



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DO DECRÉSCIMOS DE RAIOS CÓSMICOS CAUSADO POR
NUVENS MAGNÉTICAS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE - CNPq/MCT)**

PROCESSO: CNPq N° 107417/2009-0

**Luciano Homercher Dalsasso – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Clima Espacial Previsão de Tempestades Magnéticas
LCEPTM/CRS/CCR/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: lucianofzx@hotmail.com**

**Dr. Ezequiel Echer - Orientador
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE – MCT
E-mail: eecher@dge.inpe.br**

Santa Maria, Julho de 2010



**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO
PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

PROJETO

**ESTUDO DE DECRÉSCIMOS DE RAIOS CÓSMICOS CAUSADO POR
NUVENS MAGNÉTICAS.**

Processo: CNPq N° 107417/2009-0

Relatório elaborado por:

Luciano Homercher dalsasso - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
E-mail: lucianofzx@hotmail.com

Dr. Ezequiel Echer – Orientador
Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT
E-mail: echer@dae.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch - Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br



Dados de Identificação

Título do projeto:

**ESTUDO DE DECRÉSCIMOS DE RAIOS CÓSMICOS CAUSADO POR
NUVENS MAGNÉTICAS.**

Processo: CNPq N° 107417/2009-0

Bolsista:

Luciano Homercher Dalsasso

Curso de Física – Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Ezequiel Echer

Divisão de Geofísica Espacial – DAE/CEA/INPE – MCT

Co-orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT

Colaboradores/Acadêmicos:

Níkolos Kemerich

Acadêmico do curso de Física – Bacharelado da UFSM

Aline Seeger

Acadêmico do curso de Física – Bacharelado da UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

**Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas –
LCEPTM/CRS/CCR/INPE-MCT**

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM.



Grupo de Pesquisa
Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações
Terra - Sol, NanoSatC-Br



Identificação

Recursos Humanos

Linhas de Pesquisa

Indicadores do Grupo

Identificação

Dados básicos

Nome do grupo: Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1996

Data da última atualização: 29/05/2010 18:15

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch
Natanael Rodrigues Gomes

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS, GEOMAGNETISMO:INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, Lat. 29°26'24"S, Long. 53°48'38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE, CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OV/ON, DPD/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo,



Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT
Relatório Final de Atividades 2010

Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, mecanismos de geração de energia no Sol, Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a Ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra, Eletricidade Atmosférica e seus Eventos Luminosos Transientes (TLEs). As Pesquisas base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, e de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babulau Trivedi, Otávio Santos Cupertino Durão, Natanael Rodrigues Gomes.

Recursos humanos	
Pesquisadores	Total: 46
Ademar Michels	Jean Pierre Raulin
Alan Prestes	Joao Paulo Minussi
Alicia Luisa Clúa de Gonzalez	Jose Humberto Andrade Sobral
Alisson Dal Lago	Juliano Moro
Antonio Claret Palerosi	Lucas Ramos Vieira
Barclay Robert Clemesha	Mangalathayil Ali Abdu
Caitano Luiz da Silva	Marcelo Barcellos da Rosa
Carlos Roberto Braga	Marco Ivan Rodrigues Sampaio
Cassio Espindola Antunes	Marcos Vinicius Dias Silveira
Clezio Marcos De Nardin	Nalin Babulau Trivedi
Cristiano Max Wrasse	Natanael Rodrigues Gomes
Cristiano Sarzi Machado	Nelson Jorge Schuch
Delano Gobbi	Nivaor Rodolfo Rigozo
Eurico Rodrigues de Paula	Odim Mendes Junior
Ezequiel Echer	Osmar Pinto Junior
Fabiano Luis de Sousa	Otavio Santos Cupertino Durão
Fábio Augusto Vargas dos Santos	Pawel Rozenfeld
Fernanda de São Sabbas Tavares	Petrônio Noronha de Souza
Fernando Luís Guarnieri	Polinaya Muralikrishna
Gelson Lauro Dal' Forno	Rafael Lopes Costa
Hisao Takahashi	Rajaram Purushottam Kane
Ijar Milagre da Fonseca	Severino Luiz Guimaraes Dutra
Jean Carlo Santos	Walter Demetrio Gonzalez Alarcon
Estudantes	Total: 22
Carlos Pinto da Silva Neto	Igor Freitas Fagundes
Cássio Rodinei dos Santos	Lucas Antunes Tambara
Claudio Machado Paulo	Lucas Lopes Costa
Dimas Irion Alves	Lucas Lourencena Caldas Franke
Edson Rodrigo Thomas	Luciano Homercher Dalsasso
Eduardo Escobar Bürger	Nikolas Kemmerich
Eduardo Weide Luiz	Rubens Zolar Gehlen Bohrer
Felipe Cipriani Luzzi	Tardelli Ronan Coelho Stekel
Fernando de Souza Savian	Thalis José Girardi
Guilherme Grams	William do Nascimento Guareschi



Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT
Relatório Final de Atividades 2010

[Guilherme Simon da Rosa](#)

[Willian Rigon Silva](#)

Técnicos	Total: 2
Fernando Sobroza Pedroso - Graduação - \Outra Função	
Henrique Sobroza Pedroso - Graduação - Analista de Sistemas	

Linhas de pesquisa	Total: 4
<ul style="list-style-type: none">AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIADesenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BRMAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMOMEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL	

Relações com o setor produtivo	Total: 0
--------------------------------	----------

Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	46
Estudante(s)	22
Técnico(s)	2



Linha de Pesquisa
MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

Linha de pesquisa

MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO

Nome do grupo: [Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#)

Palavras-chave: Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS; Desenvolvimento de Instrumentação Espacial; Eletricidade Atmosférica - Descargas Elétricas; Física Magnetosferas, Física Solar e Heliosférica; Geomagnetismo; Magnetômetros;

Pesquisadores:

[Alisson Dal Lago](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Clezio Marcos De Nardin](#)
[Gelson Lauro Dal' Forno](#)
[Jean Carlo Santos](#)
[Joao Paulo Minussi](#)
[Mangalathayil Ali Abdu](#)
[Nalin Babulal Trivedi](#)
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Osmar Pinto Junior](#)
[Pawel Rozenfeld](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

Estudantes:

[Claudio Machado Paulo](#)
[Dimas Irion Alves](#)
[Edson Rodrigo Thomas](#)
[Fernando de Souza Savian](#)
[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)
[Luciano Homercher Dalsasso](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)
[Willian Rigon Silva](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica; Geofísica Aplicada;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

Setores de aplicação:

Produtos e Serviços Voltados Para A Defesa e Proteção do Meio Ambiente, Incluindo O Desenvolvimento Sustentado

Objetivo:

Pesquisas: acoplamento da Heliosfera, Meio Interplanetário e Magnetosferas Planetárias, com dados de sondas espaciais e nas magnetosferas; modelos físicos/estatísticos; variação secular do Campo Total-F, 22883 nT no OES, na razão -28 nT/ano; deslocamento para oeste da AMAS observado desde 1985, via Cooperação: UFSM-ON-INPE com o SERC/KU-Japão; pulsações contínuas e/ou impulsivas observadas na componente H amplificadas pela precipitação na região da AMAS. Vice-Líder: Nalin Babulau Trivedi.



Linha de Pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Linha de pesquisa

MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

Nome do grupo: [Clima Espacial](#), [Magnetosferas](#), [Geomagnetismo: Interações Terra - Sol](#), [NanoSatC-Br](#)

Palavras-chave: Campo Magnético Interplanetário; Muons; Raios Cósmicos; Tempestade Geomagnética;

Pesquisadores:

[Alan Prestes](#)
[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)
[Alisson Dal Lago](#)
[Carlos Roberto Braga](#)
[Cassio Espindola Antunes](#)
[Ezequiel Echer](#)
[Fernando Luís Guarnieri](#)
[Jean Pierre Raulin](#)
[Juliano Moro](#)
[Lucas Ramos Vieira](#)
[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)
[Nelson Jorge Schuch](#)
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Rajaram Purushottam Kane](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

Estudantes:

[Claudio Machado Paulo](#)
[Dimas Irion Alves](#)
[Eduardo Escobar Bürger](#)
[Guilherme Grams](#)
[Lucas Antunes Tambara](#)
[Luciano Homercher Dalsasso](#)
[Nikolas Kemmerich](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;
Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

Setores de aplicação:

Aeronáutica e Espaço

Objetivo:

Pesquisar e prover em tempo real com o Telescópio Multidirecional de Raios Cósmicos-Muons, 2x(4mx7m), >50GeV, no Observatório Espacial do Sul, o monitoramento de muons e fenômenos das interações Sol-Terra, a previsão no Geoespaço de eventos solares e distúrbios geofísicos, graves efeitos das tempestades e subtempestades geomagnéticas sobre dispositivos e sistemas tecnológicos afetando equipes de trabalho e equipamentos na superfície da Terra e no Espaço. Vice-Líder: Alisson Dal Lago.



