



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DE EVENTOS DE TEMPESTADES DE UM MAGNÉTICAS
INTENSAS NO MÍNIMO DE ATIVIDADE SOLAR**

Letícia Catarina Morelatto

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pelo Dr
Alisson Dal Lago

UFSM
Santa Maria - RS
2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DE EVENTOS DE TEMPESTADES DE UM MAGNÉTICAS
INTENSAS NO MÍNIMO DE ATIVIDADE SOLAR**

Letícia Catarina Morelatto

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pelo Dr
Alisson Dal Lago

UFSM
Santa Maria - RS
2021

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estudar os eventos de tempestades geomagnéticas intensas ocorridas no mínimo de atividade solar atual. Para isso, foram utilizados dados providos pelo World Data Center de Kyoto, no Japão, que fornece o índice Dst de atividade da corrente anelar magnetosférica. Para análise dos eventos do meio interplanetário, foram utilizados dados em “nível dois” da sonda interplanetária Advanced Composition Explorer. Finalmente, foi feito uso de observações solares providas pela sonda Stereo A para exame da coroa solar, complementadas por dados dos satélites SOHO e SDO.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Objetivo geral	4
1.2. Objetivos específicos	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3. METODOLOGIA	7
4. CONCLUSÃO	15
5. REFERÊNCIAS	16

1. INTRODUÇÃO

Tempestades geomagnéticas são fenômenos de perturbação do campo magnético terrestre e constituem um tema central nas áreas de Física Solar-Terrestre e de Clima Espacial. Suas origens estão relacionadas a distúrbios ocorridos no espaço interplanetário (Gonzalez et. al, 2011), que, por sua vez, têm suas origens no Sol.

Nossa sociedade altamente tecnológica é bastante vulnerável a esses distúrbios de fora da Terra, em particular àqueles iniciados por eventos explosivos no sol (Schwenn et. al, 2005). As consequências econômicas dessas perturbações são enormes - uma das razões pelas quais o clima espacial tem atraído maior atenção recentemente, não apenas de cientistas especializados, mas também do público em geral - (Schwenn et. al, 2005), daí a importância de se efetuar pesquisas nessa área.

1.1. OBJETIVO GERAL: estudar os eventos de tempestades geomagnéticas intensas ocorridas no mínimo de atividade solar atual.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Fazer um levantamento de todos os eventos de tempestades magnéticas intensas ocorridas no período do mínimo de atividade solar atual;
- Caracterizar os eventos ocorridos no meio interplanetário relacionados a estas tempestades;
- Caracterizar os eventos solares relacionados a essas tempestades;

2. Revisão Bibliográfica

Inicialmente, foi realizado um trabalho de revisão bibliográfica com o estudo de conceitos do artigo de Schwenn et al., 2005.

A associação das ejeções de massa coronal com seus efeitos próximos da Terra, pontos principais da introdução:

- Nossa sociedade altamente tecnológica está vulnerável aos distúrbios de fora do sistema da Terra, em particular àqueles iniciados por eventos explosivos no sol;

- As consequências econômicas são enormes (uma das razões pelas quais o clima espacial tem atraído maior atenção recentemente – não apenas de cientistas especializados, mas também do público em geral);
- Outra razão é a qualidade de informações observacionais que têm sido obtidas na última década por uma nova geração de instrumentos espaciais, o que tem permitido maiores avanços na compreensão dos processos envolvidos próximos ao Sol, no espaço interplanetário e acerca da Terra;
- Infelizmente, a precisão das previsões dos efeitos climáticos espaciais ainda é pobre;
- CMEs (ejeções de massa coronal) e fenômenos relacionados ocorrem bastante espontaneamente e ainda não é possível identificar sinais singulares que deveriam indicar uma iminente explosão, seu início, localização e força; a física fundamental envolvida ainda não é suficientemente bem compreendida;
- Partículas energéticas solares podem colocar em perigo astronautas a caminho da Lua ou Marte, mas ainda não há ferramentas de aviso apropriadas;
- Mesmo que um distúrbio notável seja observado, ainda é difícil prever se as nuvens de gás ejetadas alcançarão a Terra, quando e quais serão seus efeitos (esse é o principal aspecto a ser abordado no artigo);
- É de crucial importância determinar a direção em que uma erupção é originalmente apontada, já que apenas um de dez eventos CME atinge a Terra (coronógrafos fornecem vistas espetaculares de nuvens de gás irrompendo, mas eles não permitem inferir a direção das ejeções);
- CMEs aparecem como halos ao redor do disco do ocultor no campo de visão de um coronógrafo. Observações de discos complementares são necessárias para decidir se um halo CME está apontado para perto ou longe da terra;
- Imagens e dados de instrumentos no espaço e na terra são disponibilizados na internet quase em tempo real. Muitos profissionais e analistas meteorológicos amadores estão rotineiramente tirando proveito deles (de particular valor são os dados do LASCO, que publicam informações assim que qualquer halo CME aparece);

