

INVESTIGAÇÃO DE PERÍODO GEOMAGNÉTICO COMPLEXO ENVOLVENDO TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA E EVENTO HILDCAA

Autores: Gabriela de Almeida Santos Moraes, Virgínia Klausner.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, gabrielamoraes.univap@gmail.com, viklausner@gmail.com.

Resumo

Este trabalho analisa a dinâmica do ambiente geoespacial entre 17 e 24 de agosto de 2017, com objetivo de investigar tempestades geomagnéticas e avaliar a ocorrência de eventos HILDCAAs. Para isso, utilizou-se o programa Hilda, com análise de parâmetros interplanetários e índices geomagnéticos, a fim de verificar a influência de ejeção de massa coronal (CME) e de feixes rápidos do vento solar associados a regiões de interação de feixes (HSS/SIR) na magnetosfera terrestre. Os resultados mostram que entre os dias 17 e 21 a Terra estava sobre a influência de HSS/SIR, responsável por uma tempestade geomagnética moderada (19/08, índice Dst= -51nT), associada a um evento HILDCAA. Já nos dias 22 e 23 foi identificada nova perturbação que, embora apresentasse características de um evento HILDCAA, não pôde ser classificada como tal por ocorrer durante a fase principal de uma tempestade (causada por CME), contrariando critério estabelecido por Tsurutani e Gonzalez (1987).

Palavras-chave: Tempestade geomagnética. HILDCAA. CME. HSS/SIR.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra.

Introdução

Eventos de origem solar e seus impactos no ambiente espacial e na Terra são alvos de inúmeros e constantes estudos na comunidade científica (Gorney, 1990; Schwenn, 2006; Nandy et al. 2021). Entre os fenômenos que ocorrem no Sol, podemos destacar as Ejeções de Massa Coronal (*Coronal Mass Ejection*- CME) e Feixes Rápidos de Vento Solar (*High Speed Streams*- HSS).

As CMEs são nuvens de plasma e campo magnético ejetadas da coroa solar para o espaço interplanetário, podendo liberar até bilhões de toneladas de matéria. Às vezes estão associadas a explosões solares, mas também podem ocorrer de forma independente (NASA, 2015). Os HSS, originados nos buracos coronais (Mullan, 2010), ao se propagarem pelo meio interplanetário, encontram ventos solares mais lentos provenientes de outras partes do Sol e a interação entre eles resulta em uma região de aumento significativo da densidade de plasma e intensificação do campo magnético interplanetário, conhecida como Região de Interação de Feixes (*Stream Interaction Region* – SIRs). Quando chegam à Terra, esses fenômenos causam distúrbios no ambiente terrestre.

As tempestades geomagnéticas são episódios de perturbação na magnetosfera terrestre, caracterizados por flutuações intensas no campo magnético do planeta. Esses fenômenos ocorrem devido à injeção de partículas energéticas na magnetosfera, resultante da interação prolongada entre o vento solar e o campo magnético da Terra (Gonzalez et al., 1994). O índice Dst (*Disturbance Storm Time*) é o principal parâmetro para monitorar as tempestades geomagnéticas e representa uma medida da intensidade da corrente de anel. A corrente de anel flui para oeste ao redor da Terra, centrada no plano equatorial em altitudes entre 2 e 9 raios terrestres, formada por partículas originadas no vento solar e na ionosfera terrestre (Daglis et al., 1999). Durante atividade geomagnética ocorre o fortalecimento dessa corrente, o que gera um campo magnético de sentido oposto ao campo principal da Terra, resultando em uma queda do índice Dst. Por isso, as tempestades podem ser classificadas como fraca ($-50 \leq Dst \leq -30 \text{ nT}$), moderada ($-100 \leq Dst \leq -50 \text{ nT}$), intensa ($-200 \leq Dst \leq -100 \text{ nT}$) e super intensa ($Dst \leq -250 \text{ nT}$).

