



## CRITÉRIO PARA IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS DE HILDCAA/HILDCAA\* BASEADO EM ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS.

*Isabelle Cristine Pellegrini Lamin, Virgínia Klausner de Oliveira, Arian Ojeda González, Alan Prestes.*

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, isa\_lamin@hotmail.com, viklausner@gmail.com, ojeda.gonzalez.a@gmail.com, aprestes@gmail.com.

**Resumo** - Neste artigo, há um estudo sobre os eventos de Atividade Contínua do Índice AE (Eletrojato auroral), de Grande Intensidade e Longa Duração, HILDCAAs/HILDCAAs\* por meio do algoritmo via MATLAB, entre os anos de 1998 e 2007 desenvolvido por Prestes et al. (2017). O objetivo é estudar e detectar os eventos descartados por Prestes et al. (2017), denominados aqui HILDCAA\*?, a partir da restrição de alguns critérios que definem o fenômeno. Nosso interesse é fazer uma revisão da metodologia, aplicando a flexibilização do índice Dst, durante a fase de recuperação de tempestade geomagnética, a fim de verificar os candidatos à HILDCAA\* descartados. Além de futuramente aplicar o mesmo método no período de 2008 a 2017 para concluir a análise do 23º ciclo solar. Ademais, comprovar a relação prevista entre HILDCAA\* e HILDCAA\*? com CIR (feixes rápidos corrotantes), devido ao acoplamento do Sol-Meio Interplanetário-Magnetosfera.

**Palavras-chave:** HILDCAA, HILDCAA\*, Vento solar, Tempestade geomagnética, CIR.

**Área do Conhecimento:** Geociências.

### Introdução

A atmosfera é composta por uma faixa de gases, constituída predominantemente de Nitrogênio e Oxigênio; minoritariamente também é constituída de Neônio, Argônio, Hélio, Ozônio e Dióxido de Carbono. Conforme a estrutura eletromagnética da atmosfera, ela se divide em Ionosfera e Magnetosfera. A ionosfera compreende a camada que contém partículas eletricamente carregadas, como íons e elétrons livres, e se localiza entre 90 e 1000 km acima do nível do mar. Enquanto que a magnetosfera corresponde à forma geométrica que adota o campo magnético do planeta ao ser moldado pela pressão cinética e a pressão magnético do vento solar (GONZALEZ et al., 1989).

O planeta Terra está inserido no meio interplanetário, e conseqüentemente está sujeito a diversas radiações, provenientes do espaço. A atmosfera tem papel fundamental na proteção da superfície terrestre e seres que nela habitam. A região de plasma ionizado e o campo magnético atuam como escudo protetor contra a penetração de radiação, fundamentalmente de alta frequência (por exemplo, raios gama, raios X mole, radiação ultravioleta) e partículas (prótons e elétrons, e íons) na Terra (GUARNIERI et al., 2005). Dessa forma, a Terra possui uma espécie de envoltório contra as variações bruscas das condições do meio interplanetário, e através da magnetosfera, onde partículas carregadas são controladas pelo campo geomagnético, a maior parte das partículas energéticas que chegam ao planeta é desviada. Por outro lado, no meio interplanetário, a atividade solar controla o fluxo de partículas e energia para dentro da magnetosfera. Alia-se ao contexto, a existência de manchas solares, regiões de campos magnéticos turbulentos onde se originam as explosões solares.

Alguns pesquisadores observaram a forte interação que existe entre a magnetosfera terrestre e o vento solar (MURISON et al., 1985; AMM et al., 2005; HAJRA et al., 2013). Concluiu-se que as variações de densidade, temperatura e velocidade do vento solar, aliado ao campo magnético interplanetário ocasionam distúrbios na magnetosfera, como mencionado em Prestes et al., (2017). Quando uma tempestade solar muito forte, com índice Dst  $\leq$  -100 nT, (mais adiante este índice será explicado) atinge a Terra, ocorre penetração de partículas na magnetosfera, e quando estas se chocam com a atmosfera produzem um efeito de luzes mais conhecido como aurora boreal (no hemisfério norte) e aurora austral (no hemisfério sul). Todavia, quando há erupções solares com ejeções de massa coronal emitido pelo Sol atingindo o campo geomagnético, geralmente ocorre as Tempestades Geomagnéticas. As duas principais fontes responsáveis pelas variações geomagnéticas ao longo do ciclo solar incumbidas por tempestades são as ejeções de massa coronal

ou ICMEs (*Interplanetary Coronal Mass Ejections*), que por sua vez ocorrem durante a atividade solar máxima e na fase ascendente do ciclo solar, quando há elevado número de manchas solares; e os feixes rápidos de vento solar corrotantes ou CIR (*Corotating Interaction Regions*), que ocorrem próximo da atividade solar mínima e na fase descendente do ciclo solar, ou seja, na quase ausência de manchas solares.

