



GLOBAL RECOVERY OF THE OUTER RADIATION BELT UNDER INFLUENCE OF THE HIGH SPEED STREAM DURING VAN ALLEN PROBES ERA: PRELIMINAR RESULTS

Da Silva, L. A.^{1,2}; Alves, L. R.²; Sibeck, D.³; Souza, V. M.²; Jauer, P. R.^{1,2}; Marchezi, J. P.²; Vinicius, D.²; Vieira, L. E. A.²; Wang, C.¹; Jiankui, S.¹; Liu, Z.¹; Gonzalez, W.²; Baker, D.⁴; Kletzing, C.⁵.

Corresponding author: Da Silva, L. A. (ligia.alves01@gmail.com and ligia.silva@inpe.br)

¹State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP, Brazil.

³NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.

⁴Laboratory for Atmosphere and Space Physics - LASP, Boulder, CO, USA.

⁵University of Iowa, Iowa City, IA, USA.

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The importance of the particle dynamics in the outer radiation belt, as well as their relative impacts on the space and atmospheric environment, are decisive themes for the safety of the space environment and knowledge of the atmosphere from the earth. However, the interaction between these energetic particles and the different solar wind structures makes it difficult to fully understand these dynamics. The present work investigated the impacts caused in the outer radiation belt during solar wind structures that cause weak and moderate geomagnetic activity, such as the co-rotating Interaction Region (CIR), which are more geoeffective in the descending phase of the solar activity cycle. The results showed that, during the CIR phase, there was a decrease (≤ 1 order of magnitude) of relativistic electron flux in the outer belt, whereas during the Alfvénic fluctuations phase were detected in more than 90% of events, increase (enhancement) of relativistic electron flux in the outer belt. Therefore, the analyzes focused on the Alfvénic fluctuation phases, which present strong oscillations in the north-south component of the Interplanetary Magnetic Field (IMF) concomitant with long periods of auroral activity. These characterizations facilitate the interpretation of the results, which may have direct relations with the dynamics of the magnetotail. During the analysis period (2012-2018), the generation of magnetohydrodynamic (Ultra Low Frequency - ULF) waves within the magnetosphere are detected, which are capable to interact resonantly with the charged particles. Several mechanisms are proposed in the literature to explain the ULF wave-particle interaction. The radial diffusion mechanism was quantified here through the empirical model. However, the identification of the main parameters of the solar wind related to the global recovery of the outer belt was performed, showing that the magnetic field variability presents an Alfvénicity

behavior and the enhancement presents peculiar patterns regarding the intensity and positioning of the relativistic electron flux for all events studied. Thus, this work can provide subsidies for the improvement of the forecasting and/or nowcasting of the high energy electron flux in the terrestrial radiation belt, consequently we will contribute to the safety of the space environment and the earth's atmosphere.

Introdução

A dependência do mundo atual as tecnologias aeroespaciais em praticamente todas as áreas de conhecimento, tem conduzido ao aumento de relevância dos estudos relacionados à segurança do ambiente espacial, assim como, do conhecimento da atmosfera terrestre. A destacar, a proteção dos instrumentos a bordo de satélites e/ou foguetes, a preservação da saúde dos astronautas e a qualidade dos sinais de navegação de um modo geral. Assim, aprimorar o monitoramento e as previsões dos diversos fenômenos dinâmicos oriundos do Sol em direção ao campo geomagnético é objeto de grande importância para os tomadores de decisão.

A área de interesse deste trabalho é a magnetosfera terrestre, na qual se situam os cinturões de Van Allen (VA). Estes podem sofrer grandes influências das estruturas do vento solar que se acoplam à magnetosfera. Contudo, o cinturão externo é considerado o mais vulnerável as perturbações geomagnéticas, comparado ao interno. O cinturão externo posiciona-se à distância de aproximadamente 3,5–6,5 R_E (raios terrestres). Sua população é principalmente composta por elétrons em uma ampla faixa de energia, e os vários processos dinâmicos que governam os sistemas de correntes da magnetosfera da Terra são também capazes de controlar a estabilidade do fluxo de partículas neste cinturão de radiação [Blake et al, 1992].

