



ESTUDO DE EVENTOS DE CLIMA ESPACIAL UTILIZANDO DADOS ESPACIAIS E TERRESTRES

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC)

Tiago Bremm

(UFSM – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC)

E-mail: bremm.tiago@gmail.com

Alisson Dal Lago

Orientador

Divisão de Geofísica Espacial

DGE/CEA/INPE – MCTIC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE - MCTIC

E-mail: dallago@dge.inpe.br

Julho de 2016



DADOS DE IDENTIFICAÇÃO:

Título:

ESTUDO DE EVENTOS DE CLIMA ESPACIAL UTILIZANDO DADOS ESPACIAIS E TERRESTRES

Processo: 127107/2015-0

Aluno Bolsista no período de Agosto/2015 a Julho/2016:

Tiago Bremm

Acadêmico do Curso de Física Licenciatura

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Alisson Dal Lago

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCTIC

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCTIC

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas – CRS/INPE
- MCTIC

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTIC

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCTIC – UFSM, através do Laboratório Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas - LCEPTM/CRS/INPE – MCTIC com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM.



AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família, pai José Bremm, mãe Joaneta Maria Bremm e irmã Diane Bremm, pelo apoio, carinho e incentivo prestados.

Ao meu Orientador, Dr. Alisson Dal Lago e, Co-orientador Dr. Nelson Jorge Schuch, pela atenção, acolhimento, dedicação e orientação em minhas atividades de Iniciação Científica e de Intercâmbio.

Aos meus colegas de laboratório, Vinícius Deggeroni, Cristian Kanopf e Gabriel Vizcarra pelos momentos de descontração e pelo apoio prestado.

À Sra. Egídia Inácio da Rosa, pelo constante apoio, alertas e suporte com toda a burocracia de datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/INPE - MCTIC.

Gostaria, de maneira geral, agradecer a todos que, de alguma forma, colaboraram na execução deste Projeto.



Estudante

Tiago Bremm

Endereço para acessar este espelho: dgp.cnpq.br/dgp/espelhorh/1645273311182954

Dados Gerais

Nome em citações bibliográficas: BREMM, T.

Nível de Treinamento

Áreas de atuação:

Bolsista CNPq: • IC

Última atualização do Currículo Lattes: 20/02/2015

Homepage: <http://www.inpe.br/crs/>

Grupos de pesquisa em que atua

Nome do grupo	Instituição
Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites	INPE

Linhas de pesquisa em que atua

Linha de pesquisa	Nome do grupo
MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites
MAGNETOSFERAS x	Clima Espacial, Interações Sol -Terra,



GEOMAGNETISMO	Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites
AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites
DESENVOLVIMENTO DE NANOSATÉLITES - CubeSats: NANOSATC-BR	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites

Orientadores participantes de grupos de pesquisa

Orientador	Grupo de pesquisa
Alisson Dal Lago	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites
Alisson Dal Lago	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites
Alisson Dal Lago	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites
Alisson Dal Lago	Clima Espacial, Interações Sol -Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites



RESUMO

O Relatório expõe as atividades desenvolvidas pelo bolsista Tiago Bremm, acadêmico do curso de Física Licenciatura, da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, durante o período de Agosto de 2015 a Julho de 2016, com a seguinte linha de pesquisa: “ESTUDO DE EVENTOS DE CLIMA ESPACIAL UTILIZANDO DADOS ESPACIAIS E TERRESTRES”. As atividades foram desenvolvidas em parceria com a Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – via Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM – e com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC – via Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCTIC –, em Santa Maria, RS e com o Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE - MCTIC – localizado em São Martinho da Serra, RS. O bolsista utilizou dados de parâmetros de plasma do satélite ACE (“Advanced Composition Explorer”) e dados do Detector Multidirecional de Muons (DMM) instalado no Observatório Espacial do Sul, para determinar os tipos de estruturas interplanetárias que causaram tempestades geomagnéticas durante o período estudado. Dados dos coronógrafos LASCO C2 e C3 do satélite SOHO (“Solar and Heliospheric Observatory”) também foram utilizados, a fim de observar as CMEs solares, para o período em destaque.



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	10
INTRODUÇÃO	10
1.1 <i>Introdução</i>	10
CAPÍTULO 2.....	11
O SOL E O MEIO INTERPLANETÁRIO	11
2.1 <i>O Sol</i>	11
2.2 <i>Explosões Solares</i>	12
2.3 <i>Ejeções de Massa Coronais</i>	12
CAPÍTULO 3.....	15
INTERAÇÕES SOL-TERRA	15
3.1 <i>Índices DST</i>	15
3.2 <i>Índice Kp</i>	16
3.3 <i>Tempestades Geomagnéticas</i>	17
CAPÍTULO 4.....	18
INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	18
4.1 <i>Detector Multidirecional de Muons</i>	18
4.2 <i>Satélites</i>	20
4.2.1 <i>Satélite ACE</i>	20
4.2.2 <i>Satélite SOHO</i>	22
CAPÍTULO 5.....	24
ANÁLISE DE DADOS.....	24
5.1 <i>Evento do dia 17 de março de 2013</i>	24
CAPÍTULO 6.....	33



CONCLUSÕES 33

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 34

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1: Figura esquemática da estrutura Solar.....11

Figura 2.2.1: Imagem de uma explosão solar12

Figura 2.3.1: Sequência de imagens de coronógrafo mostrando uma CME, desde o momento da formação até o completo desprendimento da coroa solar.....13

Figura 3.1.1: Variação do índice Dst para o mês de junho de 2013. Podemos observar distúrbios no início e no fim do mês.....15

Tabela 1: Classificação das Tempestades Geomagnéticas..15

Figura 3.2.1: Índice Kp para o final de Julho de 2012 até o final de Agosto de 2012.....16

Tabela 2: Classificação da atividade magnética de acordo com o índice Kp.....16

Figura 3.3.1: Aurora formada após uma tempestade geomagnética.....17

Figura 3.3.2: Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos.....18

Figura 4.1.1: Foto do DMM instalado no Observatório Espacial do Sul.Figura 3.3.4 - A roda de filtros de interferência do imageador.....20

Figura 4.1.2: Esquema do método de contagem do DMM.....20.

Figura 4.2.1.1: Ilustração representativa da órbita do satélite ACE; o ponto Lagrangeano L1; a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.....21

Figura 4.2.1.2: Ilustração da disposição dos instrumentos abordo do ACE.....22

Figura 4.2.2.1: Esquema da órbita do Satélite SOHO.....23

Figura 5.1.1: Parâmetros de plasma do satélite ACE de 16 a 21 de março de 2013.....25

Figura 5.1.2: Parâmetros de plasma do satélite ACE de 16 a 20 de março de 2013.....26

Figura 5.1.3: Variação percentual de muons do DMM do OES.....27



Figura 5.1.4: Variação percentual de muons do DMM instalado em Nagoya.....	28
Figura 5.1.5: Índice DST para a tempestade estudada.....	28
Figura 5.1.6: Imagem órbita dos satélites STEREO A (direita) e STEREO B (esquerda).....	30
Figura 5.1.7: Sequência de imagens do coronógrafo C2, obtida pelo satélite SOHO.....	30
Figura 5.1.8: Imagem da CME obtida pelo STEREO A (direita) e STEREO B (esquerda).....	31
Figura 5.1.9: Sequência de imagens do coronógrafo C2.....	31
Figura 5.1.10: Imagem da CME do dia 15 de março, obtida pelo STEREO A (direita) e STEREO B (esquerda).....	32
Figura 5.1.11: Imagem da CME do dia 15 de março, obtida pelo coronógrafo C3.....	32



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Centro do Sistema Solar e imprescindível para a vida na Terra, o Sol é também responsável por inúmeros fenômenos energéticos, como as explosões Solares (*flares*) e as Ejeções de Massa Coronais (CMEs). Quando ocorre uma CME, uma espécie de nuvem, contendo plasma magnetizado é lançada ao espaço e, ao interagir com o Campo Magnético Terrestre, pode causar Tempestades Geomagnéticas, afetando equipamentos eletrônicos em satélites, causando interferência em equipamentos GPS, dentre outros.

As CMEs podem ser relativamente lentas ou ainda rápidas, com velocidades de expansão superiores a 4500 km/s (Schwenn et al. 2005). Essas diferentes velocidades influenciarão em seu tempo de chegada na Terra. Juntamente com a intensidade de seu campo magnético, a velocidade é um dos parâmetros importantes para determinar as consequências que as CMEs podem gerar na Terra.

Os cientistas da área de Clima Espacial, responsáveis pelo estudo destes fenômenos energéticos, buscam aprimorar os métodos de previsão de Tempestades Geomagnéticas e medição dos parâmetros dessas estruturas interplanetárias, visando prever com maior antecedência possível sua chegada na Terra.