RESUMO

O objetivo do Projeto de Pesquisa consiste na análise e identificação de reduções na taxa de contagem de raios cósmicos secundários (muons), durante a passagem de nuvens magnéticas (NMs) pela Terra. Nuvens Magnéticas são um subconjunto dos remanescentes interplanetários de ejeções de massas coronais. Elas são identificadas como tendo o campo magnético forte (geralmente >10 nT), rotação grande no componente Z do vetor direção do campo magnético, baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta (definida pela razão entre o estresse térmico e pressão magnética). Para estudar as propriedades das nuvens magnéticas, dados do vento-solar como: densidade, velocidade, temperatura, campo magnético interplanetário são obtidos pelo satélite ACE – NASA, localizado em órbita no ponto Lagrangiano L1. Dados de raios cósmicos secundários, muons, são obtidos pelo Detector Multidirecional de Muons (MMD) protótipo que foi instalado, em 2001, no Observatório Espacial do Sul – OES / CRS / CCR / INPE – MCT, (29,4 ° S, 53,8 ° W, 480 m a.n.m.) e posteriormente pelo MMD ampliado que substituiu o protótipo em 2005. No presente Projeto de Pesquisa, são analisados e correlacionados dados do vento solar e de muons, observados durante o período pós-máximo e mínimo do Ciclo Solar 23 (2001 – 2009). Um catálogo das NMs observadas no Geoespaço da Terra foi compilada e suas propriedades estão sendo analisadas (polaridade, duração e magnitude da velocidade e campo magnético). A diminuição da taxa de contagem de raios cósmicos durante as ocorrências de NMs foram calculadas. Correlações entre NMs e os parâmetros de diminuição da taxa de contagem de muons são estudadas e interpretadas. Resultados são apresentados.



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	12
1.1 O SOL.....	13
1.2 VENTO SOLAR.....	19
1.3 EJEÇÃO DE MASSA CORONAL.....	20
1.4 NUVENS MAGNÉTICAS.....	23
1.5 RÁIOS CÓSMICOS.....	25
CAPÍTULO 2: METODOLOGIA.....	29
2.1 O SATÉLITE ACE.....	29
2.2 DETECTOR MULTIDIRECIONAL DE DE MUONS.....	33
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	39
CAPITULO 4: CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	44
ANEXO: RELATÓRIO PARCIAL.....	45



INDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1: Representação do GSM, sistema de coordenadas utilizado para definir a orientação de grandezas física no meio interplanetário como, por exemplo, o campo magnético interplanetário.....	12
FIGURA 1.2: Diagrama da estrutura do interior e da atmosfera solar.....	13
FIGURA 1.3.1: Imagem da fotosfera solar, os pontos mais escuros são manchas solares.....	15
FIGURA 1.3.2: imagem dos Grânulos solares.....	15
FIGURA 1.4: Região ativa 9169 registrada em 23 de setembro de 2000. A imagem mostra as regiões umbra e penumbra das manchas solares.....	16
FIGURA 1.5: Fotografia da cromosfera solar.....	16
FIGURA 1.6: Fotografia mostrando as espículas na cromosfera do Sol.....	17
FIGURA 1.7: Fotografia mostrando as proeminências solares.....	17
FIGURA 1.8: Imagem da coroa solar obtida pelo LASCO C2, em 6 de novembro de 1997, o círculo branco no centro da imagem representa o Sol.....	18
FIGURA 1.9: Seqüência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO em junho de 1999.....	20
FIGURA 1.10: Geometria de uma nuvem magnética.....	23
FIGURA 1.11: Intensidade dos raios cósmicos em função da energia.....	25
FIGURA 1.12: Diagrama esquemático de um chuveiro de raios cósmicos.....	27
FIGURA 1.13: Ilustração do bloqueio de raios cósmicos por uma CME.....	28
FIGURA 2.1: Ilustração representativa da órbita do satélite ACE, o ponto Lagrangeano L1, a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.....	30
FIGURA 2.2: Ilustração da disposição dos instrumentos a bordo do ACE.....	31
FIGURA 2.3: Tabela de dados obtidos do Satélite ACE, dados baixados da internet pelo bolsista para confecção de gráficos.....	32
FIGURA 2.4: Foto do prédio principal OES, onde está instalado o TCM, em São Martinho da Serra.....	33
FIGURA 2.5: Diagrama mostrando a área de cobertura da rede de TCMs, mostrando as visões assintóticas de cada telescópio.....	34
FIGURA 2.6: Gráficos contendo dados do meio interplanetário e dados da intensidade de muons em relação aos ângulos de <i>pitch</i>	35
FIGURA 2.7: Foto do protótipo do TCM instalado no OES em 2001.....	36
FIGURA 2.8: Foto do TCM instalado no OES em dezembro de 2005.....	36
FIGURA 2.9: Esquema do método de contagem do TCM.....	37
FIGURA 3.1: Painel de gráficos do meio interplanetário de abril de 2006.....	40
FIGURA 3.2: Painel mostrando gráficos dos demais parâmetros interplanetários analisados para abril de 2006.....	41
FIGURA 3.3: Painel mostrando gráficos da contagem relativa de muons detectados pelo TCM em abril de 2006.....	42

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO TEÓRICA

No Relatório escolheu-se trabalhar com os sistemas de coordenadas Geocentric Solar Magnetosphere (GSM). No GSM, a origem é fixada na Terra, a direção positiva do eixo “X” aponta para o Sol, a direção “Z” é paralela ao eixo de dipolo do campo geomagnético (positivo ao norte magnético) e a direção do eixo “Y” tangente à rota de translação, conforme é mostrado na figura 1.1.

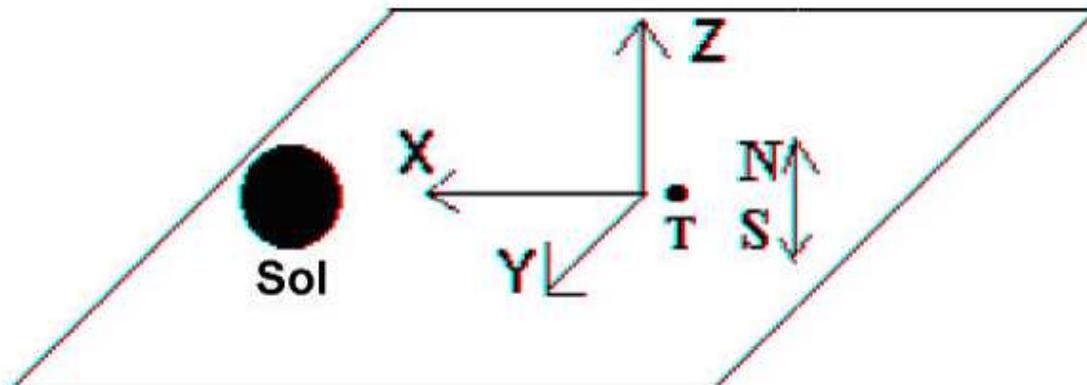


FIGURA 1.1: Representação do GSM, sistema de coordenadas utilizado para definir a orientação de grandezas física no meio interplanetário como, por exemplo, o campo magnético interplanetário. FONTE: Dal Lago, 2003

1.1 O SOL

O Sol é uma estrela ativa com aproximadamente 4,5 bilhões de anos localizada no braço de Orion a 33.000 anos-luz do centro da Via Láctea. Possui massa de $1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$, raio $6,965 \times 10^8 \text{ m}$ e luminosidade de $3,827 \times 10^{26} \text{ W}$, sua composição química é aproximadamente 91% hidrogênio, 9% hélio e 0,1% outros elementos. A energia térmica proveniente do Sol que sentimos é uma mínima parte da energia gerada em seu núcleo pelo processo de fusão dos núcleos de hidrogênio (prótons), formando núcleos de hélio (partículas alfa), Figura 1.2. O Sol encontra-se a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra, distância equivalente a cerca de 8 minutos-luz.