- O simples conhecimento da direção de um halo de CME é um grande avanço; mas a chegada dos eventos na Terra permanece difícil de prever, já que a linha de visão da velocidade de um halo CME não pode ser medida diretamente;
- Dados mostram que as velocidades frontais de CMEs variam amplamente entre cerca de 200 km/s e mais de 2000 km/s;
- Brueckner et al. (1998, apud Schwenn et al., 2005), concluíram que o tempo de viagem da maioria dos ICMEs (no artigo, o termo é usado de forma genérica para designar todos os efeitos de CMEs no espaço interplanetário) do Sol para a Terra sempre equivalia a cerca de 80 horas, independentemente do comportamento dos halos perto do sol. A regra de "80 horas" de Brueckner como a ferramenta de previsão mais simples parece funcionar muito bem em vários casos, em particular próximo da atividade mínima;
- Vários pesquisadores têm tentado encontrar relações entre propriedades CMEs e sinais de ICMEs;
- Gopalswamy et al., diferenciando-se de outros autores que usaram o princípio de efeitos geomagnéticos associados, derivou uma simples relação entre a velocidade inicial V_{ps} de um CME e sua propagação. Os autores consideram esse o primeiro passo para um futuro instrumento de previsões, embora o tempo de viagem derivado usando seus esquemas desviem consideravelmente dos tempos de viagem observados; estudos adicionais tentaram melhorar a precisão das previsões, mas todos eles sofreram do problema de deduzir a própria velocidade de propagação dos ICMEs;
- Em alguns casos, choques interplanetários em seu caminho através da heliosfera geram emissões de rádio tipo II na frequência local de plasma. Isso fornece um meio de observar remotamente e até mesmo rastrear ICMEs. Essa técnica está sendo usada para estudar dinâmicas e interações de ICMEs, mas geralmente depois que elas acontecem. Para previsões quase em tempo real as emissões de rádio tipo II são de valor limitado;
- A tarefa básica consiste em encontrar e medir mais cedo os dados para a velocidade de propagação de um halo CME em relação a um observador. Em analogia, alguém teria que medir a velocidade de um carro se aproximando

de frente. Isso geralmente é obtido pelas técnicas de radar, mas nada semelhante funciona no caso de CMEs;

- Baseados na ideia de calcular o tempo de aproximação de CMEs usando apenas sua aparente expansão, os autores do artigo desenvolveram uma técnica puramente empírica, que faz uso dos seguintes fatos observacionais bem-estabelecidos:
 - 1. Os ângulos de cone de expansão CME e, mais geralmente, suas formas de expansão são usualmente bem mantidas. As formas dos CMEs permanecem “auto-semelhantes”;
 - 2. As formas da grande maioria das CMEs aparentam ser consistentes com uma seção transversal circular quase perfeita; halos CME se movendo ao longo da linha Sol-Terra exibem geralmente uma forma circular e suave. Assim, a velocidade aparente da expansão lateral das CMEs pode ser considerada independente da visualização da direção;