No Relatório são estudadas estruturas correspondentes interplanetárias das CMEs, denominadas ICMEs, utilizando dados de parâmetros de plasma, fornecidos pelo satélite ACE (Advanced Composition Explorer), e dados de muons, do Detector Multidirecional de Muons instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS. Dados dos coronógrafos LASCO C2 e C3 do satélite SOHO (“Solar and Heliospheric Observatory”) e do instrumento AIA do satélite SDO (“Solar Dynamics Observatory”) também foram utilizados, a fim de observar as CMEs solares, para o período em destaque.

CAPÍTULO 2

O SOL E O MEIO INTERPLANETÁRIO

2.1 O Sol

O Sol é uma estrela ativa com uma massa média de $1,99 \times 10^{30}$ kg e raio de 696.000 km, representando cerca de 98% da massa total do sistema solar. É formado predominantemente por hidrogênio e hélio. A atmosfera Solar pode ser dividida em três regiões distintas:

Fotosfera: com espessura de $0,5 \times 10^6$ m, é nesta região que se origina a maior parte da luz visível e, onde podem ser observados fenômenos como as Manchas Solares.

Cromosfera: possui cerca de $2,5 \times 10^6$ m de espessura, sendo basicamente uma zona de transição entre a Cromosfera fria e a Coroa quente.

Coroa Solar: parte mais externa da Atmosfera Solar, esta camada caracteriza-se por variações de forma e largura que costumam acompanhar o Ciclo das Manchas Solares. Possui temperatura em torno de 10^6 K, sendo constituída de gás ionizado que, produz elétrons e íons que arrastam o campo magnético solar pelo meio Interplanetário, produzindo assim o Vento Solar.

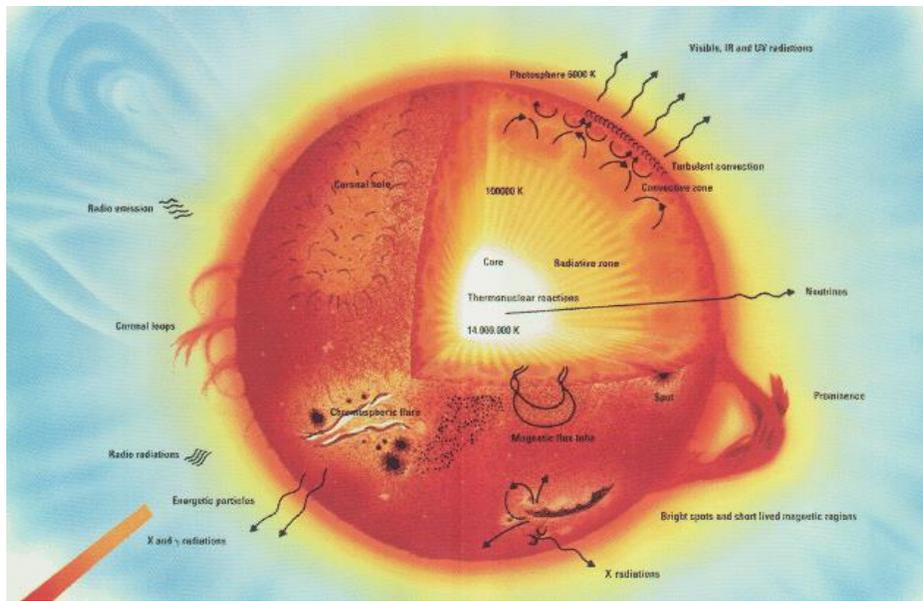


Figura 2.1.1: Figura esquemática da estrutura Solar. Fonte: <http://solar.physics.montana.edu/yipop/Spotlight/SunInfo/Structure.html>

2.2 Explosões Solares

Observadas pela primeira vez em 1859, pelo astrônomo inglês Richard Carrington, as explosões solares são definidas como uma súbita, rápida e intensa variação na luminosidade observada na superfície solar, como mostra a Figura 2.2.

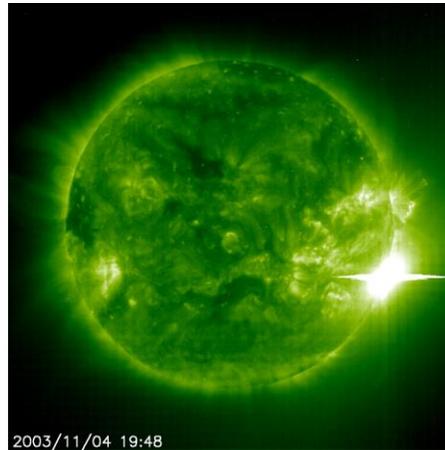


Figura 2.2.1: Imagem de uma explosão solar. Fonte: http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003_11_04/eit195.gif.

A energia cinética e térmica é proveniente da energia magnética que estava armazenada na superfície solar. Elétrons, prótons e núcleos pesados são liberados e acelerados na atmosfera solar durante a explosão.

2.3 Ejeções de Massa Coronais

Uma ejeção coronal de massa (*Coronal Mass Ejection - CME*) é um desprendimento de plasma solar, observado a partir da coroa, que se propaga através do espaço interplanetário. Ao interagir com a magnetosfera terrestre, as CMEs podem causar distúrbios no campo magnético da Terra. Estas estruturas viajam com uma velocidade de várias centenas de *km/s*, arrastando consigo o plasma do vento solar e o campo magnético interplanetário. Devido a sua velocidade estas estruturas são quase sempre acompanhadas por uma onda de choque.

A estrutura das CMEs é tipicamente caracterizada por um *loop* externo, cavidade interna com densidade menor e proeminência eruptiva interna (Hundhausen, 1997).

A origem das CMEs pode estar relacionada com estruturas chamadas de *helmet streamers*, um feixe em forma de arcada ao longo e sobre uma linha de inversão de polaridade fotosférica (Sturrock e Smith, 1968), uma vez que os *helmet streamers* normalmente apresentam proeminências.

A sequência de imagens do coronógrafo, na Figura 2.3.1 mostra a evolução da estrutura da densidade da coroa solar e suas variações temporais, bem como suas expulsões transientes de plasma, que são a essência das CMEs (Hundhausen, 1997).

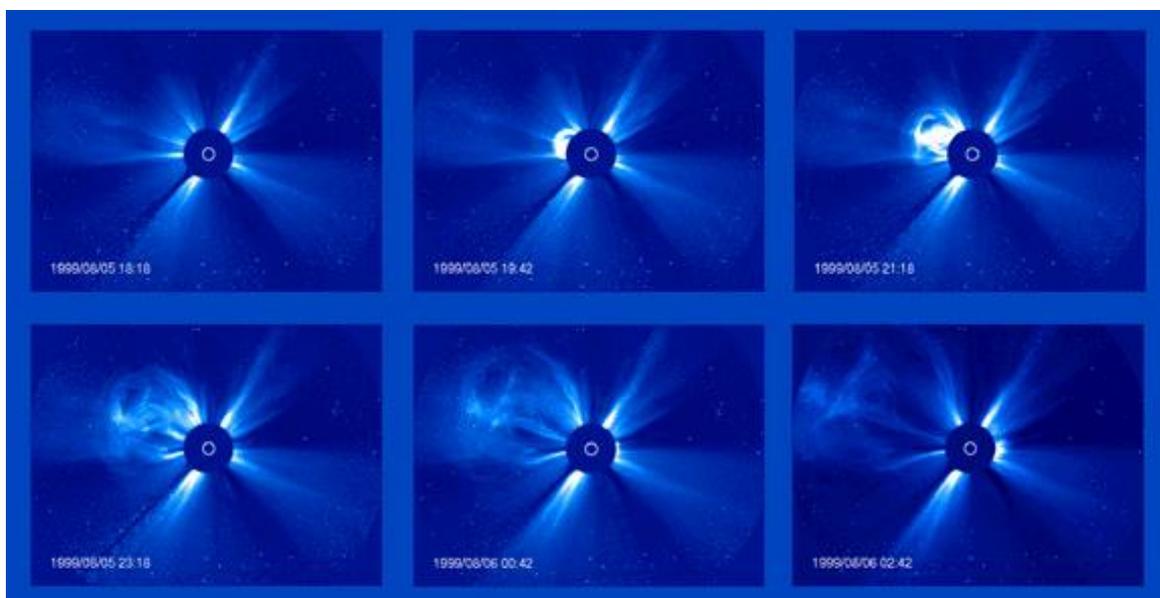


Figura 2.3.1: Sequência de imagens de coronógrafo mostrando uma CME, desde o momento da formação até o completo desprendimento da coroa solar. Fonte:

http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/cmeprogchart_prev.jpg

Quando observadas no meio interplanetário, as CMEs são denominadas “ejeções coronais interplanetárias de massa” (*interplanetary coronal mass ejections*, ICMEs). As observações de ICMEs no meio interplanetário são feitas por sondas e satélites orbitando a Terra, o ponto Lagrangeano interno L1 do sistema Sol – Terra, localizado a uma distância de aproximadamente 240 raios terrestres da Terra, ou orbitando o Sol. Como exemplos destes satélites podemos citar o SDO (*Solar Dynamics Observatory*), o ACE (*Advanced Composition Explorer*), o SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) e o STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*).