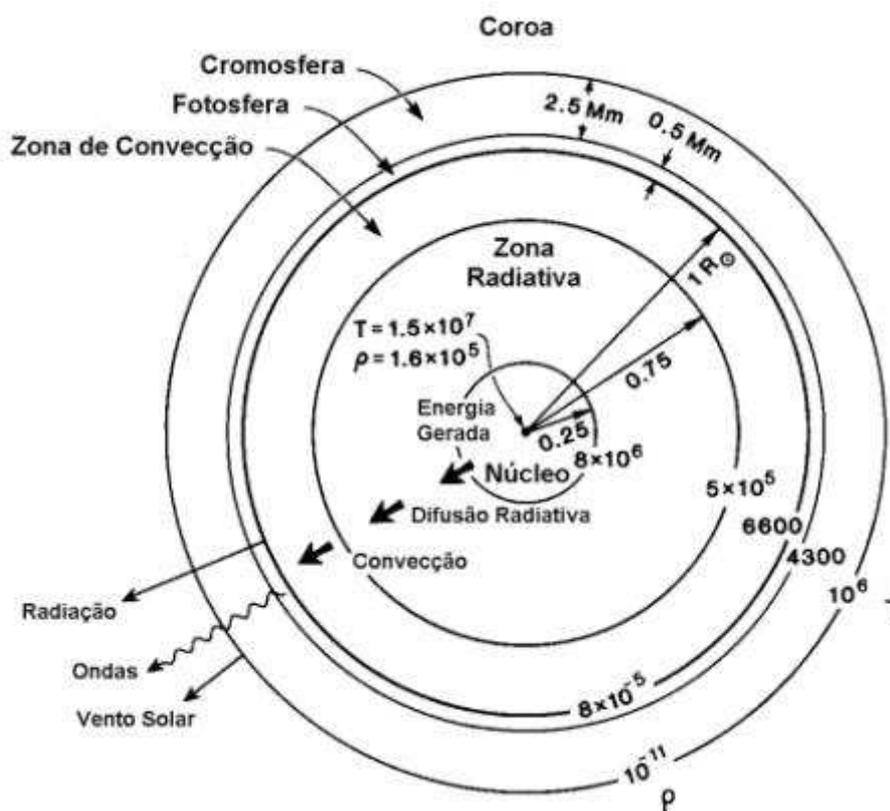


FIGURA 1.2: Diagrama da estrutura do interior e da atmosfera solar. FONTE: Adaptado de Kivelson e Russel (1995, p. 61).

O Sol é uma esfera massiva de gás comprimida pela sua própria atração gravitacional, sendo esses gases ionizados principalmente pela elevada temperatura do Sol. O Sol pode ser dividido em interior e atmosfera solar, sendo o interior solar constituído por núcleo, zonas radiativa e convectiva, e sendo a atmosfera subdividida



em fotosfera, cromosfera e coroa. Um diagrama da estrutura solar é mostrado na Figura 1.2.

O interior solar é composto de um núcleo radiativo e um envelope convectivo que pode chegar à superfície. O núcleo se estende até 0,25 raios solares, possuindo temperatura na ordem de $1,5 \times 10^7 K$ e densidade de $1,6 \times 10^5 kg/m^3$. Com isso, a compressão dos gases no núcleo atinge uma densidade cerca de 150 vezes a da água, são nessa região que ocorrem transformações de energia através de reações termonucleares. A zona radioativa é compreendida no intervalo entre 0,25 e 0,75 raios solares, nesta região a energia transformada no núcleo é dissipada pelo processo de difusão radioativa, a temperatura nessa região é da ordem de aproximadamente $8 \times 10^6 K$. A zona convectiva está compreendida no intervalo entre 0,75 e um raio solar, com uma temperatura variando aproximadamente entre $5 \times 10^5 K$ e $6600 K$, na zona convectiva a energia é dissipada através do processo de convecção.

A atmosfera solar é subdividida em fotosfera, cromosfera e coroa solar. A fotosfera é a camada mais inferior da atmosfera com espessura de $500 km$, o espectro luminoso na faixa do visível vem da fotosfera, a maior parte vem da sua região mais baixa, com $150 km$ de espessura. A temperatura nessa região varia de $6400 K$ na parte inferior até $4400 K$ na fronteira com a cromosfera.

A aparência da superfície da fotosfera é de um líquido em ebulição, cheia de grânulos que duram de 15 a 20 minutos. Os grânulos têm diâmetros em torno $500 km$ e demarcam topos das colunas convectivas que se forma na zona convectiva, a densidade média da fotosfera é aproximadamente de $10^{-23} kg/m^3$. A Figura 1.3.1 mostra imagens da fotosfera e a Figura 1.3.2 dos grânulos solares.

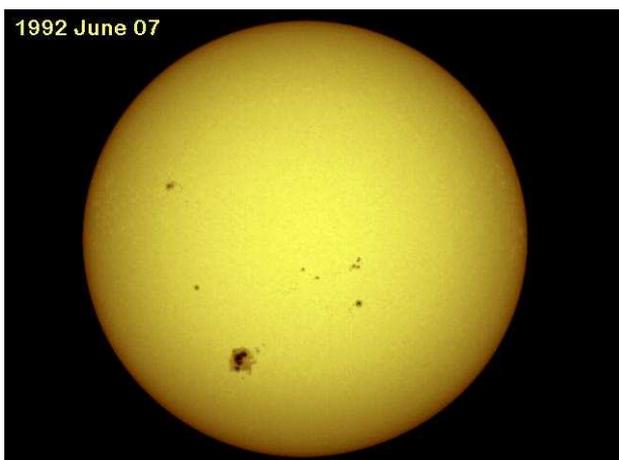


Fig. 1.3.1

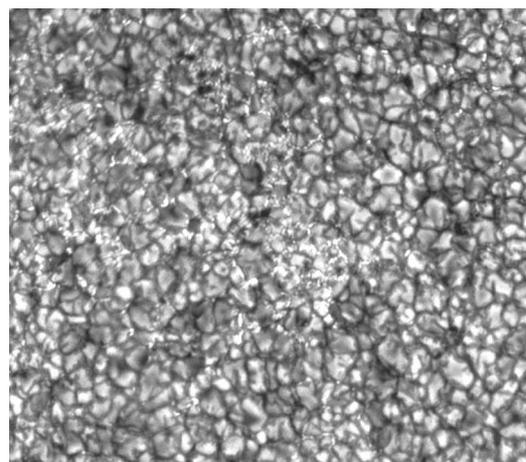


Fig. 1.3.2

FIGURA 1.3.1: Imagem da fotosfera solar, os pontos mais escuros são manchas solares.

FONTE: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/w920607.jpg>

FIGURA 1.3.2: imagem dos Grânulos solares. FONTE: Modificado de

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml#Granules>

As granulações são chamadas de manchas solares. Galileo Galilei foi o primeiro a observar as manchas solares projetando a imagem do Sol em um pedaço de papel. Isto mostrou a Galileio, e a todos os astrônomos e filósofos da época, que a superfície do Sol era imperfeita. Galileio notou o movimento aparente das manchas através do disco solar mostrando que o Sol possuía rotação em torno do seu eixo.

As manchas solares se formam aos pares e são constituídas de duas partes a umbra, região central e escura, com temperatura em torno de **3800 K** e a penumbra, região mais clara que o centro da mancha e mais escura que a vizinhança. A Figura 1.4 mostra em detalhes uma região ativa registrada em setembro de 2000 pelo satélite SOHO, onde foi observado um grupo de manchas solares.

A região mostrada na Figura 1.4 é a região ativa 9169, e foi um dos maiores grupos de manchas solares observados no ciclo solar 23. Em 23 de setembro de 2000, a área de superfície coberta pelas manchas era de aproximadamente 12 vezes a área da superfície da Terra, representada na mesma proporção pelo círculo preto na parte inferior da imagem.

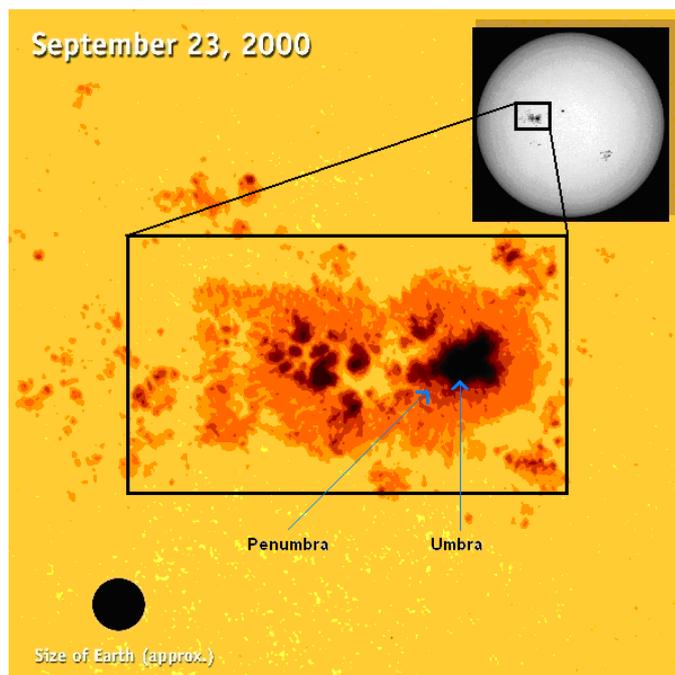


FIGURA 1.4: Região ativa 9169 registrada em 23 de setembro de 2000.

A imagem mostra as regiões umbra e penumbra das manchas solares.

FONTE: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/sunspot00.html>

A cromosfera, situada acima da fotosfera, com espessura de aproximadamente $2,5 \times 10^5$ m, temperatura no intervalo entre 430 K e 10^6 K, apresenta densidade na ordem de 10^{-11} kg/m³. Esta camada pode ser vista observando-se o Sol com um espectrógrafo ou um filtro do tipo h-alfa. Com o auxílio destes é possível observar estruturas presentes na cromosfera solar como proeminências, filamentos, fáculas, plages e espículas. A Figura 1.5 mostra uma fotografia da cromosfera solar.