A tempestade geomagnética possui quatro fases, sendo elas denominadas - início súbito, fase inicial, fase principal e fase de recuperação. O início súbito caracteriza-se pelo aumento da pressão dinâmica, na qual as partículas de vento solar comprimem a magnetosfera, durando poucas horas. Essa perturbação intensifica o sistema de correntes que fluem na magnetosfera causando um aumento do campo magnético medido na superfície, caracterizando a fase inicial da tempestade. A fase principal compreende a redução da intensidade do campo magnético na superfície terrestre, ao longo de algumas horas devido à energização da Corrente de Anel através do processo de reconexão na magnetosfera diurna, no qual se cria um campo magnético com sentido oposto ao do campo geomagnético terrestre. E por fim, a fase de recuperação apresenta a diminuição e eliminação gradual da pressão com o campo magnético retornando às condições normais, e conseqüente perda energética da Corrente de Anel.

Com base nesses conceitos, findou-se que as atividades solares supracitadas causam danos como, por exemplo, fortes descargas elétricas nos cabos de transmissão da rede elétrica podem mudar a altura, retardar ou modificar a órbita dos satélites, degradação do sinal de GPS e outros sistemas de navegação, entre outros efeitos.

Um fenômeno que ocorre no campo geomagnético que recentemente vem sendo estudado são as HILDCAAs (*High Intensity Long Duration Continuous AE Activity*) ou Atividade Contínua do Índice AE (Eletrojato Auroral), de Grande Intensidade e Longa Duração (TSURUTANI e GONZALEZ., 1987); e as variações que o descreve. Esse evento passou a ser identificado através da análise de tempestades geomagnéticas que tinham um período de recuperação muito mais longo que o habitual (mais de dois dias), com registros intensos e contínuos do índice AE ( $AE > 800$  nT), devido à ocorrência e recorrência de CIRs.

### Definições de grandezas geomagnéticas

Para analisar os eventos HILDCAAs e HILDCAAs\*, precisa-se averiguar se estes atendem aos critérios estabelecidos em Tsurutani e Gonzalez et al.,(1987), que os definem tais como: os valores de pico do índice AE devem exceder 1000 nT pelo menos uma vez; a duração do evento deve ser superior ou igual a dois dias; o índice AE não pode registrar valores menores do que 200 nT durante intervalos maiores que duas horas de cada vez; e deve ocorrer fora da fase principal de tempestades geomagnéticas. Ademais, seguem alguns fatores que também influenciam no sucesso do evento analisado, porém em menor proporção: variação do índice SYM-H deve ser moderada, não passando de -50 nT; e flutuações da componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário em torno de zero com amplitudes entre  $\pm 10$  nT. Portanto, para entender os critérios supracitados, segue abaixo a definição dos índices magnéticos que contribuem para a análise de HILDCAAs e HILDCAAs\*.

A intensidade das variações geomagnéticas pode ser descrita por meio destes indicadores, conforme sua característica e influência em latitude. Observa-se que a Corrente de Anel tem maior influência em baixas e médias latitudes, enquanto que as correntes ionosféricas aurorais em altas latitudes. A seguir, os índices Aurorais e Índice Dst serão descritos, e como também, uma breve descrição dos demais índices existentes será dada (MURISON et al.,1985; AMM et al.,2005). Os índices aurorais compreendem o AE, AU e AL. O índice AE, eletrojato auroral, é obtido através dos valores da componente H medidos por estações magnéticas em regiões aurorais localizadas em diferentes longitudes do hemisfério norte. Estes valores se relacionam à intensidade da corrente oval auroral, ou seja, estão relacionados à atividade global dos eletrojetos aurorais. Estes índices são acentuados quando há expansão da corrente oval auroral em direção ao equador. Os índices AU e AL compreendem os maiores e menores valores dos dados de todas as estações em ofício da hora universal (UT) (GUARNIERI et al.,2005). Dessa forma, a diferença AU menos AL resulta no índice AE, enquanto que a média de AU e AL resulta no AO, medida da corrente zonal equivalente (IYEMORI et al., 2000; TASCIONE et al.,1988).