Os elétrons no cinturão externo são aprisionados pelo campo geomagnético e realizam movimentos complexos que podem ser decompostos em três componentes periódicas. O movimento de giro em torno das linhas de campo magnético, associado ao primeiro invariante adiabático. O movimento de flutuação ao longo das linhas de campo magnético entre os pontos de espelhamento, associado ao segundo invariante adiabático. O

movimento de deriva azimutal através dos L-Shell para Leste, associado ao terceiro invariante adiabático [Northrop e Teller 1960; Ukhorskiy e Sitnov, 2013]. Os invariantes adiabáticos são aproximadamente constantes nos sistemas que apresentam mudanças lentas. Todavia, durante interações entre estruturas do vento solar e a magnetosfera da Terra, os invariantes adiabáticos podem ser violados e a dinâmica do cinturão torna-se altamente complexa, diminuindo ou aumentando (“enhancement”) o fluxo de elétrons [Bortnik e Thorne, 2007; Baker et al., 2014; Alves et al., 2016; Da Silva et al., 2019]. O presente trabalho concentra-se no processo de “enhancement”, em que os elétrons podem atingir velocidades relativísticas e ultrarelativísticas, causando problemas técnico-eletrônicos nos instrumentos a bordo dos satélites geostacionários.

Metodologia e Dados

Conhecer as características das estruturas do vento solar e entender como estas podem interagir com a magnetosfera interna, alterando o comportamento das partículas no cinturão é assunto de suma importância para o melhoramento das previsões do clima espacial em diversas escalas temporais. Os feixes corrotantes, por exemplo, são estruturas geofísicas dominantes no vento solar durante a fase descendente do ciclo de atividade solar [Gonzalez et al., 2011], que ao interagir com feixes de velocidade lenta nas latitudes baixas, formam as Regiões de Interações Corrotantes (CIR), gerando assim, as flutuações Alfvénicas (FA) na componente norte-sul (Bz) do Campo Magnético Interplanetário (IMF) dentro do feixe. Geralmente estas FA ocorrem concomitantes aos longos períodos de contínua atividade auroral, as quais são características de ocorrência de subtempestades geomagnéticas.

Sob as condições específicas acima, os elétrons dos cinturões de radiação terrestres podem ser energizados até atingir energias relativísticas [Horne e Thorne, 2003; Baker et al., 2014]. Alguns processos de energização são propostos a partir de mecanismos de interação onda-partícula. Existem diversos mecanismos na literatura, os mais eficientes são: a interação de giro-ressonância entre as ondas de alta frequência (centenas a milhares de Hertz) e as partículas carregadas [Summers et al., 2002]; e a interação de deriva ressonante entre as ondas ULF e as partículas carregadas [Elkington 2006; Ukhorskiy et al., 2009]. No contexto dos impactos causados por CIR ao cinturão externo de radiação, as FA são transportadas em direção à magnetosfera e suas assinaturas podem ser detectadas através das características do meio interplanetário [Belcher e Davis 1971; Morton et al., 2015]. No período de CIR podem-se detectar também FA na magnetosfera a partir da detecção dos modos de polarização das ondas ULF. A detecção das ondas ULF é realizada a partir da rede de solo (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effect-IMAGE). Estas ondas ULF podem interagir ressonantemente com as partículas carregadas do cinturão externo através do mecanismo de deriva ressonante. Os modos de polarização são observados a partir dos instrumentos (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science-EMFISIS and Electric Field and Waves-EFW) a bordo da

VA Probes, conforme disponibilidade dos dados. A quantificação da eficiência deste mecanismo é realizada através do modelo empírico de coeficiente de difusão radial [Ozeke et al., 2014]. Estes modelos geralmente são expressos em função do índice Kp. Estes apresentam pouca representatividade durante subtempestades geomagnéticas, conseqüentemente, as simulações do fluxo de elétrons no cinturão possuem baixa confiabilidade [Murphy et al., 2016].