3. METODOLOGIA

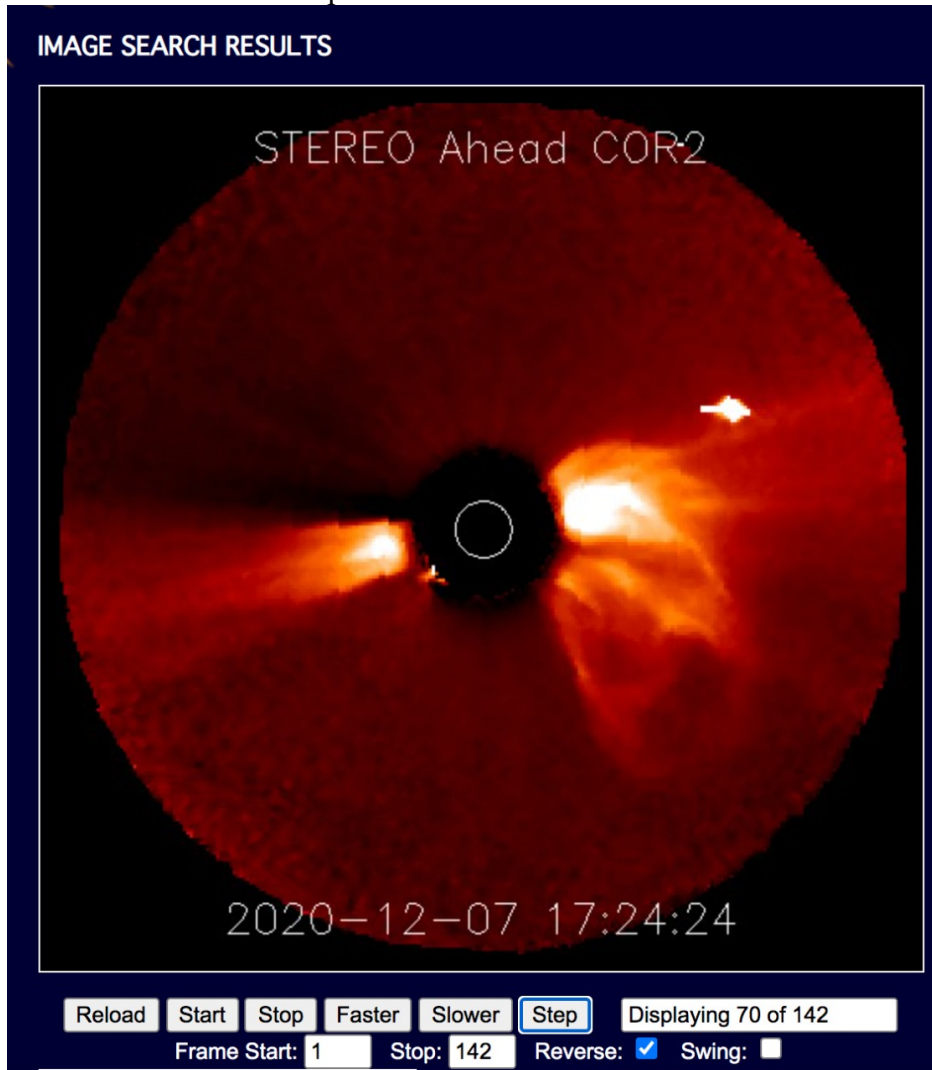
Para o desenvolvimento deste projeto, foram utilizados dados providos pelo *World Data Center* de Kyoto, Japão (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstidir/>), que fornece o índice Dst, de atividade da corrente anelar magnetosférica. Para a análise dos eventos do meio interplanetário, fez-se uso dos dados em “nível dois” da sonda interplanetária *Advanced Composition Explorer*, que fornece dados de campo magnético e suas componentes, juntamente com dados do plasma do meio interplanetário continuamente (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/>).

Finalmente, foram utilizadas observações solares providas pela sonda Stereo A para observação da coroa solar, complementadas por dados dos satélites SOHO e SDO, que realizam observações do disco solar frontal e da coroa (<https://stereo.gsfc.nasa.gov/>).

O presente trabalho iniciou pela caracterização de um evento completo, desde o Sol até a Terra, usando toda a cadeia de dados existentes. Esta etapa, envolveu o estudo de uma ejeção de massa coronal ocorrida em dezembro de 2020. Esta etapa se relaciona aos dois itens da metodologia (“Caracterizar os eventos ocorridos no meio interplanetário relacionados a estas tempestades” e “Caracterizar os eventos solares relacionados a essas tempestades”).

No dia 7 de dezembro de 2020 houve uma ejeção de massa coronal no Sol. Ela atingiu a Terra no dia 10 de dezembro de 2020. A Figura 1 mostra a Ejeção de Massa Coronal observada pela sonda STEREO A (NASA).

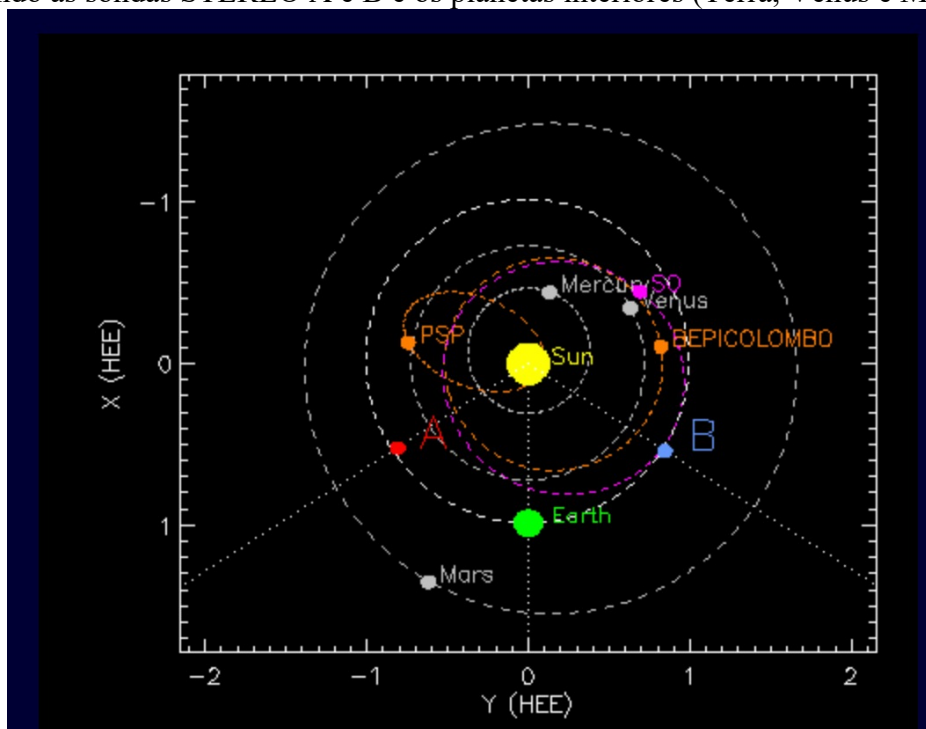
Figura 3.1 – Ejeção de Massa Coronal (CME) observada em 10 de dezembro de 2020 pela sonda STEREO A.