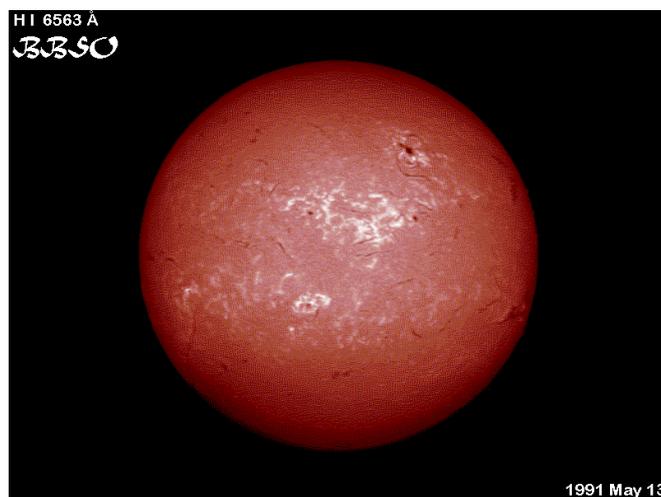


FIGURA 1.5: Fotografia da cromosfera solar.

FONTE: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/HI6563_fulldisk.jpg

A Figura 1.6 mostra as espículas observadas na cromosfera solar, que são jatos de gás expelidos com temperaturas menores que a cromosfera.

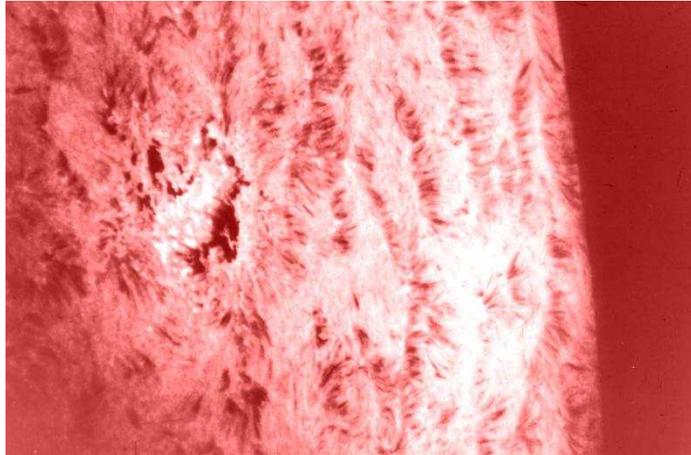


FIGURA 1.6: Fotografia mostrando as espículas na cromosfera do Sol.
FONTE: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/spicules_color.jpg

A Figura 1.7 mostra as proeminências observadas a partir da cromosfera solar, que são nuvens densas de material que são suspensas acima da superfície do Sol por *loops* de campo magnético.

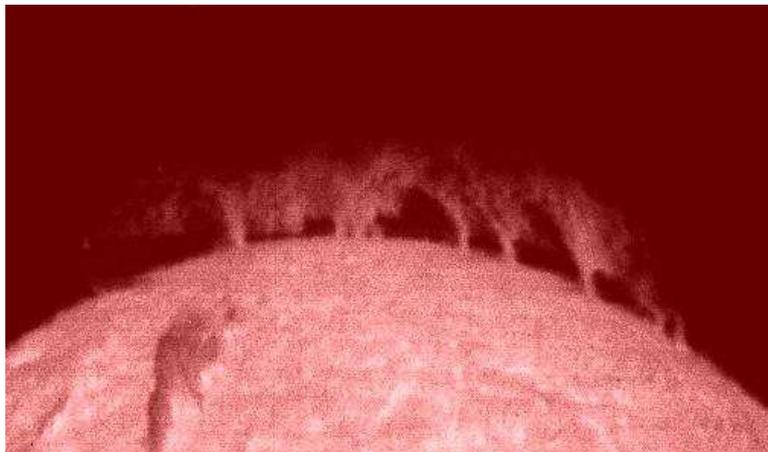


FIGURA 1.7: Fotografia mostrando as proeminências solares.
FONTE: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/prominence.jpg>

A coroa solar é a última camada do Sol, situada acima da cromosfera e sem limite superior, possui uma temperatura da ordem de $10^6 K$, sendo essa camada mais importante da atmosfera solar, por causa da evaporação constante de seu material



constituindo o vento solar. A coroa pode ser visualizada em eventos de eclipses, onde o disco solar é encoberto pela Lua ou através de instrumentos do tipo coronógrafos, como o LASCO (*Large Angle and Spectroscopic Coronagraph*) que é uma câmera a bordo do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) que coloca um anteparo na frente da câmera e obtém a imagem apenas da coroa solar. A Figura 1.8 mostra uma imagem obtida do LASCO C2 da coroa solar. É na coroa que se podem observar as estruturas como ejeções coronais de massa (CMEs) e explosões solares (do inglês *flare*).

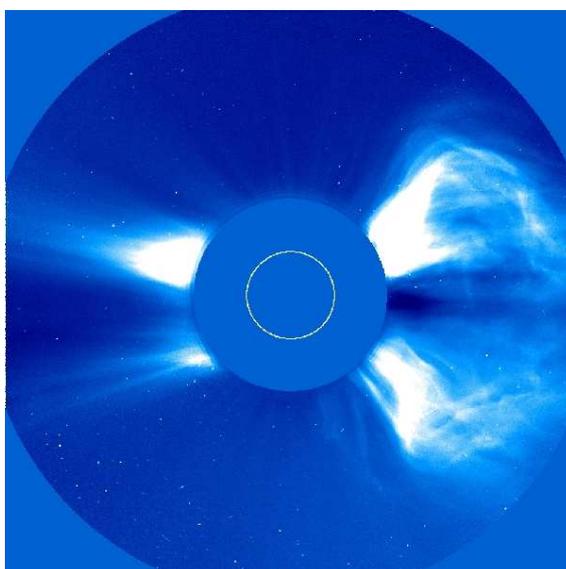


FIGURA 1.8: Imagem da coroa solar obtida pelo LASCO C2, em 6 de novembro de 1997, o círculo branco no centro da imagem representa o Sol. Na imagem é possível ver uma CME.
FONTE: http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/SolarCorona/large/las018_prev.jpg



1.2 VENTO SOLAR

A existência do vento solar foi proposta na década 1950 com base nas evidências que pequenas variações no campo magnético terrestre haviam sido produzidas por fenômenos observados no Sol. Sua existência também foi usada para explicar a direção radial ao Sol das caudas dos cometas independente da sua direção de propagação. O vento solar é um plasma, ou seja, gás composto por íons e elétrons emitidos radialmente pelo Sol como resultado da diferença entre as pressões dos gases da coroa solar e do espaço interestelar nas proximidades do Sol. O vento solar passa pela Terra com uma velocidade média de **450 km/s** e tem densidade média de prótons e elétrons de **7 g/cm³**. Seu fluxo propaga-se até uma região, cuja localização não é bem definida denominada heliopausa onde a sua pressão e a do vento interestelar se equilibram.

O vento solar não é expelido de maneira homogênea, pois ele depende da configuração do campo magnético solar. O plasma da coroa pode estar aprisionado em um campo magnético intenso em forma de laços e uma grande emissão de raios-X é associada com a formação destes laços na coroa solar. O plasma que escapa destes laços forma um fluxo coronal que se expande para o espaço. Nos lugares da coroa onde o campo magnético solar não forma laços, mas se estende em direção aproximadamente radial, forma-se o vento solar rápido. A formação de um rápido fluxo de plasma resulta com isso em baixas densidades de plasma e radiação eletromagnética, adquirindo essas regiões uma coloração mais escura que a vizinhança. Essas regiões são denominadas de buracos coronais (Schunk e Nagy, 2000).

1.3 EJEÇÃO DE MASSA CORONAL

Uma ejeção de massa coronal (do inglês *coronal mass ejection* - CME) é um desprendimento de plasma solar, observado a partir da coroa, que se propaga através do espaço interplanetário e produz distúrbios geomagnéticos quando interage com o campo magnético terrestre. 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, 1998).

A origem das CMEs pode estar relacionada com estruturas chamadas de *helmet streamers* que é 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 seqüência de imagens do coronógrafo, na Figura 1.9 mostra a 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).