O presente trabalho selecionou todos os eventos de CIR para o período da missão VA (10/2012 a 08/2018), Alguns critérios foram estabelecidos a partir de análises detalhadas de alguns eventos de CIR, conforme mostrado na seção Exemplos. Primeiramente, foram identificados todos os períodos de HSS através da tabela do Space Weather Database of Notifications Knowledge Informations (DONKI), disponível no endereço eletrônico: <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/search/>. Selecionaram-se apenas os eventos de HSS seguidos por recobertura global do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão externo. Assim, foram selecionados 57 eventos com o intuito de estudar minuciosamente a possibilidade de se estimar os principais parâmetros do vento solar durante HSS que podem contribuir com o processo de repopulação do fluxo de elétrons relativísticos do cinturão externo. Portanto, as condições do meio interplanetário são muito importantes para identificação das variáveis do vento solar com maior representatividade deste tipo de atividade geomagnética. Para isso, são utilizados os dados do satélite Advanced Composition Explorer (ACE) orbita no ponto Lagrangeano L1. O período de repopulação para o fluxo de elétrons relativísticos no cinturão externo foi catalogado para todos os eventos de CIR. Assim, são utilizados os dados do instrumento Relativistic Electron Proton Telescope-REPT a bordo das Sondas VA. As condições IMF foram analisadas para cada evento, e a identificação dos principais parâmetros é apresentada na seção Resultados.

Resultados (estudo de caso)

A configuração do campo geomagnético na região do cinturão externo é tal que os elétrons permanecem aprisionados mesmo durante variações lentas (adiabáticas) do campo geomagnético, as quais em geral são observadas durante períodos de calma no meio interplanetário e na magnetosfera. Todavia, a conservação dos invariantes adiabáticos pode ser violada quando estas partículas experimentam a ação de distúrbios geomagnéticos que ocorrem nas mesmas escala de tempo dos movimentos das partículas, conforme exemplo mostrado na Figura 1. Observa-se diminuição do fluxo de elétrons no cinturão externo (19-21/09/2014) (Figura 1a) concomitantemente com a chegada de um HSS na magnetosfera da Terra (aumento da velocidade do vento solar no IMF (Figura 1b). O Bt e as componentes Bz (Figura 1d), Bx e By (Figura 1e) apresentam-se perturbados durante a chegada do HSS. Contudo, é importante destacar que o “dropout” descrito acima tem pouca significância quando comparado ao período de recobertura global a partir do dia 22 de setembro (Figura 1a e b), no qual o Bz permanece em média negativo e Bx By apresentam FA [Da Silva et al.,

2019]. Assim, todas as análises deste trabalho se concentram apenas nos períodos de “enhancement”.

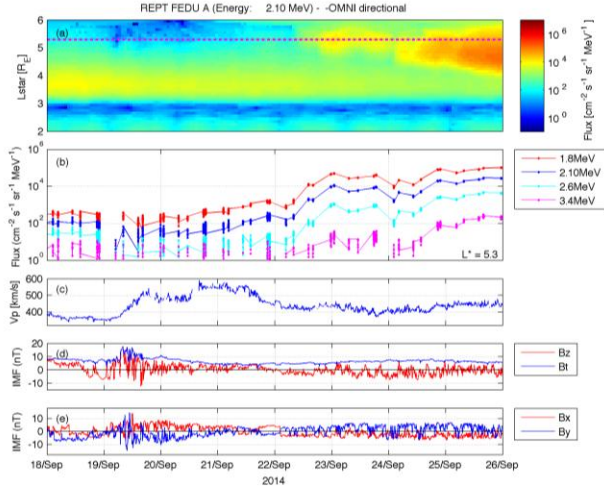


Figure 1: (a) fluxo de elétrons de 2,10 MeV em função de L-star (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) fluxos de elétrons de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV e 3,4 MeV em $L^*=5,3R_E$; (c) velocidade do vento solar (V_p); (d) Campo magnético interplanetário total (Bt) e componente Bz; (e) Bx e By.