Fonte: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/>

A Figura 2 mostra a posição da sonda STEREO A em relação ao Sol e à Terra, no momento da ocorrência da CME. A partir desta figura, pode-se entender que a CME observada na Figura 1 possui grande parte direcionada para a Terra, uma vez que a Sonda STEREO A está fora da linha Sol-Terra, portanto, com .

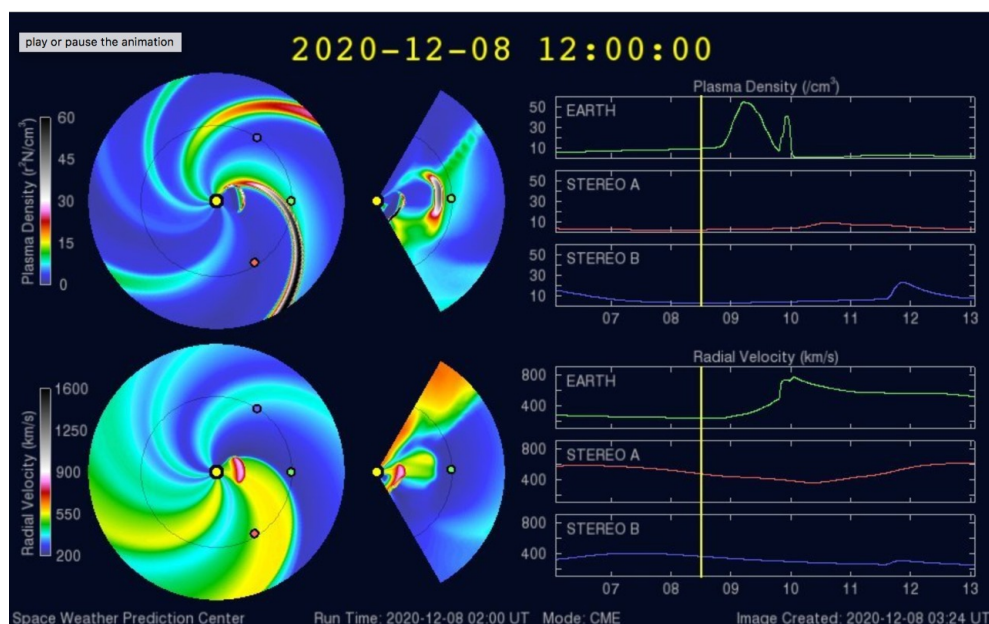
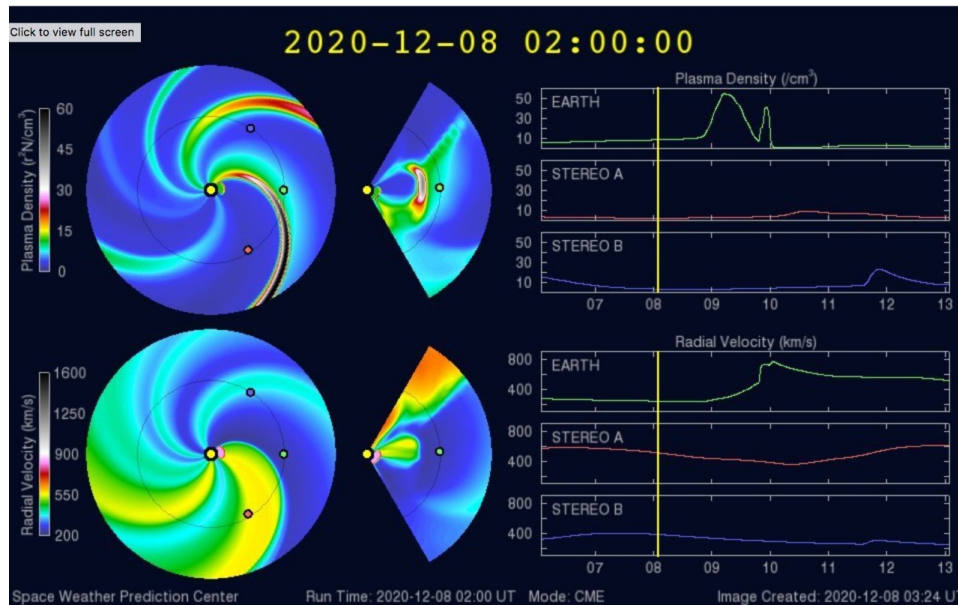
Figura 3.2 – Posições relativas de diversas sondas espaciais na Heliosfera interna, incluindo as sondas STEREO A e B e os planetas interiores (Terra, Venus e Mercúrio).