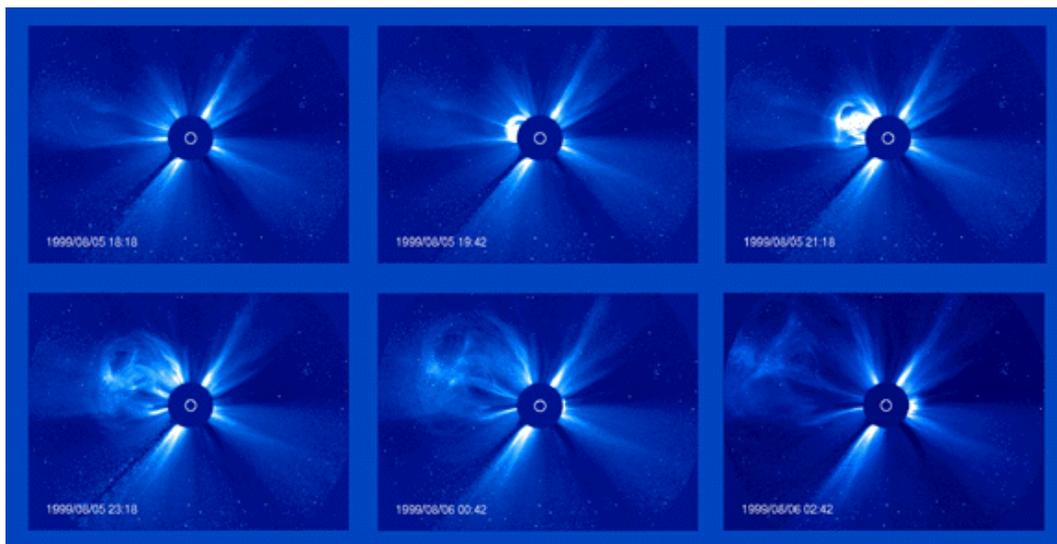


FIGURA 1.9: Seqüência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO em junho de 1999.

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



O coronógrafo mede a radiação fotosférica espalhada por elétrons no plasma coronal ionizado, mostrando a estrutura da densidade da Coroa. Tipicamente as CMEs têm uma frequência relacionada com o ciclo solar, podendo ser observado cerca de um evento por semana, no mínimo do ciclo enquanto podem ocorrer 2 a 3 eventos por dia nos períodos do máximo da atividade solar.

As CMEs foram divididas em dois tipos principais (Sheeley et al., 1999): CMEs graduais, aparentemente formadas pela elevação de proeminências e suas cavidades, vindas da baixa coroa, apresentando aceleração gradual até valores da ordem de 400 km/s^2 a 600 km/s^2 e CMEs impulsivas, associadas a explosões e ondas EIT (*Extreme Ultraviolet Image Telescope*), que são ondas observadas em comprimento de onda ultravioleta, não apresentando aceleração e com velocidades iniciais maiores que 750 km/s . Portanto a relação entre explosões e CMEs não está esclarecida, não sendo possível afirmar que um é causa/efeito do outro ou que são eventos independentes.

Quando observadas no meio interplanetário, as CMEs são denominadas “ejeções coronais interplanetárias de massa” (do inglês *interplanetary coronal mass ejections*, ICMEs). As observações de ICMEs no meio interplanetário são feitas por sondas e satélites orbitando a Terra fora da magnetosfera terrestre, o ponto Lagrangeano interno L1 do sistema Sol – Terra, localizado a aproximadamente 240 raios terrestres da Terra. Estes instrumentos capturam imagens do Sol e medem intensidade e direção do campo magnético e parâmetros de plasma tais como, temperatura, densidade e velocidade de íons e elétrons do vento solar. Dentre os diversos satélites usados para este fim podemos citar o ACE (*Advanced Composition Explorer*), 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), tais características das ICMEs são:

- Baixa temperatura de íons para uma dada velocidade do vento solar, razão para tal característica é a expansão da estrutura;
- 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;

- Abundância de Helio não usual;
- Abundância de outras espécies iônicas;
- Feixes bidirecionais de elétrons supratermais 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;
- Suave e intenso campo magnético interfere nos valores de parâmetro β de plasma, que quando combinado com baixas temperaturas levam o parâmetro β a baixos valores. Este parâmetro é geralmente menor que 0,1;
- 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; e baixa temperatura iônica;
- Decréscimo do fluxo de raios cósmicos.

No ano de 1982, Howard e colaboradores relataram à observação de uma CME que apresentava uma estrutura anular que cobria quase todo o entorno do ocultador do coronógrafo usado na missão P78-1. Os autores chegaram a conclusão que a essa CME se deslocava em direção a Terra devido à observação de uma tempestade geomagnética subsequente, e devido à forma anular da estrutura denominaram-na ejeção coronal de massa “halo”.

1.4 NUVENS MAGNÉTICAS

As nuvens magnéticas (do inglês *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 estruturas bem definidas e estão relacionadas às principais causas de tempestades geomagnéticas não recorrentes devido às suas características de campo magnético.

Burlaga et al. (1981) definiram nuvem magnética como uma estrutura com extensão radial com aproximadamente 0,25 UA (em 1 UA), levando aproximadamente 24 h para atravessar o satélite observador, com um campo magnético mais intenso que o do vento solar normal, normalmente $B > 10 \text{ nT}$, suave rotação da direção do campo magnético em um grande ângulo, próximo a 180° , baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta, $\beta \approx 0,1$.

Uma nuvem magnética observada por vários satélites possibilitou o estabelecimento de sua geometria, mostrada na Figura 1.10, adaptada de Burlaga et al. (1990). Na figura estão indicados os satélites que observaram o evento ocorrido em 5 de Janeiro de 1978: IMP-8, Hélios A e Voyager 2. Na Figura 1.10, os “x” representam a fronteira dianteira da nuvem magnética vista por cada um dos satélites, e os círculos representam a fronteira traseira. As setas indicam a direção do campo magnético observado por cada um dos satélites. Esta situação é bastante rara, pois normalmente não é possível observar nuvens magnéticas com mais de um satélite simultaneamente.

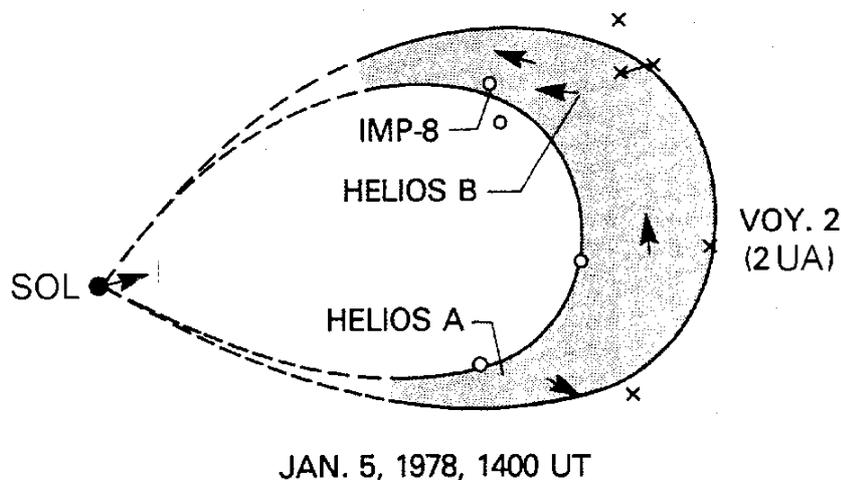


FIGURA 1.10: Geometria de uma nuvem magnética.

FONTE: Adaptado de Burlaga et al. (1990, p.376).



A razão principal das nuvens magnéticas estarem entre as principais causas de tempestades magnéticas é o fato de frequentemente apresentarem campo magnético B_z negativo e intenso, $B > 10$ nT por intervalos de tempos superiores à 3h, cumprindo os critérios de Gonzáles e Tsurutani (1987) para a ocorrência de tempestades intensas.

Devido ao aumento de densidade e velocidade, a pressão exercida na magnetosfera terrestre causa uma repentina compressão na magnetosfera e um salto positivo na componente horizontal H. Este salto é representado por um aumento do índice Dst e é observado na chegada do choque. Nesta fase ocorre o impulso repentino (*sudden impulse*, SI). Desde que SI é seguido pela fase principal da tempestade, é chamado de começo repentino de tempestade (*sudden impulse commencement*) o início da tempestade ocorre quase coincidentemente com o giro do CMI para a direção sul nos limites da nuvem magnética (Gonzalez et al., 1989). O desenvolvimento da fase principal da tempestade é rápido.

1.5 RÁIOS CÓSMICOS

Os raios cósmicos são partículas carregadas com um espectro de energia que varia desde alguns MeV até acima de $10^{21} eV$, a Figura 1.11 mostra um gráfico da distribuição da energia dos raios cósmicos. Existem dois fatos relativos ao espectro de energia que são importantes para a discussão sobre a origem dos raios cósmicos galácticos. Um é a isotropia dos raios cósmicos medida para energias $\leq 10^{15} eV$ e o outro é sua constância sobre um longo período de tempo, aproximadamente 10^9 anos.

Com isto, a fonte dos raios cósmicos deve produzir partículas com energia próxima a $10^{21} eV$ com um espectro de potências dado por $I(E) \propto E^{-2.7}$ (Mursula e Usoskin, 2003). Além disso, a energia total produzida deve ser da ordem de $10^{49} ergs/ano$ em nossa galáxia, os raios cósmicos devem ser isotrópicos e constantes durante 10^9 anos. Também, o espectro primário deve incluir elementos pesados em torno de aproximadamente $Z = 100$.