Conhecer os modos de polarização das ondas ULF durante os eventos estudados é de suma importância para identificar os modos de polarização preferenciais durante períodos de CIR. A interação entre as ondas ULF e os elétrons de baixa energia pode ser estimada a partir do mecanismo de deriva ressonante. Este mecanismo levará a ocorrência de movimentos estocásticos das partículas individuais através de diferentes linhas equipotenciais de campo magnético, “L-shells” [Roederer 1970]. Os movimentos estocásticos e suas variações são descritos pelo terceiro invariante adiabático. A distribuição de partículas experimentando este tipo de movimento em “L Shell” deve satisfazer a equação de difusão radial abaixo:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left[\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right] - \frac{f}{\tau} \quad (1)$$

Em que f é a densidade do espaço de fase dos elétrons, assume-se que o primeiro e o segundo invariantes adiabáticos são conservados [Schulz e Lanzerotti, 1974; Ozeke et al., 2014]. O coeficiente de difusão radial e o tempo de vida dos elétrons são representados por D_{LL} e τ , respectivamente. A forma analítica do coeficiente de difusão radial D_{LL} pode ser derivada da formulação Hamiltoniana. O D_{LL} é a soma dos coeficientes de difusão devido às perturbações não correlacionadas do campo elétrico azimutal (modo poloidal) e campo magnético compressional (modo rápido), D_{LL}^E e D_{LL}^B , respectivamente [Fei et al., 2006], que podem ser expressas como segue abaixo:

$$D_{LL} = D_{LL}^E + D_{LL}^B \quad (2)$$

$$D_{LL}^E = \frac{1}{8B_E^2 R_E^2} L^6 \sum_m P_m^E(m\omega_d) \quad (3)$$

$$D_{LL}^B = \frac{M^2}{8q^2 \gamma^2 B^2 R_E^2} L^4 \sum_m m^2 P_m^B(m\omega_d) \quad (4)$$

Em que M e γ representam o primeiro invariante adiabático e o fator de correção relativístico, respectivamente, dados por:

$$M = \frac{p_{\perp}^2 L^2}{2m_e B_E} \quad (5), \quad \gamma = \left(1 - v^2/c^2\right)^{-1/2} \quad (6)$$

(As constantes B_E , R_E e q representam o campo magnético equatorial a superfície da Terra, o raio terrestre e a carga do elétron, respectivamente. A velocidade total do elétron é representada por v e a velocidade da luz por c . Os termos $P_m^E(m\omega_d)$ e $P_m^B(m\omega_d)$ representam a densidade de potência espectral (PSD) das perturbações elétrica e magnética com número de onda azimutal e frequência de onda que satisfaça a condição de deriva ressonante. A Figura 2 apresenta o coeficiente de difusão radial referente ao evento de repopulação durante período de CIR (base). A Figura 2 apresenta ainda a potência espectral das ondas ULF (topo) para a faixa de frequência entre 1-10mHz (Pc5). Observa-se que a atividade de ondas ULF inicia mais tímida no dia 22/setembro, assim como menos profunda no cinturão, enquanto, com o passar dos dias, a atividade de ondas se intensifica e se aprofunda significativamente. Observa-se ainda que o D_{LL} apresenta assinatura temporal/espacial semelhante à atividade de ondas.

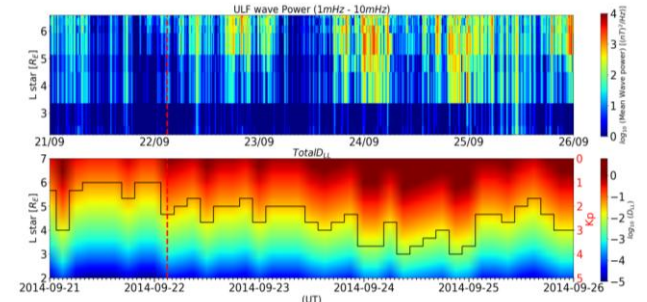


Figure 2: (topo) potência espectral calculada com os dados da rede de magnetômetros IMAGE para a faixa de frequência 1- 10 mHz (escala de cor) em função de L-shell e tempo para o período de 21-25 de setembro, 2014. (base) Coeficiente de difusão radial D_{LL} (escala de cor) em função de L-shell (eixo vertical - esquerdo) e tempo (eixo horizontal) para o período de 21-25 de setembro, 2014.