Os eventos HILDCAA (*High-Intensity, Long-Duration, Continuous AE Activity*) foram inicialmente caracterizados por Tsurutani e Gonzalez (1987) durante a análise de tempestades geomagnéticas com fases de recuperação prolongadas, nas quais o índice Dst permanecia alterado por dias ou até semanas. Nessas ocasiões, observava-se uma atividade intensa e prolongada no índice AE (*Auroral*

Electrojet). Para que um evento fosse classificado como HILDCAA, os autores propuseram critérios específicos, incluindo: picos do índice AE iguais ou superiores a 1000 nT; duração mínima de dois dias; ausência de valores do índice AE abaixo de 200 nT por mais de duas horas consecutivas; e ocorrência do evento fora da fase principal das tempestades geomagnéticas.

Posteriormente, Koga et al. (2011) sugeriram critérios complementares, como a exigência de que o índice SYM-H apresentasse apenas variações moderadas (sem ultrapassar -100 nT), a presença de aumentos na velocidade do vento solar relacionados a HSSs e flutuações da componente Bz do campo magnético interplanetário (IMF) em torno de zero, com amplitudes típicas de ± 10 nT.

No entanto, conforme discutido por Guarnieri (2005), o critério relacionado ao índice AE permanecer acima de 200 nT mostrou-se particularmente restritivo. Por esse motivo, diversos estudos posteriores, como o de Prestes et al. (2017), adotaram como uma nova condição: a não ocorrência de valores de AE inferiores a 200 nT por mais de quatro horas consecutivas, visando maior flexibilização na delimitação temporal dos eventos HILDCAA.

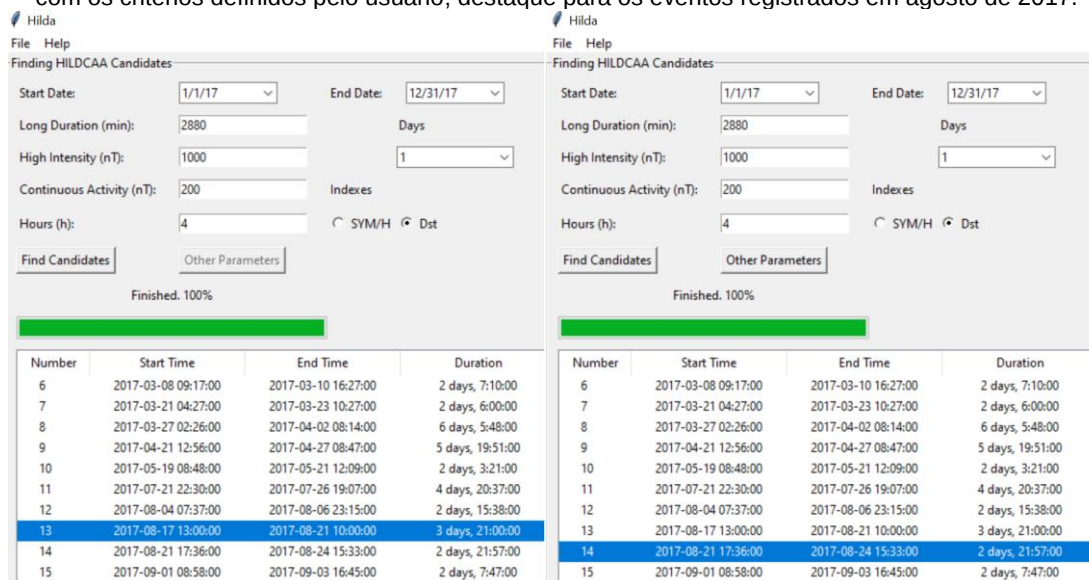
Este estudo tem como objetivo caracterizar a dinâmica do ambiente geoespacial entre 16 e 26 de agosto de 2017, investigando a ocorrência de tempestades geomagnéticas e avaliando se as condições observadas correspondem ou não a um evento do tipo HILDCAA. Para isso, utilizou-se o programa Hilda, com análise de parâmetros interplanetários e índices geomagnéticos, a fim de verificar a influência de CME e HSS/SIR na magnetosfera terrestre.

Metodologia

A identificação do período de estudo foi realizada através do Hilda, um *software* elaborado para identificar a ocorrência de eventos HILDCAA, que permite relaxar ou restringir os critérios propostos por Tsurutani e Gonzalez (1987) e identificar um possível evento pela inspeção visual das condições do meio interplanetário (Macedo, 2022). Após obtenção e processamento dos dados dos parâmetros do meio interplanetário obtidos no site OMNIWeb, o programa habilita diversas opções na interface, incluindo calendários para selecionar o intervalo de datas e caixas de texto para ajustar os critérios de identificação do evento HILDCAA.