O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) monitora o nível de atividade geomagnética - variações da Corrente de Anel equatorial; sendo obtido através da média do campo magnético de estações

localizadas em médias e baixas latitudes. A linha base de referência do Dst seleciona os cinco dias mais calmos de cada mês, e posteriormente, esta linha base é excluída por não se adequar ao propósito nível de distúrbios do campo geomagnético. Também são excluídas do índice Dst a variação secular e a variação do equador do dipolo. Na maioria dos casos, quanto mais negativo o Dst, mais intensa é a tempestade geomagnética, devido a intensificação da Corrente de Anel que flui na direção leste-oeste no plano equatorial. A Corrente de Anel surge devido à ação diferencial de íons (leste-oeste) e elétrons (oeste-leste), que geram uma corrente leste-oeste. Esse efeito se intensifica com o aumento de partículas aprisionadas em regiões de órbitas geossíncronas (6,6 raios terrestres) durante as tempestades geomagnéticas. Além disso, o índice SYM-H derivativo do índice Dst, consegue representar melhor as variações da pressão do vento solar na magnetosfera devido sua melhor resolução temporal (IYEMORI et al., 2000).

Dando prosseguimento ao estudo, é preciso examinar os critérios que definem HILDCAA\* para analisar se há diferença nas condições do meio interplanetário para os dois eventos em questão. Com base no método utilizado por Prestes et al., (2017) na identificação de episódios HILDCAAs\*, seguem os fatores que definem HILDCAA\*: os valores de pico de alta intensidade devem exceder 1000 nT pelo menos uma vez em cada evento; a duração do evento deve ser de até dois dias pelo menos; o índice AE não pode registrar menos que 200 nT por períodos maiores que quatro horas de cada vez; e deve ocorrer fora da fase principal de tempestades geomagnéticas.

Dessa forma, o artigo objetiva continuar a análise de dados de HILDCAA e HILDCAA\*, pautado no trabalho realizado por Prestes et al. (2017), o qual se fundamenta nos critérios utilizados para detecção dos eventos estabelecidos por Tsurutani e Gonzalez (1987). Para facilitar essa identificação, Prestes et al. (2017) elaboraram um algoritmo para encontrar os eventos HILDCAAs e HILDCAAs\*. Ademais, eles restringiram alguns critérios de HILDCAA, definindo-se HILDCAA\*, que por sua vez, demonstrou ser o mesmo fenômeno que HILDCAA, o que aumentou consideravelmente o número de eventos a serem estudados. Também, Prestes et al. (2017) registraram e detalharam sobre todos os eventos HILDCAAs e HILDCAAs\* ocorridos entre 1998 e 2007.-