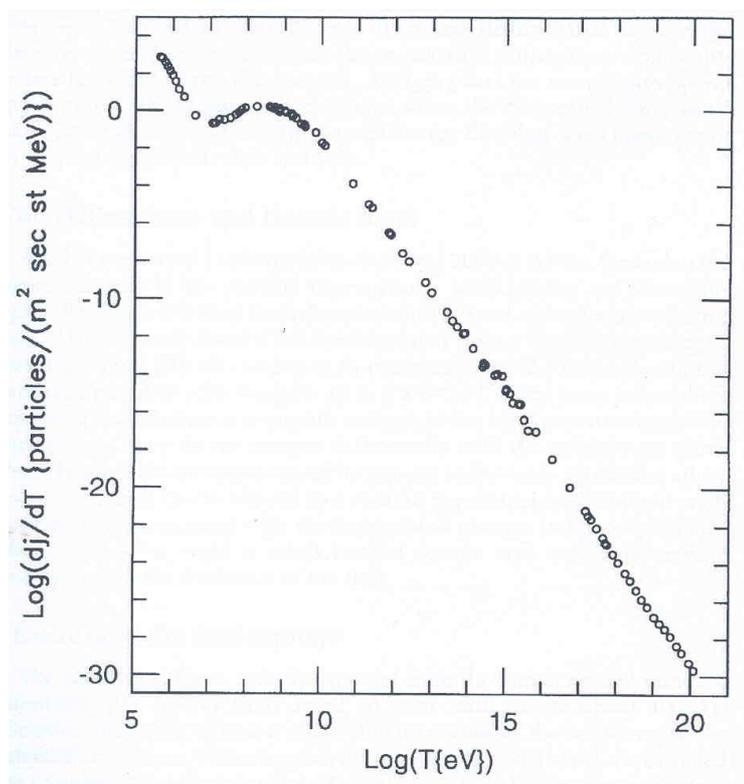


FIGURA 1.11: Intensidade dos raios cósmicos em função da energia.
FONTE: Jokipii (1998).



Os raios cósmicos podem ser divididos em duas categorias raios cósmicos primários e raios cósmicos secundários.

Os raios cósmicos primários são partículas que sofrem a modulação heliosférica, podendo ser originadas em três locais diferentes no centro da galáxia, raios cósmicos galácticos (do inglês *galactic cosmic rays*, GCR), no Sol, raios cósmicos solares (do inglês *solar cosmic rays*, SCR) e na heliosfera através da interação de partículas neutras do gás interestelar com o vento solar, raios cósmicos anômalos (do inglês *anomalous cosmic rays*, ACR).

Os raios cósmicos secundários são produtos da interação dos raios cósmicos primários com a atmosfera terrestre, sofrem as modulações principalmente do campo magnético e da atmosfera terrestre.

Alguns dos rastros das colisões dos raios cósmicos primários são reconhecidos como sendo píons, outros representando nucleons e um deles sendo o remanescente do núcleo original. A Figura 1.12 mostra, esquematicamente, algumas das partículas secundárias de um “chuveiro” de raios cósmicos, gerado a partir da interação das partículas primárias de raios cósmicos com os constituintes atmosféricos.

Um dos produtos dos raios cósmicos são os muons, componente méson-muônica, os muons são partículas subatômicas que possuem a mesma carga do elétron, porém tem massa 207 vezes maior. Eles possuem grande poder de penetração e mantêm a direção e o sentido do raio cósmico primário que os originou. A figura mostra três tipos de componentes a componente méson-muônica, componente eletromagnética e componente nucleônica.

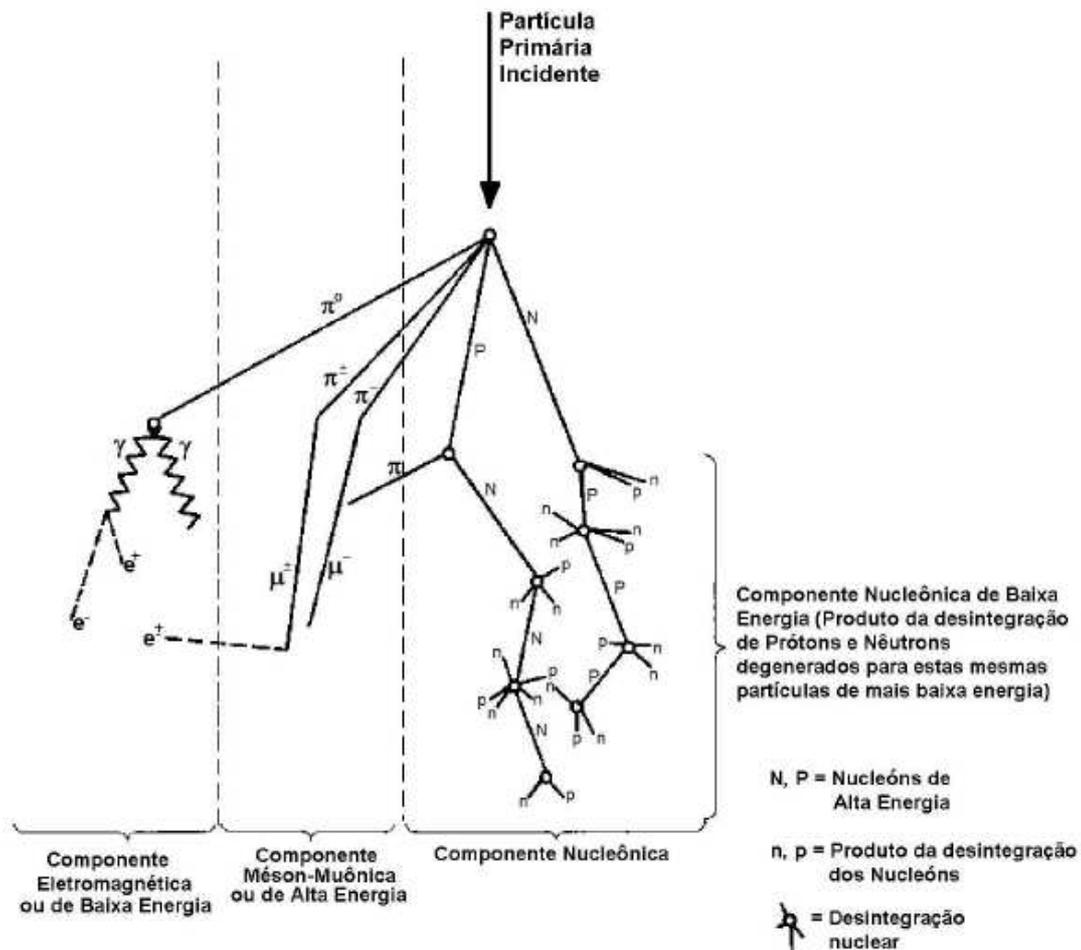


FIGURA 1.12: Diagrama esquemático de um chuva de raios cósmicos.
 FONTE: Modificado de Forbush (1993).

A relação entre a incidência na Terra dos raios cósmicos e as estruturas interplanetárias é de grande importância para o estudo do Clima Espacial, pois quando uma estrutura como uma nuvem magnética se aproxima, ela age como um escudo fazendo com que a taxa de raios cósmicos que incidem na Terra, vindos daquela direção diminua, Figura 1.13. Através disso é possível perceber quando uma nuvem magnética se aproxima da Terra e prever a ocorrência uma tempestade geomagnética.

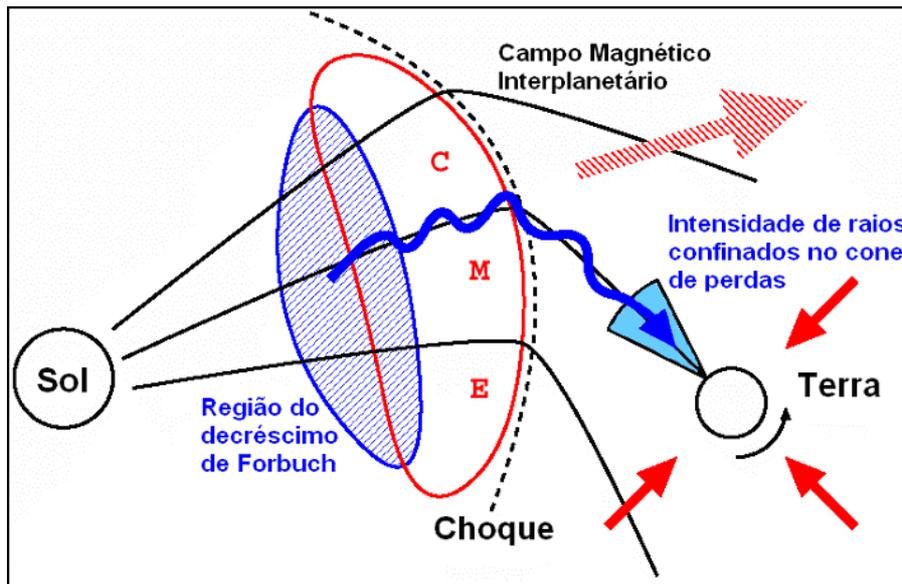


FIGURA 1.13: Ilustração do bloqueio de raios cósmicos por uma CME.
FONTE: Adaptado de Nagashima et al. (1992) e Ruffolo et al. (1999).