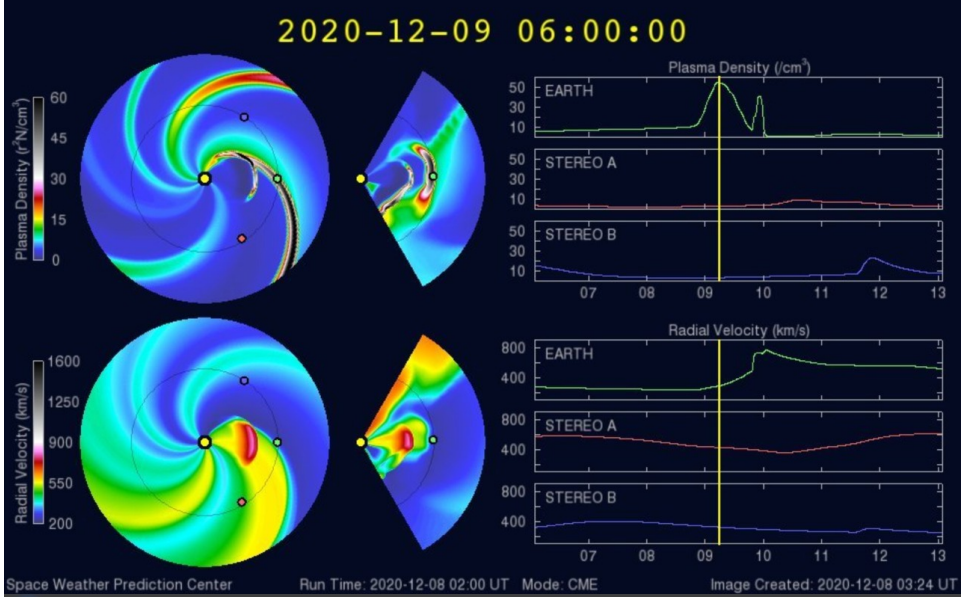
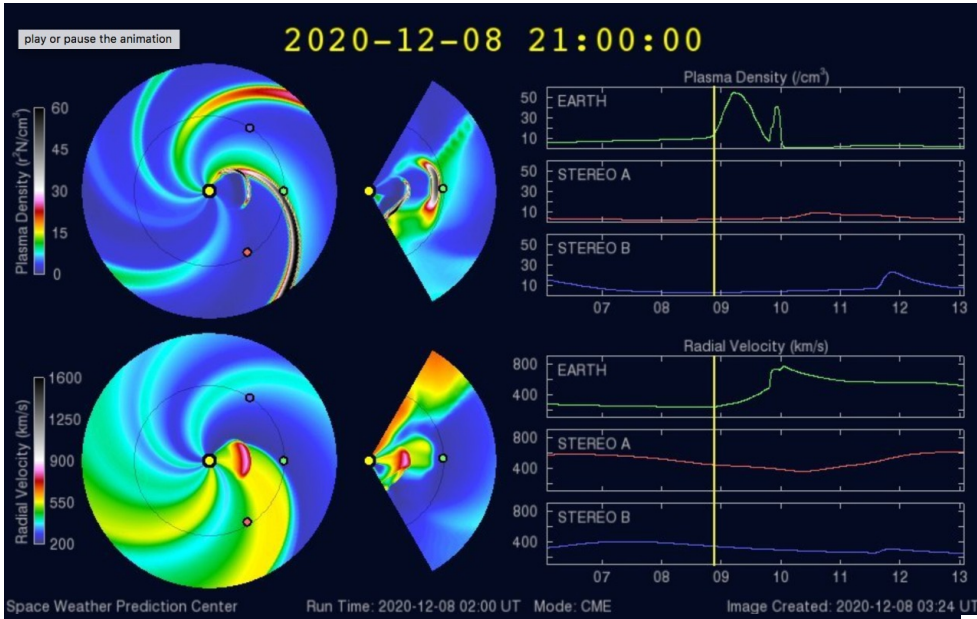