As nuvens de plasma resultantes de ICMEs observadas no meio interplanetário não apresentam uma única característica. Segundo Neugebauer e Goldstein (1997), as características das ICMEs são:

- 01 - Baixa temperatura de íons para uma dada velocidade do vento solar, razão para tal característica é a expansão da estrutura;
- 02 - Anisotropia não usual da distribuição de prótons com temperatura paralela superior a temperatura perpendicular ao campo magnético interplanetário, causado pela conservação do momento magnético dos íons à medida que o plasma se expande;
- 03 - Abundância de Hélio não usual;
- 04 - Feixes bidirecionais de elétrons supratérmicos e íons energéticos. Caracteriza uma configuração de campo magnético interplanetário; é possível que seja o campo magnético interno de uma ejeção, fechado e com extremidades presas no Sol;
- 05 - Suave e intenso campo magnético, interferindo nos valores de parâmetro β de plasma, que quando combinado com baixas temperaturas levam o parâmetro β à baixos valores. Este parâmetro é geralmente menor que 0,1;
- 06 - Presença de rotação do campo magnético. Algumas destas configurações são chamadas de nuvens magnéticas quando possuem: aumento de seu campo magnético por um fator maior que 2; suave rotação por um amplo intervalo de ângulo θ ; baixa temperatura iônica;
- 07 - Decréscimo do fluxo de raios cósmicos.

As nuvens magnéticas (*magnetic clouds*) são um subconjunto de CMEs observadas no meio interplanetário (ICME), representando aproximadamente 1/3 das ICMEs observadas em 1UA (Gosling, 1990). Elas apresentam estrutura bem definida e estão relacionadas às principais causas de tempestades geomagnéticas não recorrentes, devido às suas características de campo magnético.

CAPÍTULO 3

INTERAÇÕES SOL-TERRA

3.1 Índices Dst

O índice Dst (Disturbance Storm Time) é medido em nano Tesla (nT) e possui resolução temporal de uma hora. Este índice representa a medida simétrica da Corrente de Anel a partir da medida da variação da componente horizontal (H) do Campo Magnético Terrestre de superfície o qual é obtido através de estações distribuídas longitudinalmente em baixas latitudes. Após isso é subtraída a componente de períodos calmos e multiplicada pela secante da latitude média. A Figura 3.1.1 mostra o índice Dst para o mês de junho de 2013 como exemplo.

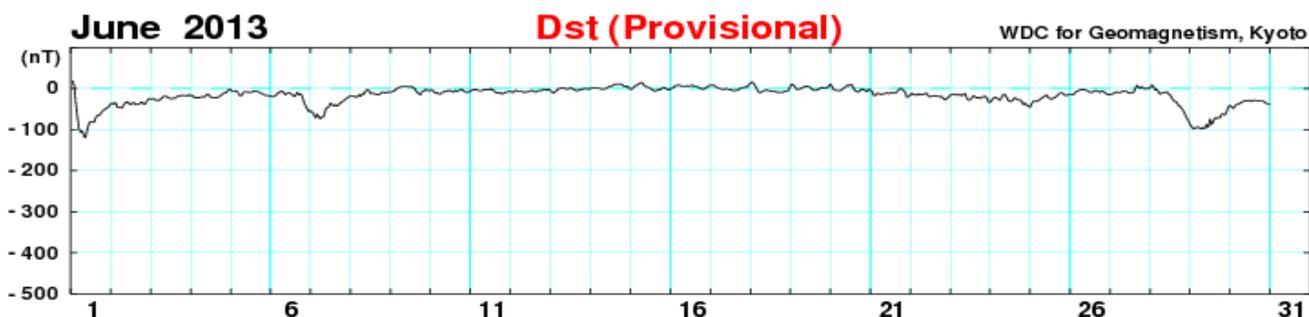


Figura 3.1.1: Variação do índice Dst para o mês de junho de 2013. Podemos observar distúrbios no início e no fim do mês.

Fonte: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201306/index.html

De acordo com a Tabela 1 podemos classificar as tempestades geomagnéticas pela variação do índice DST:

Tabela 1: Classificação das Tempestades Magnéticas.

Intensidade da Tempestade	Dst (nT)
Muito Intensa	$Dst \leq -250$
Intensa	$-100 \leq Dst \leq -250$
Moderada	$-50 \leq Dst \leq -100$
Fraca	$-30 \leq Dst \leq -50$

Fonte: Gonzalez et al. ,1994.

3.2 Índice Kp

Medido em nano Tesla (nT), o índice Kp representa a média padronizada do índice K, para 13 observatórios. K é um índice quase logarítmico de uma série de três horas da atividade geomagnética, medindo o desvio da componente horizontal mais perturbada do campo geomagnético. Sua escala pode variar de 0 até 9. A Figura 3.2.1 mostra o índice Kp do período entre o final do mês de Julho de 2012 até o final do mês de Agosto de 2012 como exemplo.

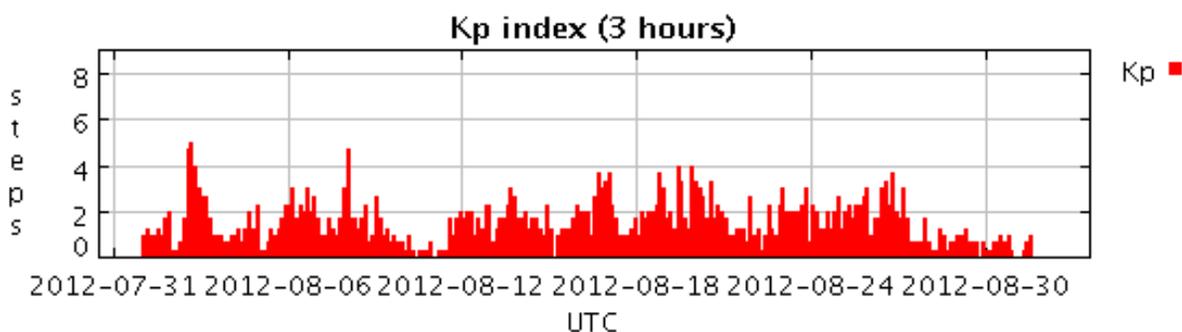


Figura 3.2.1: Índice Kp para o final de julho de 2012 até o final de Agosto de 2012
 Fonte: <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/home.do>

De acordo com a Tabela 2, podemos classificar a atividade geomagnética utilizando o índice Kp:

Tabela 2: Classificação da atividade magnética de acordo com o índice Kp.

Comportamento	Kp
Muito calmo	$0 \leq Kp \leq 1$
Calmo	$1 \leq Kp \leq 2 -$
Normal	$2 - \leq Kp \leq 3 +$
Perturbado	$3 + \leq Kp \leq 4 +$
Muito perturbado	$4 + \leq Kp \leq 9$

Fonte: Wrenn et al., 1987.

3.3 Tempestades Geomagnéticas

Tempestades Geomagnéticas são eventos que ocasionam grandes perturbações no Campo Magnético Terrestre, onde a Terra fica vulnerável a precipitação de partículas energéticas do Vento Solar, tendo recebido esta denominação desde a metade do século XIX (Gonzalez, 1994). A característica principal de uma Tempestade Geomagnética é o decréscimo acentuado da componente horizontal (H) do Campo Geomagnético e a posterior fase de recuperação (Kamide, 1998). O decréscimo atribui-se a um aumento da quantidade de partículas aprisionadas na magnetosfera. Este decréscimo é descrito quantitativamente através de vários índices dentre eles o índice Dst e o índice Kp, acima descritos.

As tempestades geomagnéticas podem causar danos tais como:

- Efeitos sobre a rede de transmissão de energia elétrica, gerando “black-out”.
- Danos em satélites causados por partículas de alta energia.
- Mudanças nos arrastos atmosféricos em satélites.

Além dos danos, as tempestades também provocam fenômenos fascinantes, como a formação das auroras em altas latitudes.



Figura 3.3.1: Aurora formada após uma tempestade geomagnética.

Fonte: http://www.nasa.gov/sites/default/files/images/696905main_HugoLAchre-20121010-orig_full.jpg

Todas as estruturas citadas acima podem causar ou ter influência na ocorrência de tempestades, sendo as CMEs e as nuvens magnéticas as principais responsáveis por tempestades mais intensas (Gosling et al., 1990, 1991).

Com os vários danos causados na Terra por estas estruturas fica óbvia a necessidade de um estudo detalhado sobre a natureza física das estruturas interplanetárias, bem como dos mecanismos que as geram no Sol.

De um modo geral a área científica responsável pelo estudo e sensoriamento remoto do geoespaço, através de observações *in situ*, é denominada de Clima Espacial, abrangendo todo o conjunto de variações das condições do meio interplanetário por influência da atividade solar. A Figura 3.3.2 mostra alguns dos fenômenos que afetam o Clima Espacial, mostrando os seus tempos de chegada na Terra, sua duração, as energias envolvidas e seus principais efeitos.