Diante da lista de candidatos exibida pelo programa, o usuário pode selecionar a data desejada e gerar gráficos dos índices geomagnéticos AE e SYM-H (ou Dst) e dos parâmetros do vento solar e da componente Bz do IMF. O interesse pelo período de estudo deve-se à identificação da possibilidade de dois eventos HILDCAA subsequentes, conforme Figura 1.

Figura 1- Interface do programa HILDA exibindo a lista de possíveis eventos HILDCAA identificados de acordo com os critérios definidos pelo usuário; destaque para os eventos registrados em agosto de 2017.



Number	Start Time	End Time	Duration
6	2017-03-08 09:17:00	2017-03-10 16:27:00	2 days, 7:10:00
7	2017-03-21 04:27:00	2017-03-23 10:27:00	2 days, 6:00:00
8	2017-03-27 02:26:00	2017-04-02 08:14:00	6 days, 5:48:00
9	2017-04-21 12:56:00	2017-04-27 08:47:00	5 days, 19:51:00
10	2017-05-19 08:48:00	2017-05-21 12:09:00	2 days, 3:21:00
11	2017-07-21 22:30:00	2017-07-26 19:07:00	4 days, 20:37:00
12	2017-08-04 07:37:00	2017-08-06 23:15:00	2 days, 15:38:00
13	2017-08-17 13:00:00	2017-08-21 10:00:00	3 days, 21:00:00
14	2017-08-21 17:36:00	2017-08-24 15:33:00	2 days, 21:57:00
15	2017-09-01 08:58:00	2017-09-03 16:45:00	2 days, 7:47:00

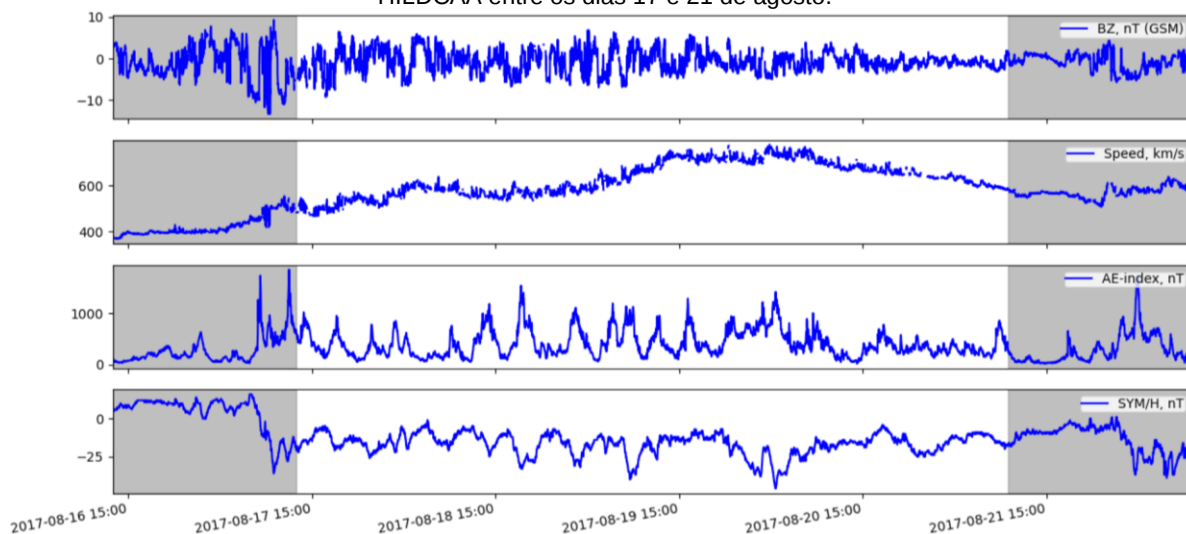
Fonte: o autor.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

A Figura 2 apresenta os gráficos associados ao primeiro candidato (17 a 21 de agosto). O painel superior mostra a componente Bz do campo magnético interplanetário oscilando entre ± 10 nT. O segundo painel exibe o aumento da velocidade do vento solar, atingindo valores superiores a 600 km/s, característica típica de HSS. O terceiro painel apresenta o índice AE, que registra variações ultrapassando 1000 nT várias vezes indicando atividade significativa na região auroral. Por fim, o índice SYM-H (painel inferior) mostra uma resposta moderada da corrente de anel, permanecendo acima de -100 nT. Todas essas características estão de acordo com a definição de um evento HILDCAA.