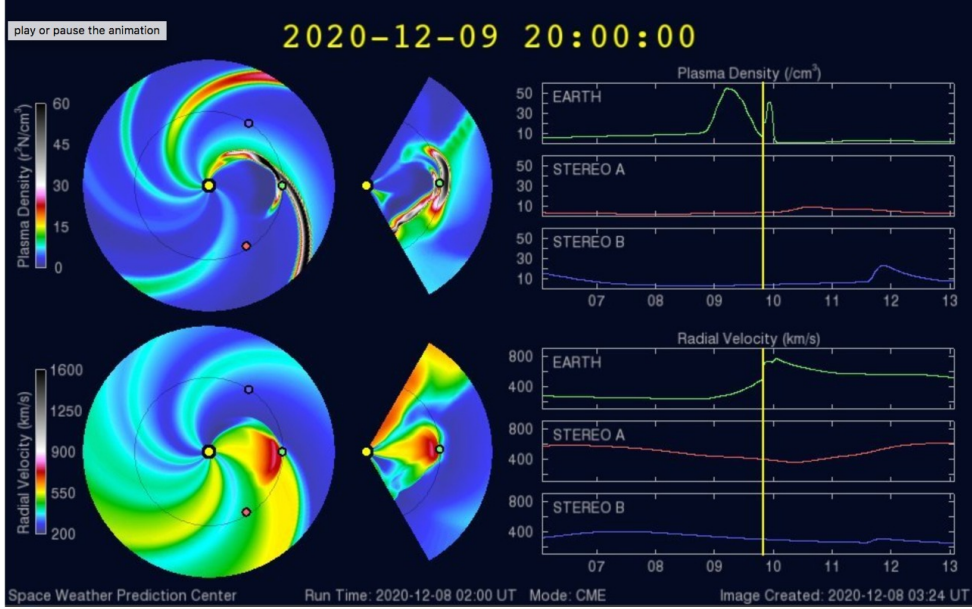
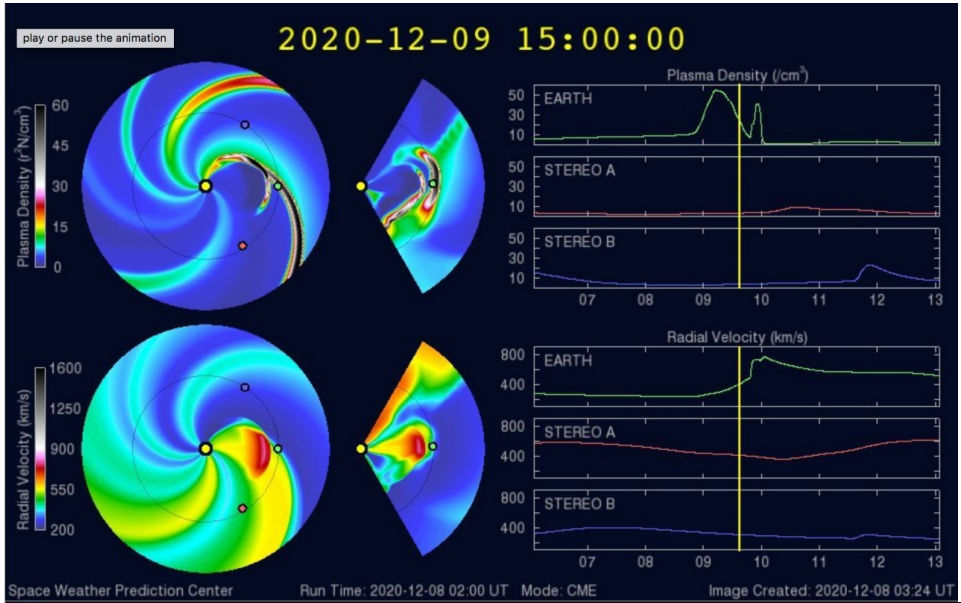
Fonte: <https://stereo.gsfc.nasa.gov/where.shtml>