Figura 3.3.2: Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos. Fonte: Schwenn (comunicação pessoal), (apud Dal Lago, 2003).

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

4.1 Detector Multidirecional de Muons

O Detector Multidirecional de Muons (DMM) está em atividade no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/INPE – MCTI), em São Martinho da Serra, RS, Brasil (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38''O), no âmbito da parceria INPE/MCTI – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria (LACESM/CT – UFSM) desde março de 2001.

O DMM faz parte da rede internacional de detectores, denominada “Global Muon Detector Network” (GMDN), constituída por quatro detectores, instalados em diferentes

idades: Nagoya (Japão), Hobart (Austrália), Kuwait (Kuwait), São Martinho da Serra (Brasil). Existem observações complementares à GMDN realizadas em p em Greifswald (Alemanha) e em Yerevan (Armênia).

Os raios cósmicos de alta energia (muons) estão sujeitos a modulações consequentes de distúrbios interplanetários (Lockwood, 1971; Cane, 1993). Em adição a esta redução de intensidade, chamada decréscimo de Forbush, fenômenos precursores ao choque também foram relatados (Dorman, 1963; Dorman et al. 1967, 1972).

Decréscimos precursores devem resultar de um efeito “cone de perdas”, no qual o detector está observando partículas que passam na região de depleção de raios cósmicos atrás do choque. O efeito cone de perdas é geralmente restrito a partículas movendo-se de modo a afastar-se do choque e com ângulos de pitch pequenos. A Figura 4.1.1 destaca o equipamento – instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, Brasil – utilizado para a detecção deste efeito.



Figura 4.1.1: Foto do DMM instalado no Observatório Espacial do Sul.

A detecção e contagem dos muons no detector de São Martinho da Serra é realizada pelo método de contagem por cintilação. Quando um muon atinge o plástico cintilante, localizado dentro de cada módulo, alguns fótons são emitidos e detectados por uma fotomultiplicadora, acoplada em cada módulo. Assim, um muon é detectado através do registro de uma corrente elétrica. Quando é registrada a passagem de uma partícula pelo

detector na camada de cima e na de baixo, ao mesmo tempo, o computador conta como um muon. A Figura 4.1.2 mostra um esquema do DMM. Foi colocada uma camada de chumbo em baixo de cada camada do DMM, a fim de selecionar muons originados por partículas primárias com energia ~ 50 GeV.

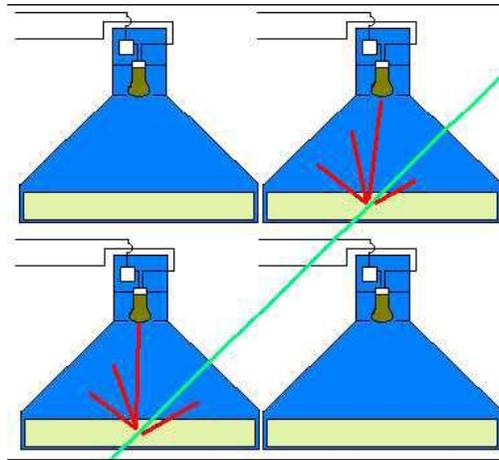


Figura 4.1.2: Esquema do método de contagem do DMM.

Fonte: DA SILVA, 2005 pg. 68.

Os detectores direcionais são identificados por uma letra seguida de um número, sendo U para a camada superior e L para a camada inferior.

Neste Projeto foram utilizados dados do DMM, instalado no OES, apenas para o estudo da modulação dos muons por estruturas interplanetárias.

4.2 Satélites

Neste Projeto foram utilizados dados satélites ACE, SOHO e SDO.

4.2.1 Satélite ACE

O satélite ACE (Advanced Composition Explorer) é um projeto da National Aeronautics and Space Administration (NASA), lançado em 25 de agosto de 1997 do Kennedy Space Center na Florida. O satélite possui 1,6 m de comprimento e 1 m de altura, não incluindo os quatro painéis solares e a antena do magnetômetro. No momento de lançamento sua massa era de 785 kg, sendo 189 kg de combustível inserção e correção da órbita. Seus painéis solares geram aproximadamente 500 W de potência.

O ACE encontra-se orbitando o ponto Lagrangeano L1, ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra, a aproximadamente 1,5 milhões de km da Terra.

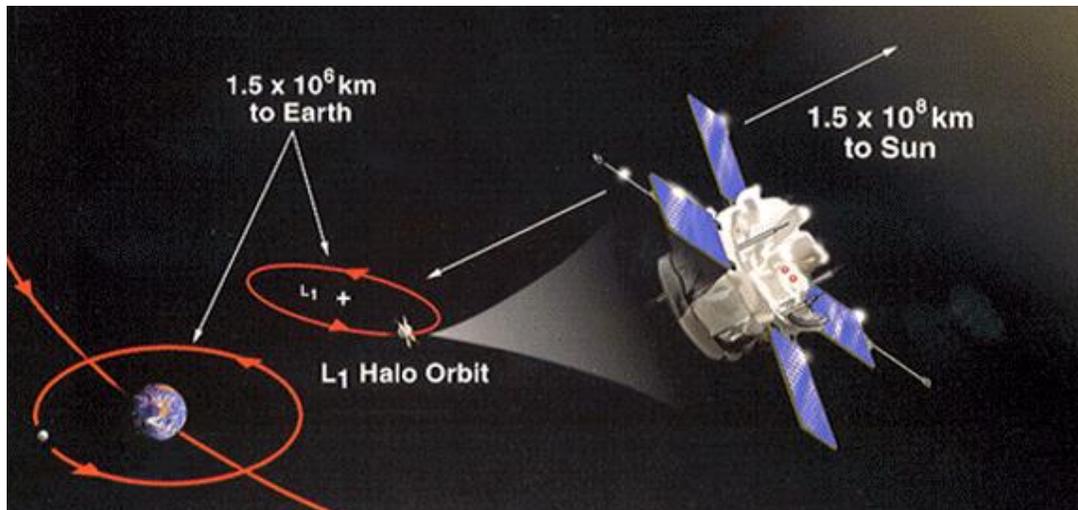


Figura 4.2.1.1: Ilustração representativa da órbita do satélite ACE; o ponto Lagrangeano L1; a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.

Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html

Os principais objetivos da missão do ACE são: determinar a composição elementar e isotópica de diversas substâncias, incluindo a coroa solar, o meio interplanetário e galáctico. O estudo relacionado ao Sol é feito através da medição direta da composição do vento solar, CMEs e de partículas solares expelidas durante alguma atividade solar.

Para coletar os dados usados para estudo o ACE conta com 10 instrumentos que podem ser observados na Figura abaixo.

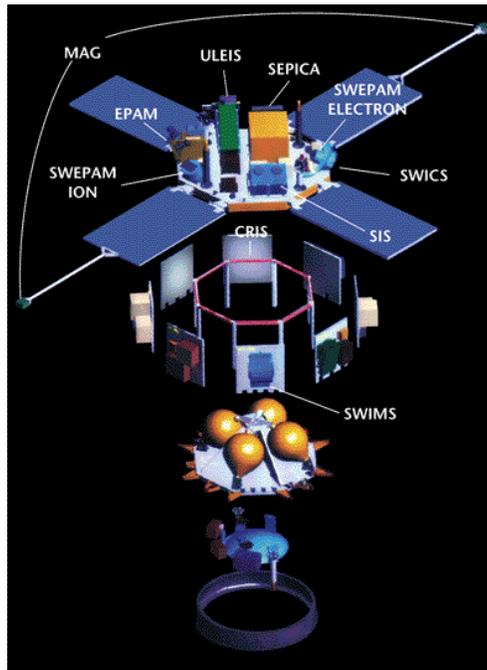


Figura 4.2.1.2: Ilustração da disposição dos instrumentos a bordo do ACE.

Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html

Foram utilizados neste Projeto, apenas dados dos equipamentos SWEPAM (*Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*) e MAG (*Magnetometer*). O SWEPAM mede o fluxo de partículas, elétrons e íons, no vento solar como funções da posição e da energia, fornecendo dados de parâmetros de plasma como, velocidade, temperatura e densidade do vento solar. Os dados do SWEPAM estão disponíveis no site da missão ACE (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>).

O MAG é basicamente um sistema composto por dois magnetômetros fluxgate, instalados no final de dois painéis solares opostos. O MAG fornece dados de campo magnético do meio interplanetário nos sistemas de coordenadas GSM e GSE. Os dados do MAG também estão disponíveis na página da missão ACE.

Todos os dados foram analisados em ambiente IDL (*Interactive Data Language*).