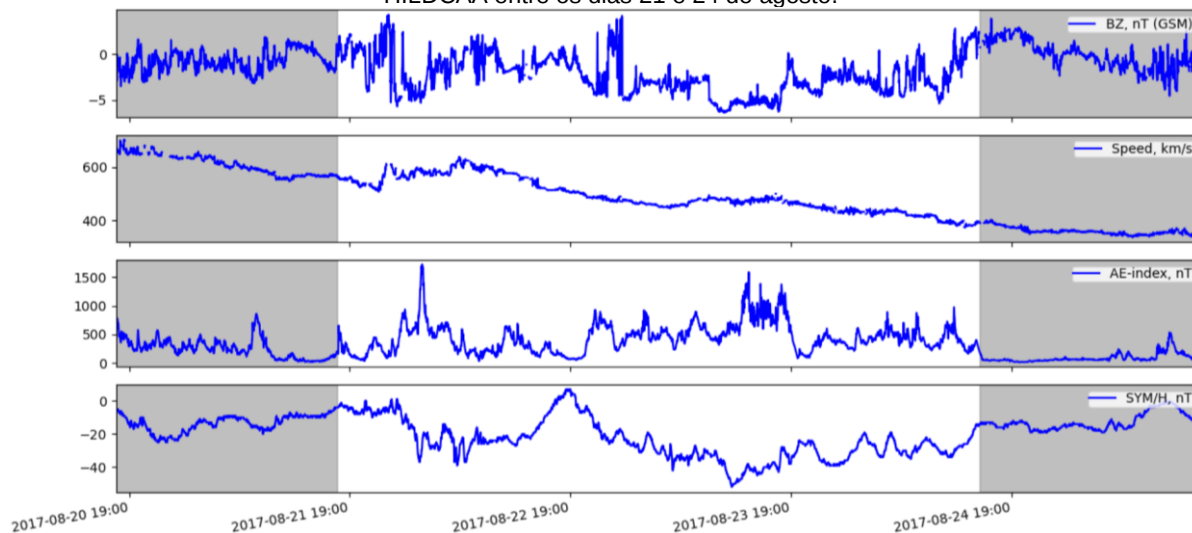
A Figura 3 apresenta os mesmos gráficos para o segundo candidato (21 a 24 de agosto). Observa-se a variação da componente Bz do IMF em aproximadamente ± 5 nT, a velocidade do vento solar que se inicia próxima dos 600 km/s e diminui ao longo dos dias, intensificação do índice AE em alguns momentos e variações no índice SYM-H alcançando aproximadamente -50 nT, ainda sem ultrapassar a condição de tempestade intensa. As características descritas nesse intervalo levantam uma forte possibilidade de ocorrência de um segundo evento HILDCAA, embora com menor intensidade que o anterior.

Figura 2- Parâmetros interplanetários e índices geomagnéticos utilizados para a identificação do evento HILDCAA entre os dias 17 e 21 de agosto.



Fonte: o autor.

Figura 3- Parâmetros interplanetários e índices geomagnéticos utilizados para a identificação do evento HILDCAA entre os dias 21 e 24 de agosto.