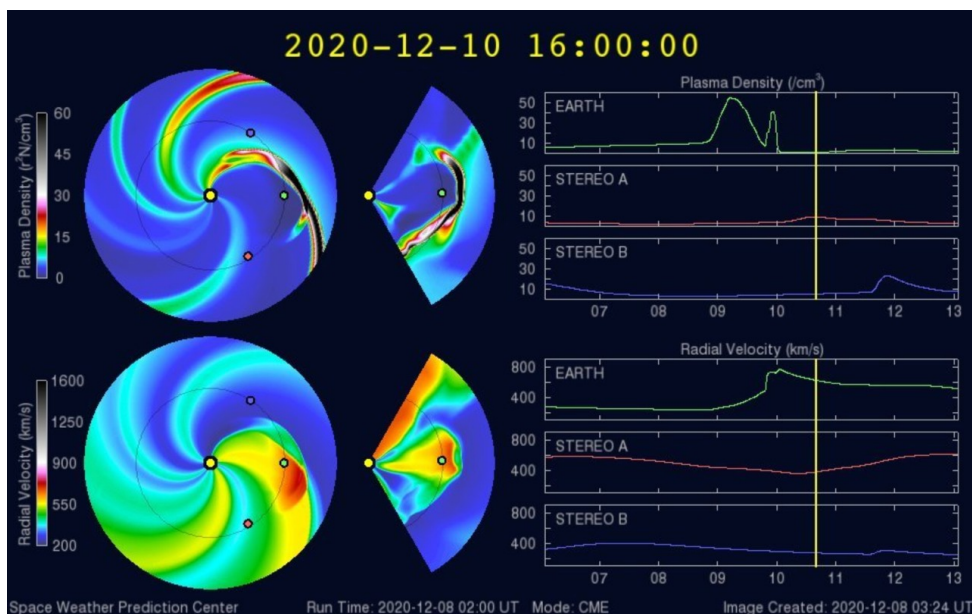
A simulação a seguir mostra a evolução da estrutura da CME desde sua ejeção do Sol até sua chegada na Terra. Esta simulação foi feita a partir do Modelo WSA-ENLIL, do Space Weather Prediction Center (NOAA). Esta simulação permite a visualização da evolução da estrutura desde o Sol até a sua chegada na órbita da Terra.

Figura 3.3 - Evolução da estrutura da CME observada em dezembro de 2020, a partir do modelo WAS-ENLIL.





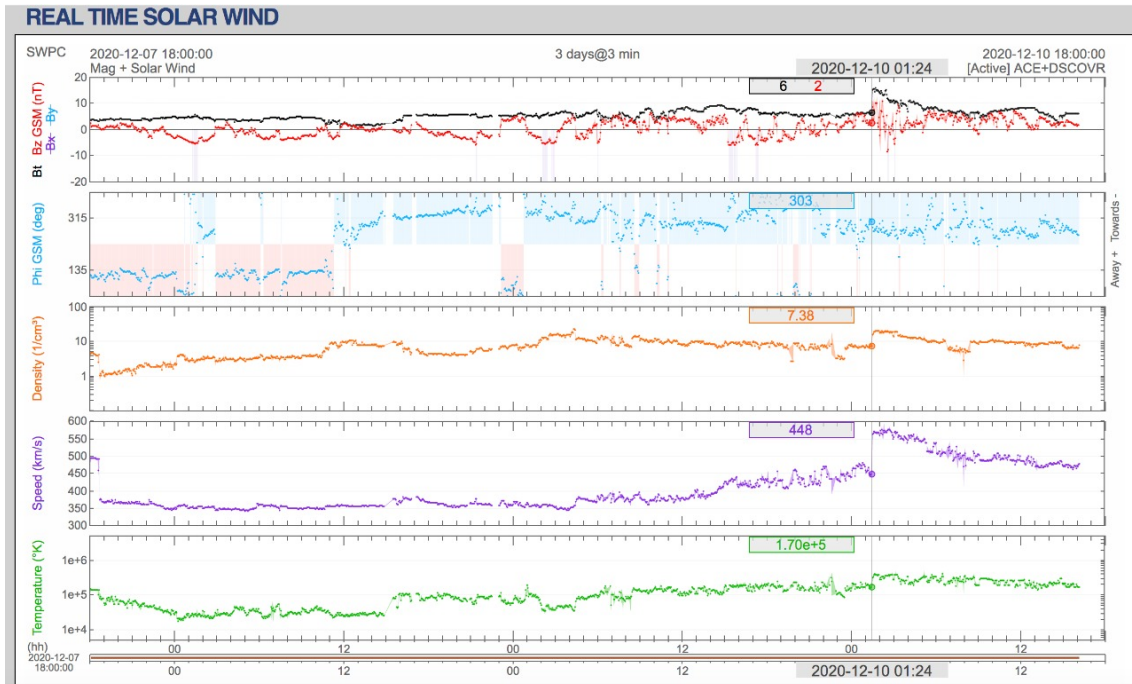




Fonte: <https://www.swpc.noaa.gov/>

Em 10 de dezembro de 2020, a chegada na Terra da estrutura foi observada pelo Satélite DSCOVR (NOAA), que encontra-se no Ponto Lagrangeano L1, entre o Sol e a Terra. Pode-se verificar um salto nos parâmetros, de forma simultânea às 01:24 UT do dia 10/12/2020. Este salto indica a chegada de uma onda de choque no meio interplanetário, originada pela CME solar. Como estas estruturas viajam a velocidades maiores que as velocidades características do vento solar, é comum observarmos a formação de ondas de choque nos parâmetros, quando da chegada delas na Terra. Estas perturbações iniciam os distúrbios geomagnéticos (tempestades geomagnéticas).