4.2.2 Satélite SOHO

A cooperação entre a European Space Agency (ESA) e a NASA propiciou a realização da construção do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*). O SOHO

foi lançado pela NASA em um foguete Atlas II-AS (AC-121) do Canaveral Air Station na Flórida, EUA, em 2 de dezembro de 1995. Com aproximadamente 4,3 metros de altura, 2,7 metros de largura e 3,7 metros de comprimento (9,5 m incluindo-se os painéis solares), o SOHO possuía massa de 1850 kg no momento do lançamento.

Estando em operação desde 1995, quase 20 anos, o SOHO faz um excelente trabalho ininterrupto de monitoramento do Sol, localizado, assim como o satélite ACE, orbitando o ponto Lagrangeano L1. A Figura 4.2.2.1 mostra um esquema de sua órbita.

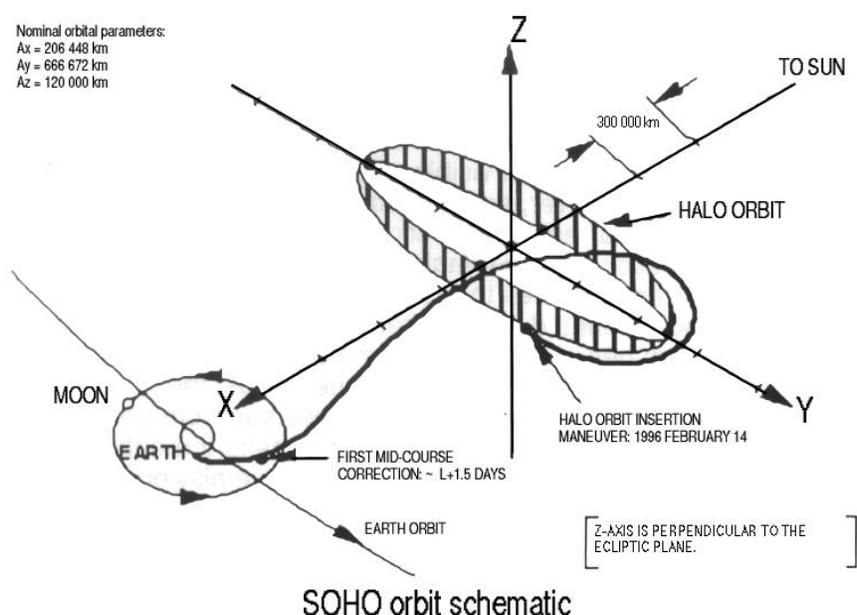


Figura 4.2.2.1: Esquema da órbita do Satélite SOHO.

Fonte: http://sohowww.nascom.nasa.gov/about/images/halo_orbit.gif

O SOHO foi desenvolvido para nos ajudar a compreender melhor a dinâmica do Sol e tentar responder as seguintes questões:

- Qual é a estrutura e dinâmica do interior solar?
- Por que a coroa existe e como ela é aquecida até uma temperatura extremamente elevada, de cerca de 1000000 °C?
- Como o vento solar produzido é acelerado?

O SOHO tem a bordo 12 instrumentos complementares, projetados e desenvolvidos por 12 consórcios internacionais, envolvendo 29 instituições de 15 países. Nove consórcios são liderados por cientistas europeus, os três restantes por cientistas norte-americanos. Mais



de 1500 cientistas de países em todo o mundo utilizam instrumentos SOHO ou que tenham dados SOHO em seus programas de investigação. (Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>).

Dentre os instrumentos do SOHO, será utilizado neste projeto apenas o LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*).

O LASCO consiste em um conjunto de três coronógrafos que fornecem imagens da coroa solar de 1,1 a 32 raios solares. Os três coronógrafos que compõem o LASCO são: C1 com uma cobertura de 1.1 a 3 raios solares; o C2, abrangendo uma cobertura incluindo partes do C1 e C3 e, se estende de 2 a 6 raios solares; o C3 que fornece imagens da coroa exterior, estendendo-se de 3.7 a 32 raios solares.

A utilização do LASCO tem como tarefa descobrir o mecanismo de aquecimento da coroa solar, bem como a origem e o mecanismo de aceleração do vento solar. Com isso, estuda a causa das CMEs e o seu papel na evolução temporal do campo magnético em grande escala, realizando ainda, a investigação do que é a distribuição e quais são as propriedades da nuvem de poeira zodiacal.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DE DADOS

5.1 Evento do dia 17 de março de 2013

Para o evento do dia 17 de março de 2013, foram analisados dados de parâmetros de plasma interplanetário obtidos do satélite ACE. Em sequência, estão plotados densidade,

temperatura, velocidade, componente Bz do campo magnético e o módulo de B.

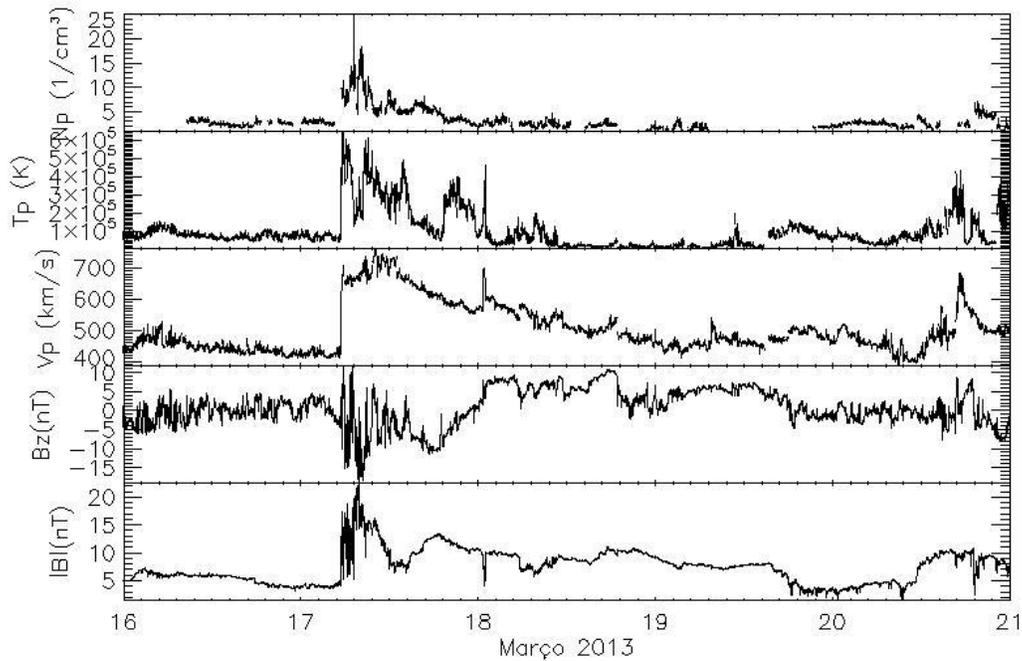


Figura 5.1.1: Parâmetros de plasma do satélite ACE de 16 a 21 de março de 2013.

Na Figura 5.1.1, podemos observar os parâmetros do vento solar relativamente calmos, antes do dia 17. Após essa data, ocorre um aumento abrupto em todos os parâmetros, o que caracteriza a passagem de uma estrutura interplanetária pelo satélite ACE. Durante o choque, a velocidade chega a aproximadamente 700 km/s e a componente Bz do campo magnético passa a ter valores negativos. O giro da componente Bz, passando de valores positivos a negativos é importante, pois se a componente Bz não for negativa, não há reconexão magnética quando a estrutura interagir com o campo magnético terrestre, consequentemente não ocorrerá tempestade geomagnética.

Para determinar a estrutura que causou a tempestade geomagnética do dia 17 de março, é necessária a determinação de alguns parâmetros, equacionados abaixo: pressão cinética, pressão magnética e parâmetro beta, razão entre as pressões.

$$\text{Pressão cinética: } P_k = N \cdot k \cdot T$$

$$\text{Pressão magnética: } P_B = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0}$$

$$\text{Parâmetro beta: } \beta = \frac{P_k}{P_B}$$

No gráfico abaixo podemos observar a temperatura, componente Z do campo magnético, módulo do campo, pressões cinética, magnética e o parâmetro beta. Após o choque, mostrado em azul na Figura 5.1.2, observamos um período de grande oscilação dos parâmetros, conhecido como bainha de plasma. Após o período de variações abruptas, representado na figura pela parte em vermelho, observamos uma predominância da pressão magnética sobre a pressão cinética, o que faz com que o parâmetro beta fique com valores próximos a 0,1. Associando o giro da componente Z do campo magnético ao parâmetro beta com valores muito pequenos, concluímos que a estrutura observada é uma nuvem magnética.