Quando há uma tempestade geomagnética acontece um novo decréscimo na taxa de raios cósmicos que atingem a Terra, mas desta vez de maneira global e este decréscimo é denominado decréscimo de *Forbush*.



CAPITULO 2

METODOLOGIA

No Capítulo é descrita a metodologia adotada na realização do Projeto. Inicialmente é feita uma pequena descrição do satélite ACE e dos instrumentos SWPAN e MAG. Após é explicado de forma sucinta, o Detector Multidirecional de Muons – DMM e do método de contagem por cintilação. Todos os dados usados na execução do projeto são tratados em linguagem IDL.

2.1 O SATÉLITE A.C.E.

O satélite ACE (do inglês *Advanced Composition Explorer*) é um projeto da National Aeronautics and Space Administration (NASA) e foi lançado em 25 de agosto de 1997 do *Kennedy Space Center* na Florida.

O satélite tem 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 a aproximadamente 1,5 milhões de km da Terra, orbitando o ponto Lagrangeano interno L1, que é o ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra. O ACE está em uma posição constante em relação à Terra e assim como ela gira em torno do Sol, a Figura 2.1 é uma ilustração do ACE e da sua órbita.

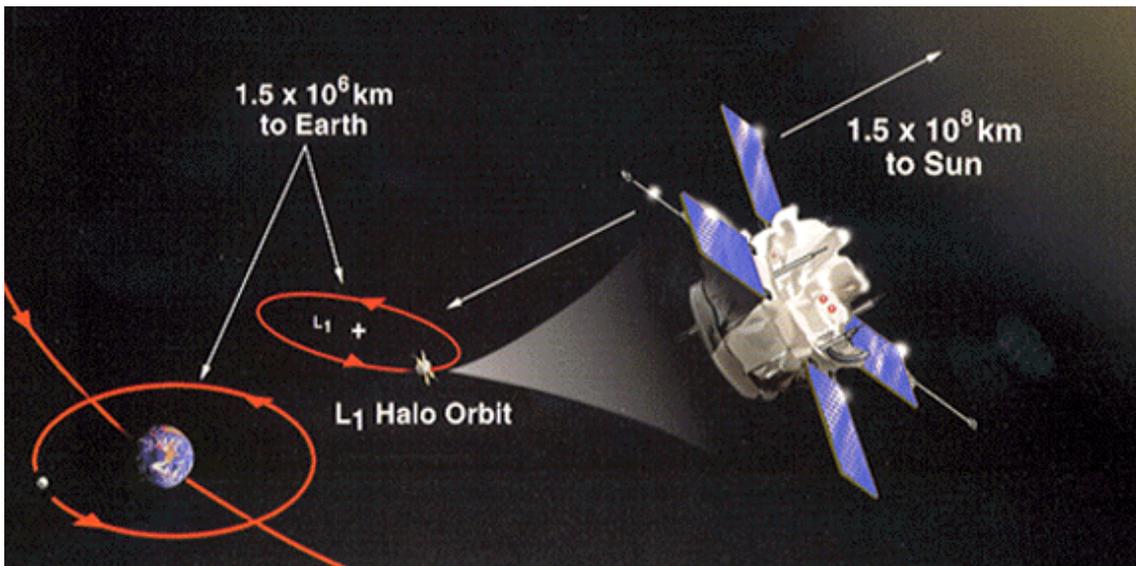


FIGURA 2.1: Ilustração representativa da órbita do satélite ACE, o ponto Lagrangeano L1, a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.

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, listados abaixo, que estão dispostos em sua maioria na parte superior do satélite, a Figura 2.2 mostra um esquema da disposição dos instrumentos no ACE.

- CRIS (*Cosmic Ray Isotope Spectrometer*)
- SIS (*Solar Isotope Spectrometer*)
- ULEIS (*Ultra Low Energy Isotope Spectrometer*)
- SEPICA (*Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer*)
- SWIMS (*Solar Wind Ion Mass Spectrometer*)
- SWICS (*Solar Wind Ionic Composition Spectrometer*)
- EPAM (*Electron, Proton, and Alpha Monitor*)
- SWEPAM (*Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*)
- MAG (*Magnetometer*)
- RTSW (*Real Time Solar Wind*)

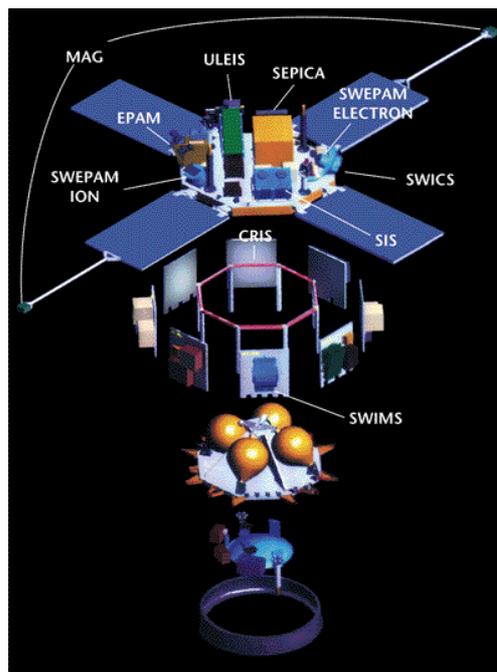


FIGURA 2.2: Ilustração da disposição dos instrumentos a bordo do ACE.
FONTE: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html

Dentre os instrumentos a bordo do ACE neste projeto foram usados dados dos instrumentos SWEPAM e MAG.

O SWEPAM mede o fluxo de partículas, elétrons e íons, no vento solar como funções da posição e da energia, com isso ele fornece dados de parâmetros como velocidade, temperatura, densidade do vento solar, estes dados proporcionam o estudo das condições internas do plasma do vento solar. Os dados do SWEPAM estão disponíveis no site da missão ACE (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>), onde ainda encontram-se dados do meio interplanetário em tempo real.

O MAG é basicamente um sistema composto por dois magnetômetros fluxgate gêmeos que estão instalados no final de dois painéis solares que estão opostos, ver Figura 2.2. 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.

Através dos dados fornecidos pelo SWEPAM e pelo MAG é possível identificar e distinguir as diferentes estruturas interplanetárias, os dados são disponíveis em arquivos de texto dispostos em colunas como mostra a Figura 2.3.



Year	day	hr	min	sec	fp_year	Np	Tp	Vp	B_gsm_x	B_gsm_y	B_gsm_z	Bmag
2004	305	0	0	17.021	2004.83060163	6.626	1.6244e+05	449.64	-5.701	-4.068	3.581	8.015
2004	305	0	1	21.043	2004.83060366	6.822	1.4809e+05	447.46	-7.378	-2.982	0.287	8.352
2004	305	0	2	24.979	2004.83060568	7.245	1.5794e+05	438.56	-7.439	-2.900	1.038	8.225
2004	305	0	3	29.002	2004.83060770	7.392	1.5806e+05	445.45	-7.082	-3.174	2.223	8.180
2004	305	0	4	33.024	2004.83060973	6.601	1.7844e+05	446.64	-7.378	-3.087	0.206	8.058
2004	305	0	5	37.046	2004.83061175	6.862	1.6687e+05	438.85	-7.725	-2.224	0.740	8.103
2004	305	0	6	40.982	2004.83061377	7.001	1.7078e+05	442.36	-7.437	-3.020	0.928	8.090
2004	305	0	7	45.005	2004.83061580	6.785	1.8775e+05	441.54	-8.103	-2.587	0.202	8.529
2004	305	0	8	49.027	2004.83061782	6.646	2.1039e+05	444.75	-8.274	-1.817	0.179	8.540
2004	305	0	9	53.050	2004.83061985	6.523	1.8604e+05	440.03	-8.009	-2.439	1.116	8.470
2004	305	0	10	56.986	2004.83062187	6.888	1.7058e+05	436.83	-7.514	-3.361	0.294	8.259
2004	305	0	12	1.008	2004.83062389	6.747	1.4938e+05	439.21	-7.489	-3.524	0.764	8.316
2004	305	0	13	5.030	2004.83062592	6.560	1.7307e+05	443.93	-7.239	-3.774	1.080	8.249
2004	305	0	14	9.053	2004.83062794	6.528	1.5840e+05	445.21	-6.526	-3.929	1.959	7.872
2004	305	0	15	12.989	2004.83062996	6.295	1.8536e+05	448.08	-6.262	-3.868	2.092	7.664
2004	305	0	16	17.011	2004.83063199	6.249	1.6868e+05	444.22	-6.183	-3.702	2.123	7.524
2004	305	0	17	21.034	2004.83063401	6.197	1.7737e+05	445.24	-6.204	-3.390	2.342	7.465
2004	305	0	18	25.056	2004.83063604	6.320	1.8735e+05	443.45	-6.388	-3.194	2.095	7.463
2004	305	0	19	28.992	2004.83063806	6.111	1.8575e+05	448.40	-6.448	-3.025	1.700	7.378
2004	305	0	20	33.014	2004.83064008	6.305	1.9047e+05	440.38	-6.996	-2.379	0.619	7.434

FIGURA 2.3: Tabela de dados obtidos do Satélite ACE, dados baixados da internet pelo bolsista para confecção de gráficos.