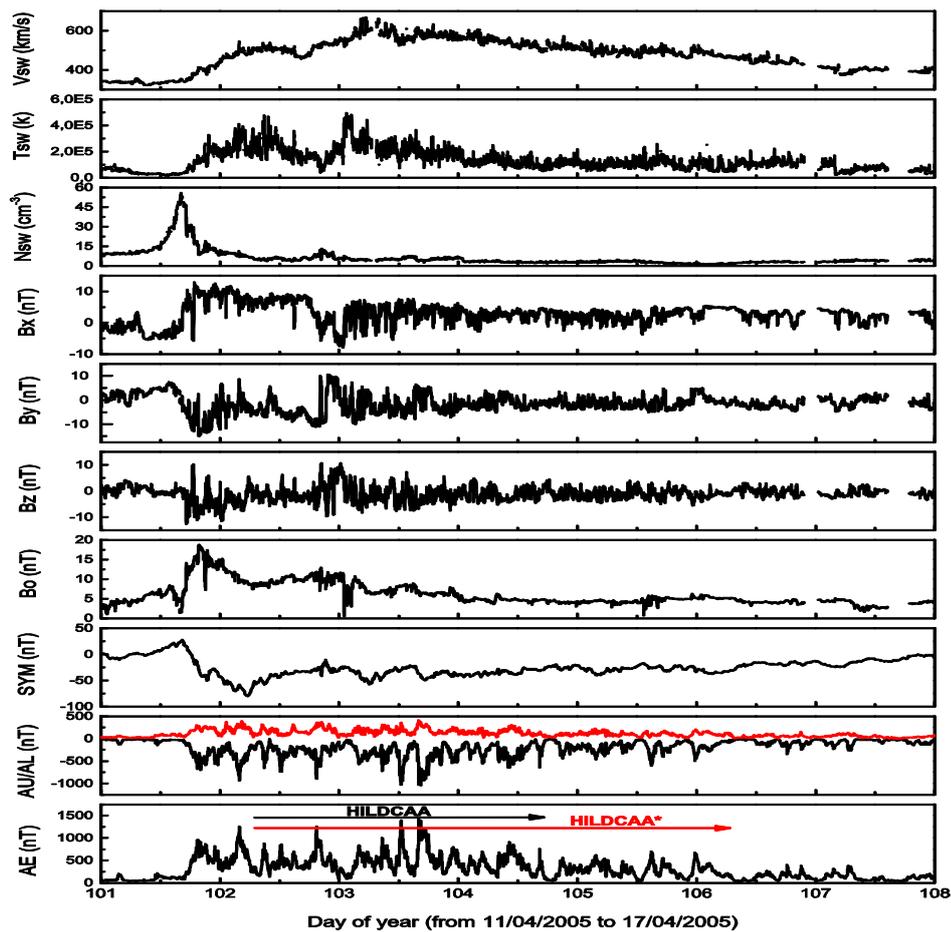
## Metodologia

Prestes et al., (2017) desenvolveram um programa no MATLAB para auxiliar na localização de eventos, cuja ferramenta foi utilizada para os testes realizados pelos autores neste artigo. O código criado identifica intervalo de eventos de AE de alta intensidade, longa duração e atividade contínua. Porém, a programação não é completamente autossuficiente, pois deve haver uma inspeção visual por parte do pesquisador para verificar se o intervalo encontrado está incluso na fase principal da tempestade geomagnética. Em caso positivo, remove-se este intervalo dos eventos e recomeça o processo de validação. Depois de constatados os eventos HILDCAAs, modifica-se o algoritmo para identificar os eventos HILDCAAs\*. De acordo com a relação entre HILDCAA e CIR, identificam-se eventos de CIR usando lista de regiões de interação de fluxo de vento solar. A comparação entre os parâmetros do vento solar da HILDCAA/HILDCAA\* permite identificar que os dois fenômenos em questão se referem a um mesmo evento, com base nos cálculos e comportamentos dos índices geomagnéticos e do vento solar com a magnetosfera, representando o nível de distúrbio na magnetosfera terrestre. Dessa forma, os parâmetros interplanetários referentes às condições do vento solar interplanetário, utilizados na análise são: velocidade do vento solar ( $V_{sw}$ ); densidade do plasma ( $N_{sw}$ ); temperatura ( $T_{sw}$ ); variação da pressão ( $P_{sw}$ ); magnitude de campo magnético interplanetário ( $B_0$ ); Componentes do campo magnético interplanetário em Coordenada GSM ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ); Índices Aurorais (AE, AU, AL e AO); Índice magnético com alta resolução temporal, de baixas e médias latitudes (SYM-H); e Índice magnético com baixa resolução temporal, de baixas e médias latitudes (Dst). À vista disso, tem-se a imagem de um exemplo do evento HILDCAA/HILDCAA\* na Figura 1, em consonância com os parâmetros que os determinam, a fim de identificar os dados dos eventos estudados.

A Figura 2 ilustra o fluxograma do código que identifica HILDCAAs/HILDCAAs\* no MATLAB. Este código recebe o valor do índice AE como entrada com resolução de um minuto para um ano de dados. Em seguida, verificam-se quais pontos deste índice se encaixam no primeiro critério de definição de HILDCCA, ou seja, quais pontos excedem o valor de 1000 nT (AEC). Em caso positivo, o código percorre os dois lados do AE a partir do pico armazenado no AEC, e se o AE não registrou valores menores que 200 nT por duas horas consecutivas, ou seja, por 120 pontos consecutivos,

salva-se o candidato como possível evento HILDCAA. Passando por estas avaliações o algoritmo prossegue averiguando se esse candidato à HILDCAA dura cerca de 2880 pontos ou mais, caso contrário, ele é descartado. Diante dos resultados encontrados, chega-se na parte de inspeção visual, em que há necessidade de análise dos dados para constatar se o candidato salvo se encontra dentro da fase principal de uma tempestade geomagnética. Em caso negativo, tem-se um evento HILDCAA, enquanto que se for confirmado este tipo de distúrbio geomagnético, a fase principal da tempestade é removida do candidato, e este retorna ao processo de validação. Por outro lado, o mesmo fluxograma se encaixa na detecção de HILDCAA\*, todavia, com a modificação do critério de permanecer abaixo de 200 nT por mais de 240 pontos consecutivos. A partir das datas dessas ocorrências verificam-se os comportamentos dos parâmetros que caracterizam e/ou causam o evento como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Evento HILDCAA conforme parâmetros interplanetários do vento solar.