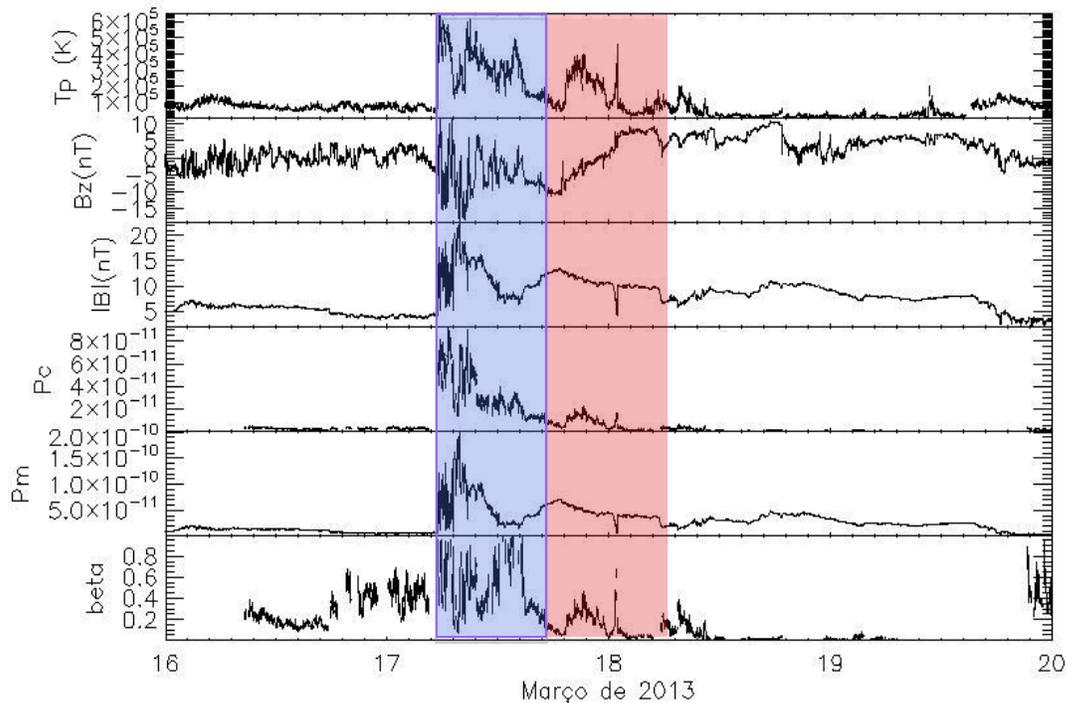


Figura 5.1.2: Parâmetros de plasma do satélite ACE de 16 a 20 de março de 2013.

Durante a passagem da estrutura pelo satélite ACE, podemos observar na Figura 5.1.3, uma queda de aproximadamente 1% na contagem de muons da direção leste, registrada pelo detector multidirecional de muons (DMM) do Observatório Espacial do Sul (OES).

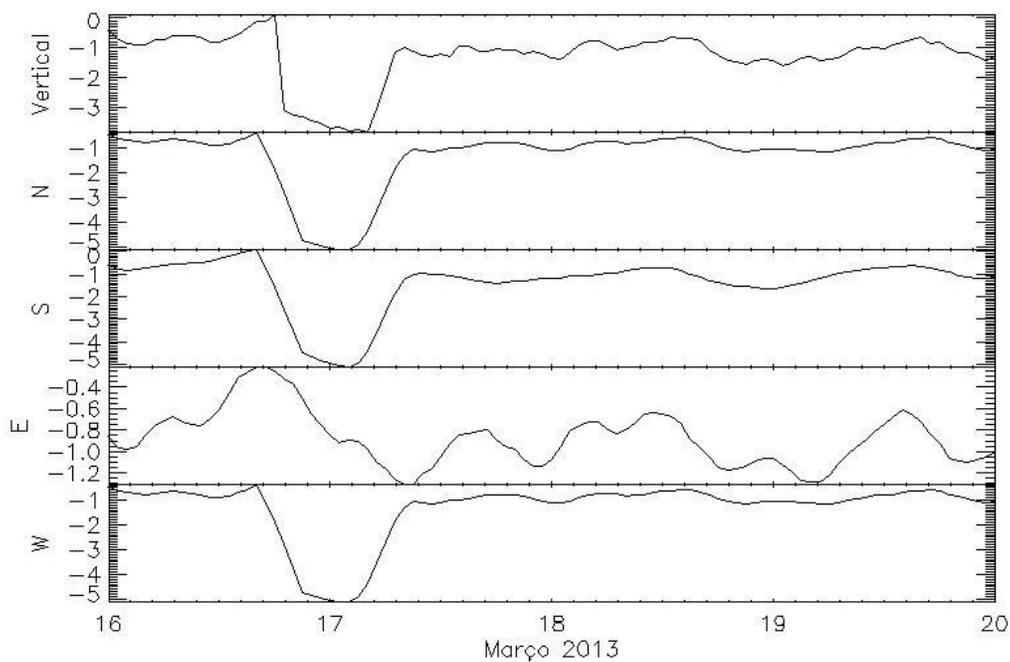


Figura 5.1.3: Variação percentual de muons do DMM do OES.

A fim de comparação, na Figura 5.1.4, plotamos a contagem de muons do DMM instalado em Nagoya, no Japão. Pode-se observar uma queda de aproximadamente 1% na contagem do detector, algumas horas antes da queda detectada no DMM de São Martinho da Serra. Essas quedas na variação percentual de muons ocorrem algumas horas antes do início da tempestade.

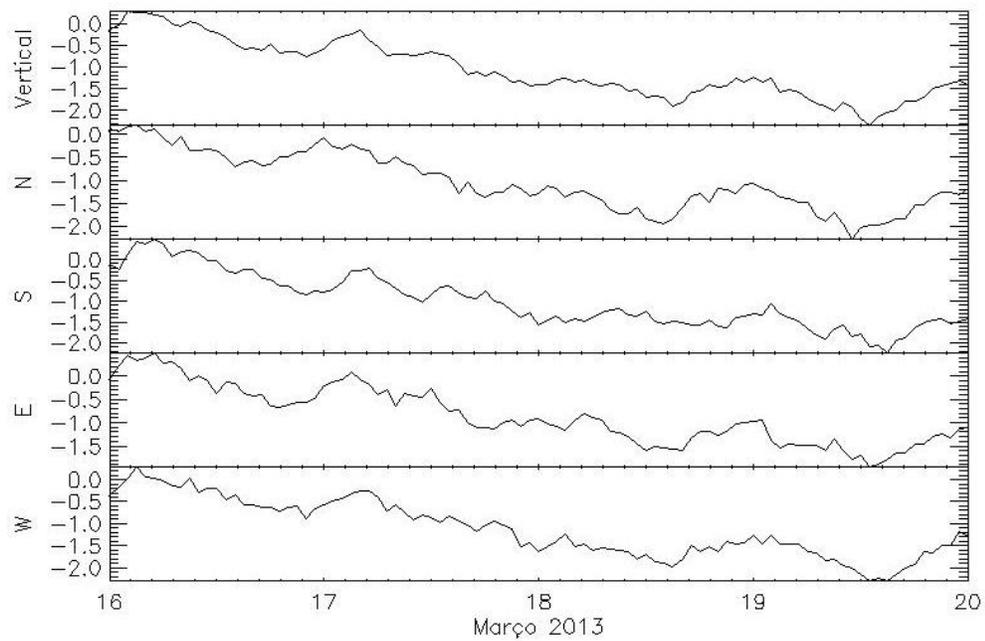


Figura 5.1.4: Variação percentual de muons do DMM instalado em Nagoya.

O índice Dst, plotado na Figura 5.1.5, chegou a -136 nT, sendo a tempestade estudada classificada como intensa.



Figura 5.1.5: Índice Dst para a tempestade estudada.



Segundo Dal Lago et al. (2004), podemos usar a seguinte relação empírica, para estimar a velocidade média de propagação de uma estrutura interplanetária e, com isso, estimar sua data de saída do Sol.

$$V_{eje} = 0.54V_{tr} + 161 \frac{km}{s}$$

onde V_{eje} representa a velocidade instantânea da ICME e, V_{tr} corresponde à velocidade de trânsito da CME, do sol até a Terra.

A nuvem magnética estudada se chocou com o satélite ACE com uma velocidade de 650 km/s. Obtemos assim uma velocidade de trânsito de 905 km/s para esta estrutura, utilizando a relação acima. Desta forma a estrutura deve ter saído 46 horas, aproximadamente 1.9 dias, antes do Sol. Como o choque ocorreu no dia 17, aproximadamente as 06:00 horas, a estrutura deve ter saído do Sol no dia 15 de março, em torno das 08:00 horas.

Utilizando dados do coronógrafo C2 e C3 do satélite SOHO, dados do satélite STEREO A e B e dados do catálogo CDAW disponível no link: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/, investigaremos os 2 eventos solares mais prováveis causadores do choque estudado.

Para entendermos melhor a importância dos satélites STEREO A e STEREO B na determinação do evento solar causador da tempestade estudada, representamos na Figura 5.1.6 suas posições em relação ao Sol.