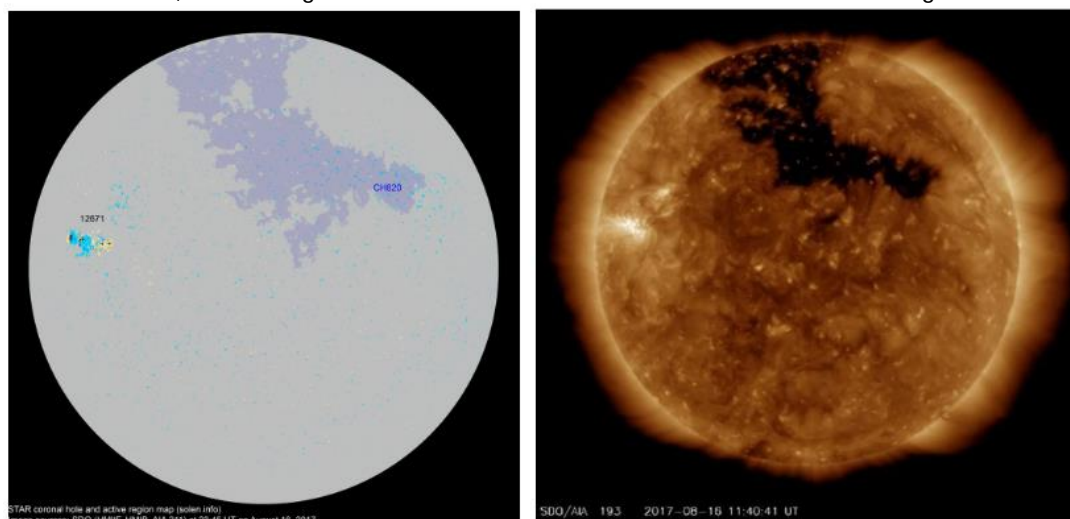
Fonte: o autor.

Resultados e Discussões

A fim de aprofundar a discussão e compreender a causa das variações nos parâmetros interplanetários e índices geomagnéticos, foram consultadas fontes especializadas em monitoramento e análise do clima espacial, como os portais Solen e SpaceWeatherLive, que disponibilizam relatórios sobre a atividade solar, com resumos diários e dados sobre o vento solar, o campo magnético interplanetário e a atividade geomagnética.

Nesses relatórios, foi possível verificar que no dia 17 de agosto a Terra começou a ser influenciada por um HSS, proveniente do buraco coronal CH820 (Figura 4), com pico de velocidade do vento solar em 594 km/s e o campo levemente perturbado, com Dst chegando a -36nT. Esse HSS continuou influenciando a Terra nos dias seguintes (18 a 21), sendo que a velocidade de vento solar atinge ~ 800 km/s entre os dias 19 e 20 de agosto. No dia 19 de agosto, o índice Dst chega a alcançar -51 nT às 09:00 UT (*Universal Time*), classificando como tempestade geomagnética moderada (Kyoto, WDC). O dia 21 marca um retorno as condições de normalidade.

Figura 4- Imagens do Sol obtidas pelo satélite Solar Dynamics Observatory (SDO) utilizando diferentes comprimentos de onda. À esquerda, observa-se a região ativa AR 12671 e do buraco coronal CH820. À direita, as mesmas estruturas, sendo a região ativa a área mais brilhante e o buraco coronal uma região mais escura.



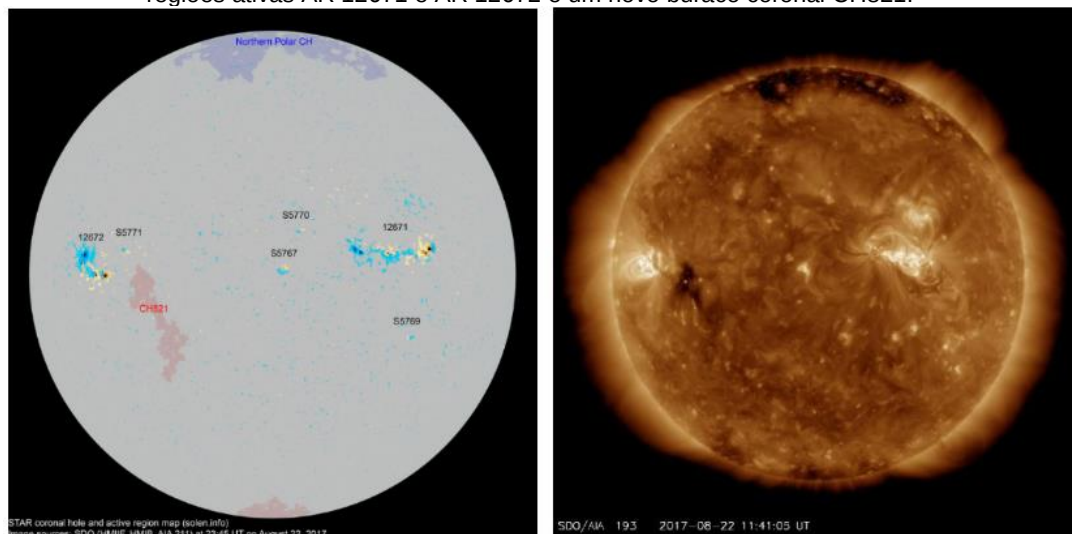
Fonte: Solen e Spaceweather.