Resultados (toda Era Van Allen)

Os resultados detalhados de um evento de CIR apresentado acima mostram que existe um desafio científico de grande importância para a comunidade científica. Assim, o presente trabalho selecionou todos os eventos de CIR para o período da missão VA (10/2012 a 08/2018), conforme critérios de seleção especificados na seção Metodologia. Portanto, as condições do IMF durante todos os eventos de CIR, coincidentes com períodos de repopulação no fluxo de elétrons relativísticos do cinturão externo foram catalogados, totalizando 57 eventos. A identificação dos principais parâmetros é apresentada abaixo, conforme exemplificação a partir de 6 eventos ilustrados na Figura 3. Para cada evento tem-se: (a) fluxo de elétrons de 2,60 MeV interpolado; (b) fluxo de elétrons de 2,60 MeV em $L^*=5R_E$; (c) componentes Bx e By do campo magnético no IMF; (d) campo magnético total Bt e componente Bz.

De acordo com a Figura 3 (c) e (d) de cada evento apresentado, observa-se que as FA são predominantes durante todo o período de repopulação dos elétrons relativísticos do cinturão externo. Esta condição de Alfvénicidade corrobora para o entendimento da dinâmica da magnetocalda durante períodos de HSS, no qual é possível sugerir que exista alta atividade de injeção de

partículas de baixa energia no cinturão externo, assim como, a geração de ondas magnetohidrodinâmicas numa ampla faixa de energia. Isto fortalece a ideia de que a repopulação observada nos eventos em estudo podem ter sido aceleradas por ondas do tipo ULF, que possivelmente tem relação direta com esse período de Alfvénicidade associado à estrutura solar em questão (HSS). Portanto, os parâmetros Bx By e Bz são importantes para melhoramento da equação empírica que calcula o coeficiente de difusão radial. É importante destacar que o início das repopulações em estudo ocorre ligeiramente após a diminuição da velocidade do vento solar e uma troca de setor no meio interplanetário. Durante todo o período de repopulação o Bz apresenta-se preferencialmente Sul.

parâmetros do vento solar relacionados com o período de repopulação do cinturão externo foi realizada, mostrando que a variabilidade do campo magnético apresenta comportamento de alfvénicidade e a repopulação apresenta padrões peculiares quanto à intensidade e posicionamento do fluxo durante os eventos estudados. A troca de setor horas antes da repopulação foi observada em todos os eventos, Bz apresentou-se preferencialmente Sul e Bx By apresentaram características Alfvénicas durante todo o período de repopulação, mostrando-se como principais parâmetros para a nova equação empírica de difusão radial.

Referências

Alves, L. R., et al (2016), Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 978–987.

Baker, D. N., et al (2014), Gradual diffusion and punctuated phase space density enhancements of highly relativistic electrons: Van Allen Probes observations, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1351–1358.

Belcher, J. W.; and L. Davis Jr. (1971), Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, 2, *J. Geophys. Res.*, 76(16), 3534–3563.

Blake, J. B.; et al (1992), Identification of an unexpected space radiation hazard, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 39, no. 6, pp. 1761–1764, Dec 1992.

Bortnik, J.; R.M. Thorne (2007), The dual role of ELF/VLF chorus waves in the acceleration and precipitation of radiation belt electrons, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 69, Issue 3, Pages 378–386, ISSN 1364-6826.

Da Silva, L. A., et al (2019). Contribution of ULF wave activity to the global recovery of the outer radiation belt during the passage of a high speed solar wind stream observed in September 2014. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124.

Elkington, S. R. (2006), A review of ULF interactions with radiation belt electrons, in *Magnetospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 169, edited by T. Kazue, P. J. Chi, and R. E. Denton, pp. 177–194, AGU, Washington, D. C.

Fei, Y.; et al (2006), Radial diffusion and MHD particle simulations of relativistic electron transport by ULF waves in the September 1998 storm, *J. Geophys. Res.*, 111, A12209.

Gonzalez, W. D.; et al (2011), Interplanetary Origin of Intense, Superintense and Extreme Geomagnetic Storms, *Space Sci Rev.*, 158: 69–89.

Horne, R. B. and R. M. Thorne (2003), Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler-mode chorus, *Geophys. Res. Lett.*, 30.

Morton, R. J.; Tmczyk, S.; Pinto, R. (2015), Investigating Alfvénic wave propagation in coronal open-field regions. *Nature Communications* 6, Article number: 7813.