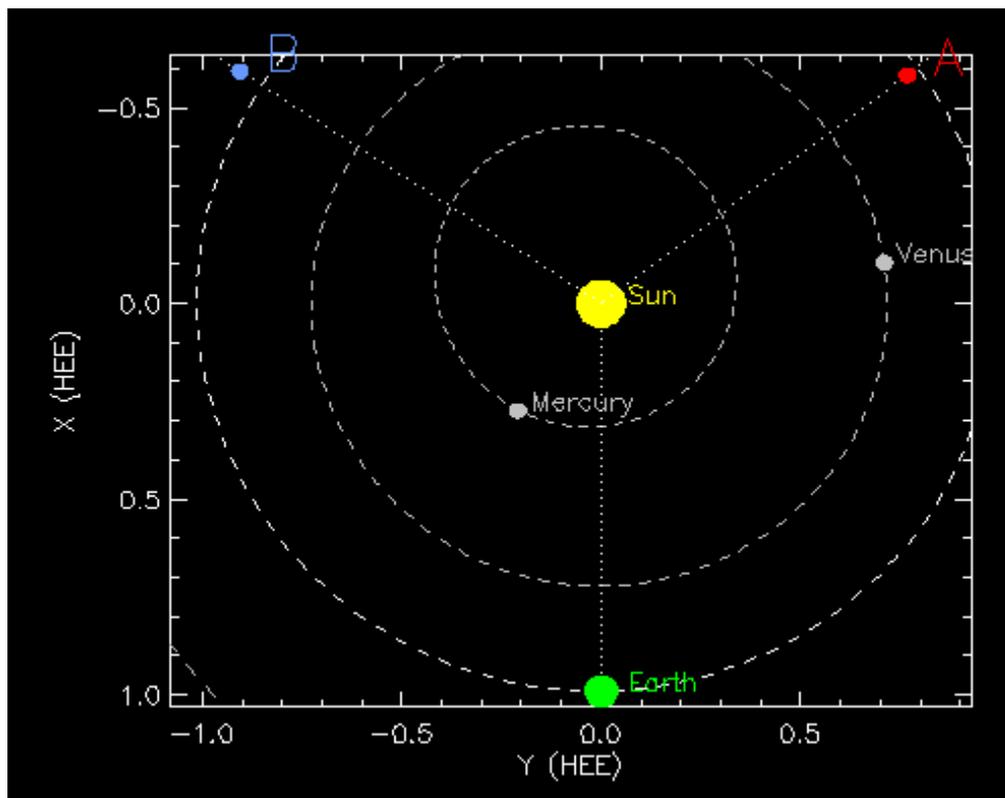


Figura 5.1.6: Imagem órbita dos satélites STEREO A (direita) e STEREO B (esquerda).

Fonte: <http://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/where.shtml>

Investigaremos primeiramente o evento das 21:38 horas do dia 14 de março. Na Figura 5.1.7 observamos uma sequência de imagens do satélite SOHO, representando o período antes e depois da CME. Não é possível determinar se a CME foi ejetada na direção da Terra.

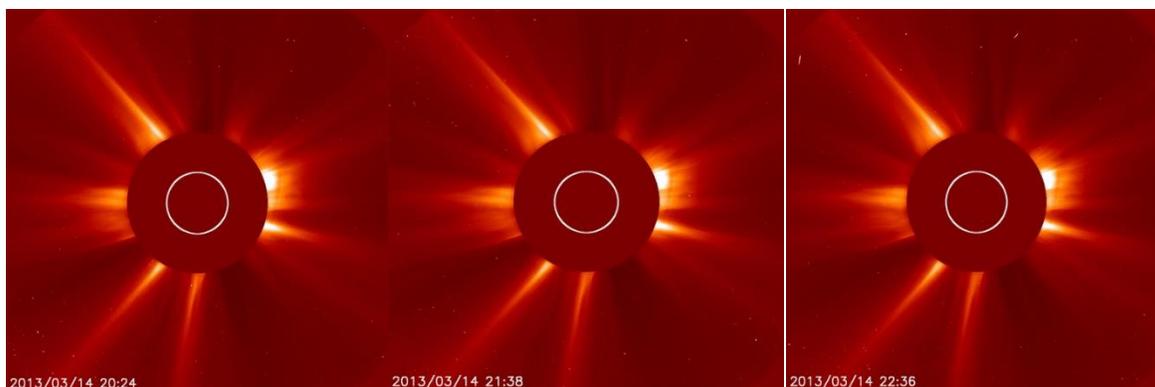


Figura 5.1.7: Sequência de imagens do coronógrafo C2, obtida pelo satélite SOHO.

Dados dos satélites STEREO A e B serão necessários para determinar se a CME foi ejetada na direção da Terra. Na Figura 5.1.8, não é possível observar uma CME sendo ejetada na direção da Terra, o que nos leva a concluir que este evento é de baixa intensidade e não é o causador da tempestade geomagnética do dia 17 de março.

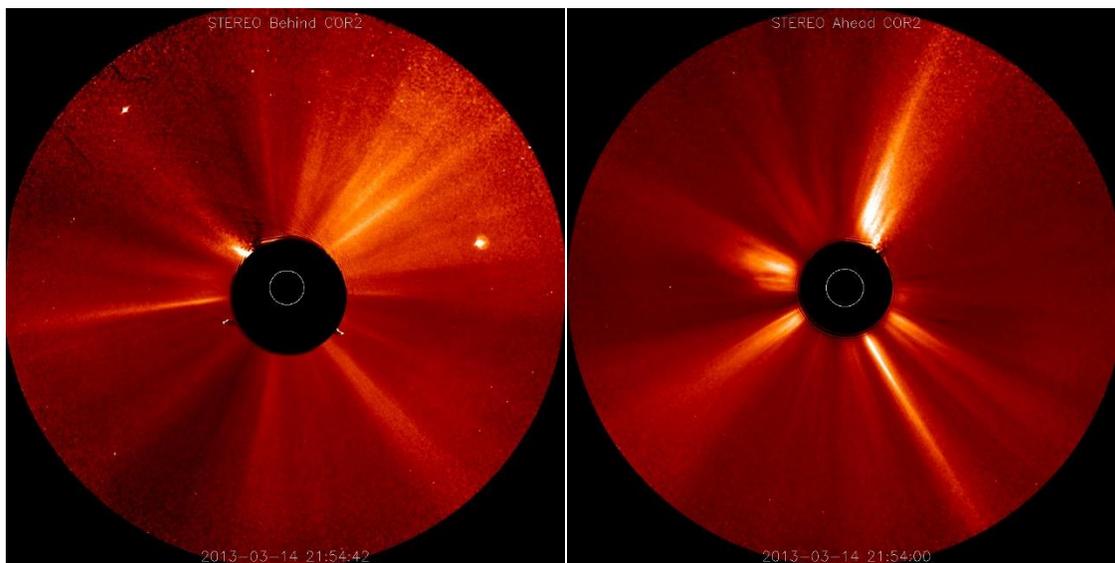


Figura 5.1.8: Imagem da CME obtida pelo STEREO A (direita) e STEREO B (esquerda).

A segunda possibilidade é a CME das 07:12 horas do dia 15 de março. Na Figura 5.1.9, obtida pelo coronógrafo C2 do satélite SOHO, observamos uma sequência de imagens que representam o período anterior e posterior à CME, que pode ser observada com início às 07:24 horas. Para determinar se a CME veio na direção da Terra ou saiu para trás do Sol utilizaremos novamente os satélites STEREO A e B, Figura 5.1.10.

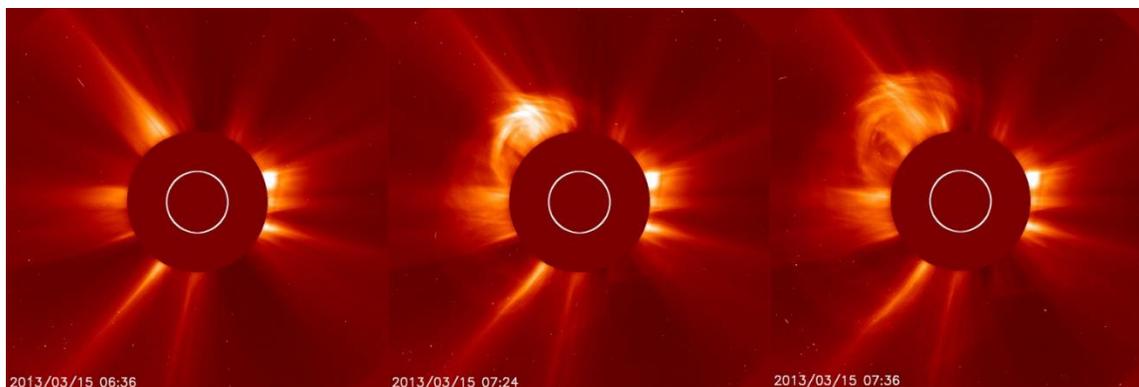


Figura 5.1.9: Sequência de imagens do coronógrafo C2.