Figura 3.4 – Observações dos parâmetros do Vento Solar nas vizinhanças da Terra, observados pela sonda DSCOVR. De cima para baixo, são mostrados: Campo magnético total (preto) e sua componente “z” (vermelho); ângulo de rotação do vetor campo magnético; densidade numérica de prótons; velocidade do vento solar; Temperatura de prótons.

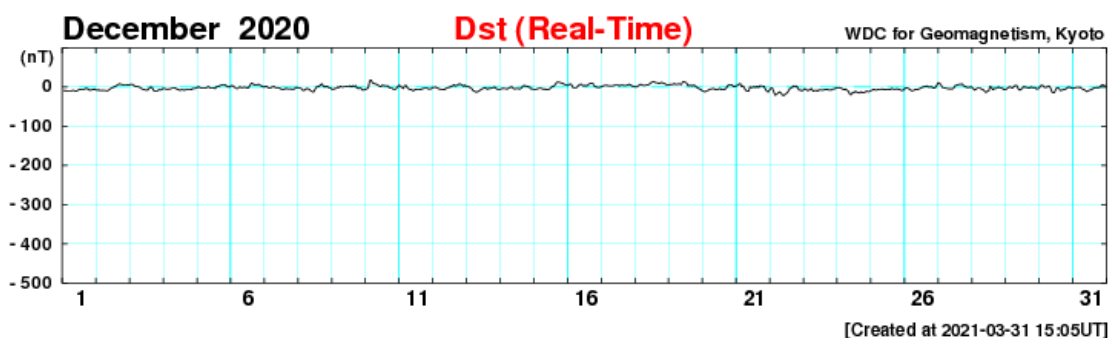


Fonte: <https://www.swpc.noaa.gov/>

A Figura 3.5 apresenta o índice Dst de atividade da corrente anelar magnetosférica, que indica o grau de impacto da chegada da estrutura na Terra. No caso específico, observa-se um leve aumento do índice, em resposta à chegada da onda de choque na Terra. Porém, não houve o desenvolvimento de uma Tempestade Geomagnética, uma vez que não houve a presença componente Bz do campo geomagnético de forma intensa. Desta forma, esta estrutura não causou uma tempestade geomagnética.

Mesmo assim, foi importante do ponto de vista metodológico fazer um acompanhamento de um evento desde o Sol até a Terra, de modo a entender todas as etapas de um evento Solar-Terrestre.

Figura 3.5 – Índice Dst mantido pelo World Data Center de Kyoto. Observa-se no dia 10 de dezembro um leve pico no índice, em resposta à chegada da Ejeção de Massa Coronal (CME).



Fonte: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

4. Conclusão

Neste relatório foram apresentados os resultados do trabalho desenvolvido ao longo do período de bolsa PIBIC. Solicitou-se a interrupção da continuidade do projeto por parte da bolsista, que deverá ser substituída, para que o projeto seja concluído por outro bolsista.

As fases a seguir são o levantamento dos eventos que ocorreram

- Fazer um levantamento de todos os eventos de tempestades magnéticas intensas ocorridas no período do mínimo de atividade solar atual (a realizar);
- Caracterizar os eventos ocorridos no meio interplanetário relacionados a estas tempestades (parcialmente realizado, uma vez que a metodologia descrita acima foi desenvolvida);
- Caracterizar os eventos solares relacionados a essas tempestades (parcialmente realizado, uma vez que a metodologia descrita acima foi desenvolvida)

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GONZALEZ, W. D.; ECHER, E.; TSURUTANI, B. T.; DE GONZALEZ, A. L. C.; DAL LAGO, A. **Interplanetary origin of intense, superintense and extreme geomagnetic storms**, Março de 2011.

SCHWENN, R.; DAL LAGO, A.; HUTTUNEN, E.; GONZALEZ, W. D.. **The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth**, Março de 2005.

World Data Center de Kyoto, Japão (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>). Acessado em 10/12/2020.

Advanced Composition Explorer, (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/>). Acessado em 10/12/2020.

STEREO (<https://stereo.gsfc.nasa.gov/>). Acessado em 10/12/2020.

Space Weather Prediction Center (<https://www.swpc.noaa.gov/>). Acessado em 10/12/2020.

World Data Center – Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Acessado em 10/12/2020.