Porém, no dia 21 de agosto a partir das 22:00 UT, acontece um novo aumento da velocidade do vento solar (670 km/s às 22:30 UT). As causas dessa perturbação apresentaram divergências entre as fontes consultadas. Segundo o Space Weather Live, os parâmetros indicavam que a Terra estaria sob a influência de um HSS associado a outro buraco coronal CH821 (Figura 5). Inicialmente, o Solen relata o mesmo, mas a avaliação posterior sugere uma pequena CME embutida no vento solar.

Diante dessa discordância, outras fontes foram consultadas com o objetivo de verificar a ocorrência (ou não) de ejeção de massa coronal durante esses dias. O catálogo *Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January 1996* (Richardson; Cane, 2024), indica o início da perturbação no dia 21 de agosto às 22:00 UT, com estimativas para o início e término da ICME às 04:00 UT do dia 22 e às 18:00 UT do dia 23, respectivamente. Dados do *SOHO/LASCO CME Catalog* confirmaram a presença de uma CME nesse intervalo. Além disso, o Boletim de Clima Espacial emitido pelo INPE registrou a ocorrência de uma grande CME atrás do disco visível solar e destacou que o meio interplanetário nas proximidades da Terra apresentava leves perturbações possivelmente associadas a ICME, que, embora não estivesse alinhadas com a linha Sol-Terra, encontrava-se direcionada para o quadrante do anoitecer da Terra.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 5- Imagens do Sol obtidas pelo satélite SDO, utilizando diferentes comprimentos de onda. Destaca-se as regiões ativas AR 12671 e AR 12672 e um novo buraco coronal CH821.



Fonte: Solen e Spaceweather.

No dia 23 de agosto, o campo geomagnético esteve levemente perturbado, a velocidade do vento solar permaneceu ~500 km/s. O índice Dst alcança -52 nT entre às 13:00- 14:00 UT, atingindo classificação de tempestade moderada novamente. Os dias 24 em diante apresentam um retorno gradual à normalidade, com o campo geomagnético variando entre calmo e muito calmo e a velocidade do vento solar diminuindo, média de 350 km/s (dia 26).

Conclusão

Sabe-se que eventos HILDCAA estão fortemente associados a HSS/SIRs (Hajra et al., 2013; Guarnieri, 2005). Isso porque o mecanismo fundamental desses eventos está relacionado às ondas de Alfvén presentes nos HSS. Essas ondas, de natureza oscilatória, provocam variações periódicas na orientação da componente Bz do IMF, alternando entre direções norte e sul, gerando reconexões magnéticas intermitentes entre o IMF e o campo geomagnético. Durante essas reconexões, acontece a transferência de energia do vento solar para a magnetosfera e a eventual deposição de energia na ionosfera auroral (Tsurutani et al., 2004). Isso explica a persistência de valores elevados no índice AE por períodos prolongados (Koga et al., 2011). Sendo assim, a maioria desses eventos ocorrem após tempestades provocadas por SIRs. Por este motivo, analisando os parâmetros interplanetários, índices geomagnéticos e os dados da atividade solar, pode-se considerar que o primeiro candidato analisado é um evento HILDCAA por definição, atendendo a todos os critérios estabelecidos, e ocorreu após uma tempestade geomagnética causada por HSS/SIR.