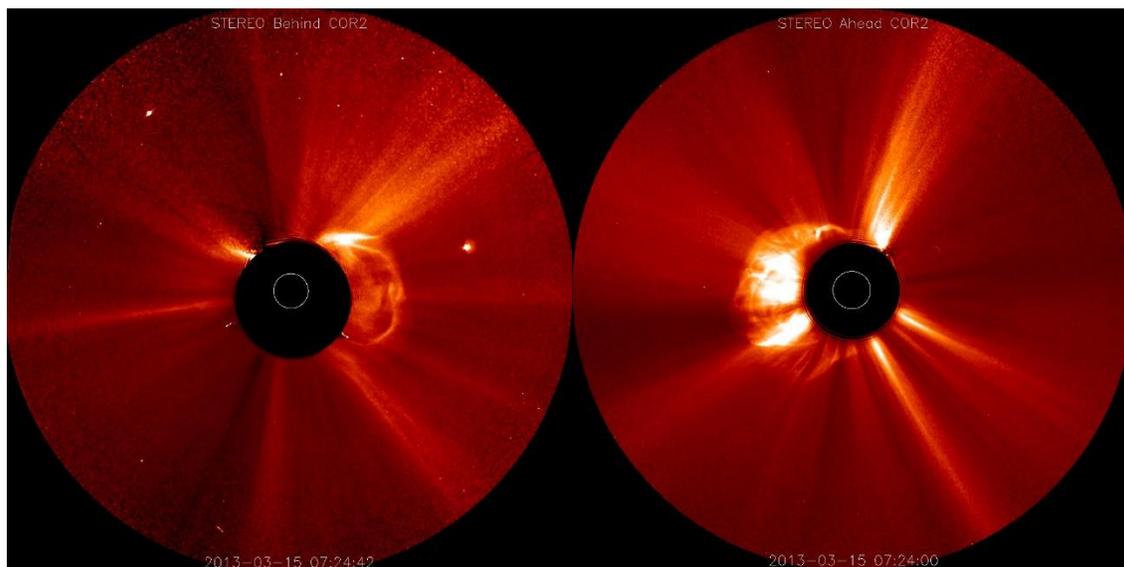


Figura 5.1.10: Imagem da CME do dia 15 de março, obtida pelo STEREO A (direita) e STEREO B (esquerda).

Na imagem do STEREO A podemos ver que a CME saiu para a esquerda, da mesma forma, observando a imagem do STEREO B, percebemos que a CME saiu para a direita. Dessa forma, utilizando o mapa de orientação da Figura 5.1.6, concluímos que a CME das 07:12 horas do dia 15 de março saiu na direção da Terra, sendo esta a provável causadora da tempestade estudada. Na Figura 5.1.11 podemos observar a CME pelo coronógrafo C3 do satélite SOHO.

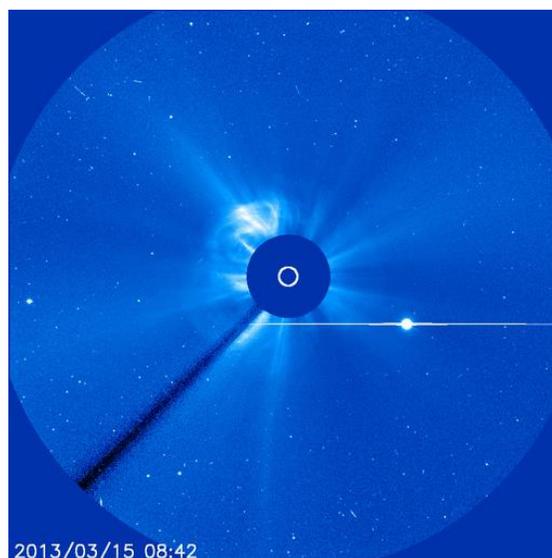


Figura 5.1.11: Imagem da CME do dia 15 de março, obtida pelo coronógrafo C3.



Temos assim um erro de cerca de 2% na previsão de saída da tempestade do Sol. Poucos eventos intensos foram registrados do dia 14 ao dia 15 de março, o que facilitou a determinação do precursor solar da tempestade geomagnética estudada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O evento estudado causou uma Tempestade Geomagnética capaz de danificar satélites, causar cintilações em aparelhos GPS dentre outros estragos. Quando queremos determinar a CME solar, causadora desta Tempestade, alguns problemas podem aparecer.

Em períodos relativamente calmos ou que não ocorreram muitas Tempestades em sequência, fica um pouco mais fácil fazer a linha do tempo e determinar o horário de saída da estrutura desejada do Sol. Esta geralmente é uma tarefa complicada.

O horário de saída do Sol, da Tempestade estudada, foi determinado utilizando dados dos satélites STEREO A e STEREO B e dados dos coronógrafos C2 e C3 do satélite SOHO. A ejeção observada nas Figuras 5.1.9, 5.1.10 e 5.1.11, encontrada como a causadora da Tempestade estudada, foi classificada como uma CME do tipo halo. Este tipo de ejeção tem potencial de atingir a Terra.

O índice DST chegou a -132 nT. Assim, a Tempestade Geomagnética estudada foi classificada como intensa.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAL LAGO, A.; Gonzalez, Walter D. ; de Lucas, Aline ; BRAGA, Carlos Roberto ; VIEIRA, LUCAS RAMOS ; STEKEL, TARDELLI RONAN COELHO ; Rockenbach, Marlos . CME dynamics using coronagraph and interplanetary ejecta data. *Advances in Space Research* **JCR**, v. 51, p. 1942-1948, 2013.

Gonzalez, Walter D. ; ECHER, Ezequiel ; Tsurutani, Bruce T. ; Gonzalez, Alicia L. ; DAL LAGO, A. Interplanetary Origin of Intense, Superintense and Extreme Geomagnetic Storms. *Space Science Reviews*, v. 158, p. 69-89, 2011.

DAL LAGO, A. ; SCHWENN, Rainer ; STENBORG, Guillermo ; GONZALEZ, Walter D. . Coronal mass ejection speeds measured in the solar corona using LASCO C2 and C3 images. *Advances in Space Research*, Inglaterra, v. 32, n. 12, p. 2619-2624, 2003.

CANE, H. V., **CMEs and Forbush Decreases**, *Space Science Ver.*, 10, 41-62, 2000.

Munakata, K., J. W. Bieber, S.–I. Yasue, C. Kato, M. Koyama, S. Akahane, K. Fujimoto, Z. Fujii, J. E. Humble, & M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, *J. Geophys. Res.*, 105, 27,457, 2000.

Gonzalez, W.D., B.T. Tsurutani, e A.L.C. De Gonzalez, Interplanetary origin of geomagnetic storms, *Space Science Reviews*, 88 (3-4), 529-562, 1999.

A. DAL LAGO, L. E. A. VIEIRA, E. ECHER, W. D. GONZALEZ, A. L. C. DE GONZALEZ, F. L. GUARNIERI, N. J. SCHUCH, R. SCHWENN. Comparison between halo CME expansion speeds observed on the sun, the related shock transit speeds to earth and corresponding ejecta speeds at 1 AU. *Solar Physics* **222**: 323–328, 2004.

DAL LAGO, A. ; VIEIRA, Luis Eduardo Antunes ; ECHER, Ezequiel ; GONZALEZ, Walter



D ; GONZALEZ, Alicia L Clua de ; GUARNIERI, Fernando Luis ; BALMACEDA, Laura Antonia ; SANTOS, Jean Carlo ; SILVA, Marlos Rockenbach da ; LUCAS, Aline de ; SCHUCH, Nelson Jorge . Great geomagnetic storms in the rise and maximum of solar cycle 23. **Brazilian Journal of Physics**, Brasil, v. 34, n. 4B, p. 1542-1546, 2004.

Hundhausen, A. J. An introduction. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. **Coronal mass ejections**, Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.1-7.

Neugebauer e Goldstein, Particle and field signatures of coronal mass ejections in the solar Wind. In: **Coronal Mass Ejections**, Crooker et al. ed., Geophysical Monograph Series, 1997.

Gosling, J. T., S. J. Bame, D. J. McComas, and J. L. Phillips, Coronal mass ejections and large geomagnetic storms, **Geophys. Res. Lett.**, 17, 901-904, 1990.

Gosling, J. T., D. J. McComas, J. L. Phillips, and S. J. Bame, Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections, **J. Geophys. Res.**, 96, 7831-7838, 1991.

SCHWENN, Rainer ; DAL LAGO, A. ; HUTTUNEN, Emilia ; GONZALEZ, Walter D . The association of coronal mass ejection with their effects near the Earth. **Annales Geophysicae- Atmospheres Hydrospheres And Space Sciences**, v. 23, n. AG/2004180, p. 1033-1059, 2005.

Sturrock, P. A.; Smith, S. M. Magnetic-field structure associated with coronal streamers. **Solar Phys.** v.5, n. 1, p.87-101, 1968.

Wrenn, G. L. (1987): Time-weighted accumulations $ap(t)$ and $Kp(t)$, **J. Geophys. Res.**, 92,10,125-10,129.