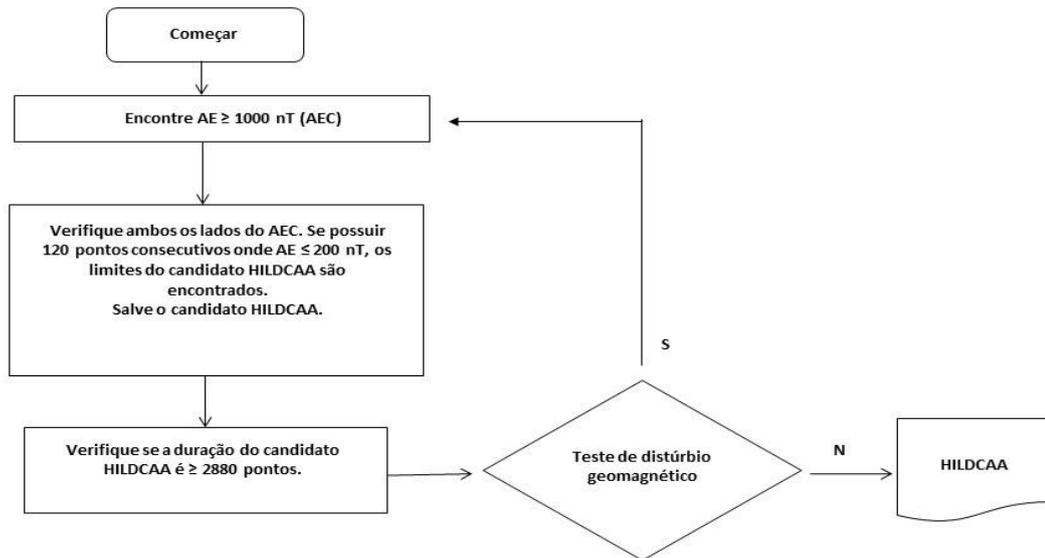
Fonte: Prestes et al. (2017).

Tabela 1- Quantidade de eventos HILDCAA/HILDCAA\*/HILDCAA\*? entre 1998 e 2007

Fenômeno	Registros de fenômenos por Ano									
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
HILDCAA	1	4	4	2	1	12	6	6	3	6
HILDCAA*	5	10	10	7	8	26	20	13	11	14
HILDCAA*?	1	18	9	6	7	3	13	5	8	3

Fonte: Prestes et al. (2017).

Figura 2 – Fluxograma de detecção de evento HILDCAA.



Fonte: Prestes et al. (2017).

## Resultados

O algoritmo para identificar os HILDCAAs\* foi executado, novamente, porém com uma maior flexibilidade, desta vez para identificar os possíveis candidatos (HILDCAA\*?). Em outras palavras, os falsos positivos do código, descartados por Prestes et al. (2017). Ademais, os eventos HILDCAAs\* apresentados por Prestes et al. (2017) desconsideravam todos os eventos HILDCAAs\*, que mesmo dentro da fase recuperação registravam valores abaixo de -50 nT para o índice Dst. Neste artigo, constam os dados preliminares dos eventos falsos positivos encontrados ao efetuar o código, denominados pela sigla “HILDCAA\*?”, na última linha da Tabela 1. Portanto, a partir destes resultados, os eventos serão novamente avaliados para verificar se eles correspondem aos critérios do HILDCAA\*. E por fim, se estão relacionados com HSS/CIR, caso contrário, se ocorreu outra tempestade geomagnética, estes eventos são descartados.

Devido a maior flexibilização dos critérios adotados por Prestes et al. (2017) e utilizando o mesmo código apresentado por Prestes et al. (2017), identificou-se o maior número de possíveis eventos à HILDCAAs\* que foram descartados entre o período de 1998 a 2007, como consta na Tabela 1. De acordo com a quantidade de fenômenos detectados por ano, verifica-se que há necessidade de avaliação da origem destes eventos, pois podem mais uma vez estarem relacionados como consequências dos mesmos efeitos do campo geomagnético terrestre (CIR), visto que eles apenas apresentaram uma pequena flutuação acerca dos valores do índice Dst. Ou ainda, representariam outra ocorrência dentro da fase de recuperação da tempestade geomagnética, sendo um dos critérios adotados por Tsurutani et al. (1987).

