestran un comportamiento diferente en el interior y en el centro del cinturón de radiación exterior. Para energías $0.653 \text{ MeV} < E < 1.192 \text{ MeV}$, en el borde interno del cinturón exterior se encontró una distribución acumulada de flujos con límite superior finito. Por otro lado, en el centro del cinturón de radiación exterior κ presenta valores significativamente negativos en canales de menor energía ($E > 0.249$ a $E > 0.895$). También determinamos valores de retorno, es decir, valores extremos de promedio diario de flujo de electrones esperados en un dado período de tiempo.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión Nacional de Asuntos Espaciales (CONAE) por proveer los datos del detector ICARE-NG/CARMEN-1 SAC-D.

Referencias

- Koons, H. C., 2001. Statistical analysis of extreme values in space science. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106 (A6): 2156—2202.
- Koons, H. C., and J. F. Fennell, 2006. Space weather effects on communications satellites, *Radio Sci. Bull. Int. Union Radio Sci. (URSI)*, 316, 27—41.
- Lugaz, N., C. J. Farrugia, C. L. Huang, R. M. Winslow, H. E. Spence and N. A. Schwadron, 2016. Earth's magnetosphere and outer radiation belt under sub-Alfvénic solar wind, *Nature Communications*, 7.
- Meredith, N. P., Horne R. B., Isles J. D. and Rodriguez, J. V., 2015. Extreme relativistic electron fluxes at geosynchronous orbit: Analysis of GOES $E > 2$ MeV electrons. *Space Weather*, 13(3): 170—184.



Meredith, N. P., Horne R. B Isles J. D. and Green, J. C., 2016. Extreme energetic electron fluxes in low Earth orbit: Analysis of POES E > 30, E > 100, and E > 300 keV electrons. *Space Weather*, 14(2): 136—150.

O'Brien, T. P., Fennell, J. F., Roeder, J. L. and Reeves, G. D., 2007. Extreme electron fluxes in the outer zone. *Space Weather*, 5 (1).

Picklands, J., 1975. Statistical inference using extreme order statistics, *Ann. Stat.*, 3.

Prölss, G., 2012. *Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction*, Springer Science & Business Media3.

Wrenn, G. L., D. J. Rodgers, and K. A. Ryden, 2002. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging, *Ann. Geophys.*, 20, 953–956.