Murphy, K. R.; et al (2016), Accurately characterizing the importance of wave-particle interactions in radiation belt dynamics: The pitfalls of statistical wave representations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 7895–7899.

Northrop, T. G. and Teller, E. (1960), Stability of the Adiabatic Motion of Charged Particles in the Earth's Field, *Phys. Rev.* 117, (1), 215–225.

Ozeke, L. G.; I. R. Mann; K. R. Murphy; I. Jonathan Rae and D. K. Milling (2014), Analytic expressions for ULF wave radiation belt radial diffusion coefficients, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 1587–1605.

Roederer, J. G., (1970), Dynamics of geomagnetically trapped radiation, in *Physics and Chemistry in Space*, vol. 2, edited by J. G. Roederer and J. Zahringer, 166 pp., Springer, Berlin.

Schulz, M. and L.J. Lanzerotti (1974), *Particle Diffusion in the Radiation Belts, Physics and Chemistry in Space*, vol. 7, 215 pp., Springer-Verlag, New York.

Summers, D.; et al (2002), Model of the energization of outer-zone electrons by whistler-mode chorus during the October 9, 1990 geomagnetic storm, *Geophys. Res. Lett.*, 29(24), 2174.

Ukhorskiy, A. Y.; et al (2009), Radial transport of radiation belt electrons due to stormtime Pc5 waves, *Ann. Geophys.*, 27, 2173–2181.

Ukhorskiy, A.Y. and Sitnov, M.I. (2013), Dynamics of Radiation Belt Particles, *Space Sci. Rev.* 179: 545.

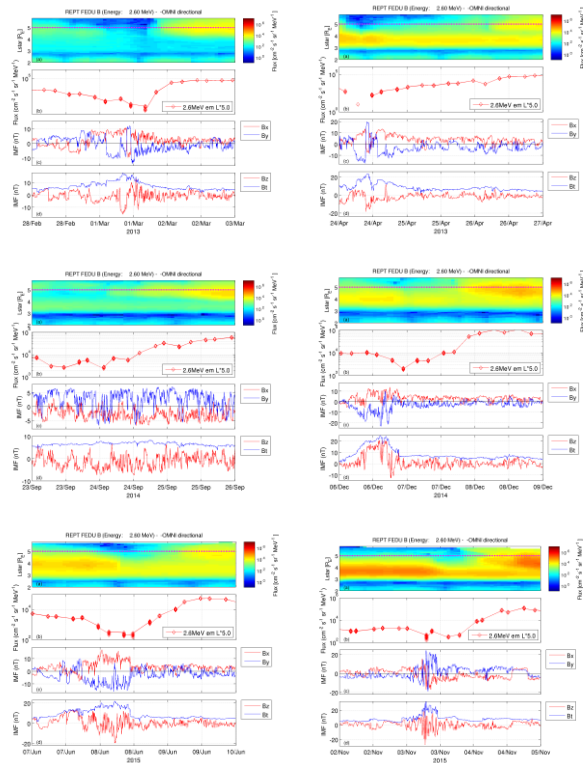


Figura 3: Para cada evento é apresentado: (a) fluxo de elétrons de 2,60 MeV interpolado; (b) fluxo de elétrons de 2,60 MeV em Lstar = 5 RE; (c) Componentes Bx e By do campo magnético no meio interplanetário; (d) Campo magnético total Bt e Componente Bz do campo magnético.

Conclusões

Os resultados mostraram que durante a fase da CIR foi detectado diminuição do fluxo de elétrons em mais de 90% dos eventos, enquanto durante a fase FA foi detectado “enhancement” em mais de 90% dos eventos, conduzindo as análises apenas para períodos de repopulação. A partir do estudo detalhado de um evento de CIR apresentado nas Figuras 1-2, concluiu-se que realmente o modelo de coeficiente de difusão radial não estima a potencialidade da ressonância entre ondas ULF e partículas durante processos de repopulação no cinturão externo. Assim, conclui-se ainda a grande importância em estimar uma nova equação a partir dos parâmetros do vento solar, conforme identificado nos eventos estudados. A identificação dos principais