O segundo candidato a evento HILDCAA gera incertezas quanto à sua classificação. De acordo com a maioria das fontes consultadas, nos dias 22 e 23 a Terra esteve sob a influência direta de CME, de modo que o período perturbado mostrado na Figura 3 (21 a 24 de agosto) corresponde, na verdade, à tempestade geomagnética causada pela CME. Assim, o possível HILDCAA estaria inserido na fase principal da tempestade, contrariando o critério estabelecido por Tsurutani e Gonzalez (1987). Ao excluir eventos HILDCAA da fase principal das tempestades magnéticas, os autores se concentram em um tipo específico de atividade auroral impulsional, principalmente, por ondas de Alfvén. Basicamente, a fase principal da tempestade é dominada por injeções abruptas de energia que intensificam a corrente de anel, causando queda no índice Dst e picos elevados de AE. Já nos eventos HILDCAA, as ondas de Alfvén mantêm uma reconexão magnética prolongada na magnetopausa, resultando em uma atividade auroral contínua e intensa por dias. Por essa diferença de mecanismos físicos, conclui-se que a perturbação analisada não pode ser considerada um evento HILDCAA.

De modo geral, este estudo reforça a importância de análises criteriosas na identificação de eventos HILDCAA, sendo que sua classificação depende da compreensão detalhada das condições interplanetárias e geomagnéticas envolvidas.

Referências

DAGLIS, I. A.; THORNE, R. M.; BAUMJOHANN, W.; ORSINI, S. The terrestrial ring current: origin, formation, and decay. **Reviews of Geophysics**, v. 37, n. 4, p. 407–438, 1999.

GONZALEZ, W. D. et al. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. A4, p. 5771, 1994.

GORNEY, D. J. Solar cycle effects on the near-Earth space environment. **Reviews of Geophysics**, v. 28, n. 3, p. 315–336, 1990.

GUARNIERI, F. L. **Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral continua e de longa duração**. 315p. (INPE – 13604 – TDI/1043). São José dos Campos: INPE, 2005.

HAJRA, R. et al. Solar cycle dependence of High-Intensity Long-Duration Continuous AE Activity (HILDCAA) events, relativistic electron predictors?: HILDCAAS. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 9, p. 5626–5638, set. 2013.

KOGA, D. et al. Electrodynamical coupling processes between the magnetosphere and the equatorial ionosphere during a 5-day hildcaa event. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, n. 1, p. 148–155, 2011.

KYOTO WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM. Geomagnetic indices. Kyoto: Kyoto University, [2024]. Disponível em: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>. Acesso em: 19 maio 2025.

MACEDO, H. G. **Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais para o Estudo de Irregularidades Ionosféricas e Variações Geomagnéticas**. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2022.

MULLAN, D. J. **Physics of the sun: a first course**. [S.l.: s.n.], 2010.

NANDY, D.; MARTENS, P. C. H.; OBRIDKO, V.; DASH, S.; GEORGIEVA, K. Solar evolution and extrema: current state of understanding of long-term solar variability and its planetary impacts. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 8, n. 40, 2021.

NASA. **What is a coronal mass ejection or CME?** Disponível em: <https://www.nasa.gov/image-article/what-coronal-mass-ejection-or-cme/>. Acesso em: novembro/2024.

PRESTES, A.; KLAUSNER, V.; GONZÁLEZ, A.O.; SERRA, S. Statistical analysis of solar wind parameters and geomagnetic indices during HILDCAA/HILDCAA* occurrences between 1998 and 2007. **Advances in Space Research**, v. 60, p. 1850-1865, 2017.

SCHWENN, R. Space Weather: The Solar Perspective. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 3, n. 2, 2006.

SOLE.INFO. **Informações sobre buracos coronais, regiões ativas e flares solares**. Disponível em: <http://www.solen.info/solar/>. Acesso em setembro/2024.

SPACE WEATHER LIVE. **Monitoramento e informações sobre a atividade solar e espacial**. Disponível em: <https://www.spaceweatherlive.com/>. Acesso em: novembro/2024.

TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, W. D. The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA): Interplanetary Alfvén wave trains. **Planetary and Space Science**, v. 35, n. 4, p. 405-412, abr. 1987.

TSURUTANI, B. T. et al. Are high-intensity long-duration continuous ae activity (hildcaa) events substorm expansion events?. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 2, p. 167–176, 2004.