Verifica-se que na literatura (GUARNIERI et al., 2005; HAJRA et al., 2013; TSURUTANI et al., 1987) ainda há divergências com relação ao último critério da HILDCAA, desta forma, há necessidade de maior abordagem para concluir se as HILDCAAs\*? também se assemelham ao fenômeno HILDCAA, já que foram descartados muitos candidatos (HILDCAAs\*?) devido a rigidez do critério utilizado por Prestes et al. (2017).

## Conclusão

Diante da explanação do fenômeno HILDCAA\*? e dos resultados obtidos pela flexibilização dos critérios do algoritmo estabelecido em Prestes et al. (2017), conclui-se que as HILDCAAs\*? respeitam os seguintes critérios: os valores de pico de alta intensidade devem exceder 1000 nT pelo menos



uma vez em cada evento; a duração do evento deve ser de até dois dias pelo menos; o índice AE não pode registrar menos que 200 nT por períodos maiores que quatro horas de cada vez; e ocorrem dentro da fase de recuperação.

Quanto ao algoritmo utilizado na detecção dos eventos examinados via MATLAB, este possibilitou anotações detalhadas acerca da ocorrência de HILDCAAs\*?. Apesar da praticidade gerada pelo programa, este não é autossuficiente, logo, há necessidade de exclusão dos eventos falsos que se encaixam na programação, como explicado na seção Metodologia. O intuito das próximas análises será também aprimorar a programação utilizada, com a intenção de tornar o código automático, sem necessidade de inspeção visual.

Portanto, com base na discussão acima e partindo dos resultados disponíveis na Tabela 1, o objetivo será verificar as características entre os eventos HILDCAAs\*? com os demais, a fim de constatar futuramente se os mesmos podem ser considerados HILDCAA e/ou HILDCAA\*, e por fim, se pertinente, correlacioná-los aos efeitos de HSS/CIR, como abordado em Prestes et al. (2017). Além disso, prosseguir os estudos dos eventos HILDCAA/HILDCAA\*, analisando os anos de 2008 a 2017, para listar todos os eventos dentro de um ciclo solar completo, 23º ciclo solar. E continuar estudando os casos de HILDCAAs\*? neste novo período.

### Agradecimentos

E, I.C.P. Lamin agradece ao CNPq/PIBIC, processo nº 129109/2017-7 e projeto nº 800963/2016-4.

### Referências

AMM, O.; DONOVAN, E.F.; FREY, H.; LESTER, M.; NAKAMURA, R.; WILD, J.A.; AIKIO, A.; DUNLOP, M.; KAURISTIE, K.; MARCHAUDON, A.; MCCREA, I.W.; OPGENOORTH, H.J.; STROMME, A. Coordinate studies of the geospace environment using Cluster, satellite and ground-based data: an interim review. **Ann. Geophys.** 23 (6), p. 2129-2170, 2005.

GONZALEZ, W.D.; JOSELYN, J.A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H.W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B.T.; VASYLIUNAS, V. M. Why is a geomagnetic storm. **J. Geophys. Res.** 99 (A4), p. 5771-5792, 1994.

GUARNIERI, F.L. Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral contínua e de longa duração. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – INPE, São José dos Campos, 2005.

HAJRA, R.; ECHER, E.; TSURUTANI, B.T.; GONZALEZ, W.D. Solar cycle dependence of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events, relativistic electron predictors. **J. Geophys. Res. Space phys.** 118 (9), p. 5626-5638, 2013.

IYEMORI, T.; ARAKI, T.; KAMEI, T.; TAKEDA, M. Mid-latitude Geomagnetism Indices “ASY” and “SYM” for 1999 (Provisional), Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Graduate School of Science, Kyoto University, 1999.

MURISON, M.; RICHMOND, A.D.; MATSUSHITA, S.; BAUMJOHANN, W. Estimation of ionospheric electric fields and currents from a regional magnetometer array. **J. Geophys. Res.** 90 (A4), p. 3525-3530, 1985.

PRESTES, A.; KLAUSNER, V.; GONZALEZ, A.O.; SERRA, S.L. Statistical analysis of solar wind parameters and geomagnetic indices during HILDCAA/HILDCAA\* occurrences between 1998 and 2007. **Adv Space Res.** 60 (8), p. 1850-1865, 2017.

TASCIONE, T.F. Introduction to the space environment. Printed and Published by Orbit Book Company, INC, 2005.

TSURUTANI, B.T.; GONZALEZ, W.D. The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA)- Interplanetary Alfvén wave trains. **Planet. Space Sci.** 35, p. 405-412, 1987.