FONTE: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/mag_l2desc.html

O quadro da Figura 28 contém colunas que indicam respectivamente o ano, dia, hora, minuto, segundo, ano fracionado, densidade, temperatura e velocidade dos prótons, os valores do módulo e das componentes nas direções x, y e z do campo magnético do vento solar. Estes dados são utilizados para a análise através da confecção de gráficos. Os gráficos são feitos através de rotinas no programa IDL (*Interactive Data Language*).



2.2 DETECTOR MULTIDIRECIONAL DE MUONS

Um Detector Multidirecional de Muons (DMM) está em atividade no Observatório Espacial do Sul (OES/CRS/CCR/INPE – MCT), em São Martinho da Serra, RS, Brasil (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38''O, altitude 492m acima do nível do mar) no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria (LACESM/CT – UFSM) desde março de 2001.



FIGURA 2.4: Foto do prédio principal OES, onde está instalado o TCM, em São Martinho da Serra.

O DMM faz parte da rede internacional de telescópios, ou Rede Global de DMMs, (*Global Muon Detector Network (GMDN)*), constituída por seis telescópios, um em cada cidade: Nagoya (Japão), Hobart (Austrália), Kuwait (Kuwait), São Martinho da Serra (Brasil), Greifswald (Alemanha) e Yerevan (Armênia), a Figura 2.5 mostra a área de cobertura da rede, com as visões assintóticas de cada telescópio.

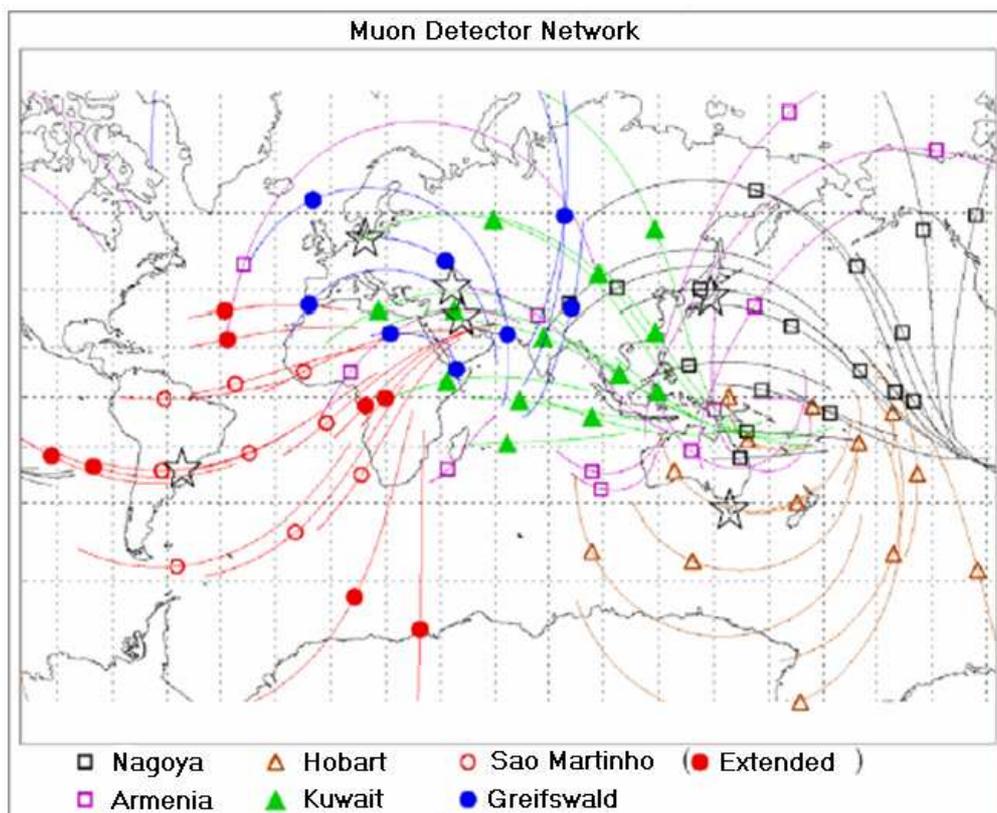


FIGURA 2.5: Diagrama mostrando a área de cobertura da rede de DMMs, mostrando as visões assintóticas de cada telescópio. FONTE: Munakata et al. (2004).

Os raios cósmicos de alta energia (muões) estão sujeitos a modulações conseqüentes 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. Através destas análises é possível obter informações para prever uma tempestade geomagnética, a Figura 2.6 mostra gráficos de dados do meio interplanetário e da intensidade de partículas com relação aos ângulos de *pitch*.

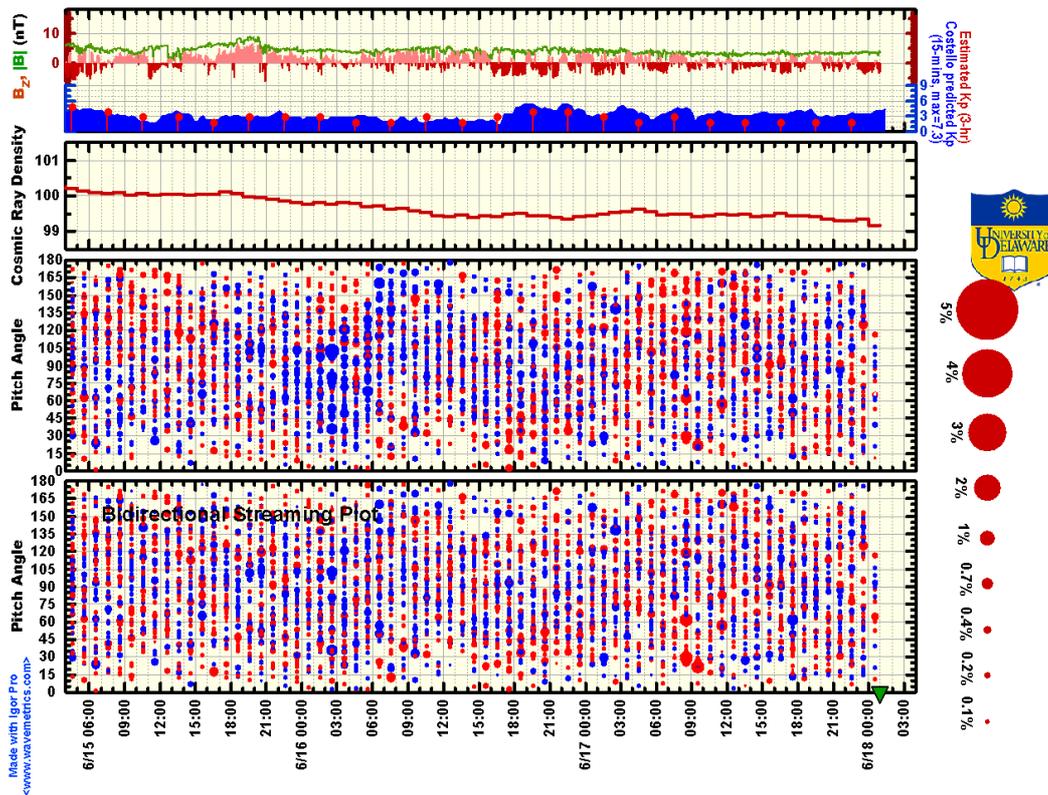


FIGURA 2.6: Gráficos contendo dados do meio interplanetário e dados da intensidade de muons em relação aos ângulos de *pitch*.

FONTE: http://www.bartol.udel.edu/~takao/test_frac.html

O gráfico da Figura 2.6 mostra, de cima para baixo, gráficos de dados do meio interplanetário, densidade de raios cósmicos detectados pela Rede Internacional de TCMs e os dois últimos a intensidade de muons em relação aos ângulos de *pitch*. Um precursor é indicado no gráfico pelo círculo correspondente ao decréscimo de 2% ou maiores para valores de ângulo de *pitch* próximos de zero. Os gráficos das contagens dos muons juntamente com contagens de nêutrons podem ser encontrados na página da *University of Delaware* (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather>).

O TCM foi instalado através de uma colaboração tri-lateral entre Brasil, Japão e Estados Unidos, e tem como coordenador o Professor Dr. Kazuoki Munakata do Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University – Japão. Durante a primeira parte do projeto em março de 2001 foi instalado um protótipo do DMM no OES com duas camadas de 4 detectores em cada uma (Figura 2.7) e em dezembro de 2005 o TCM foi ampliado para duas camadas, com 28 detectores em cada, mostrado na Figura 2.8.

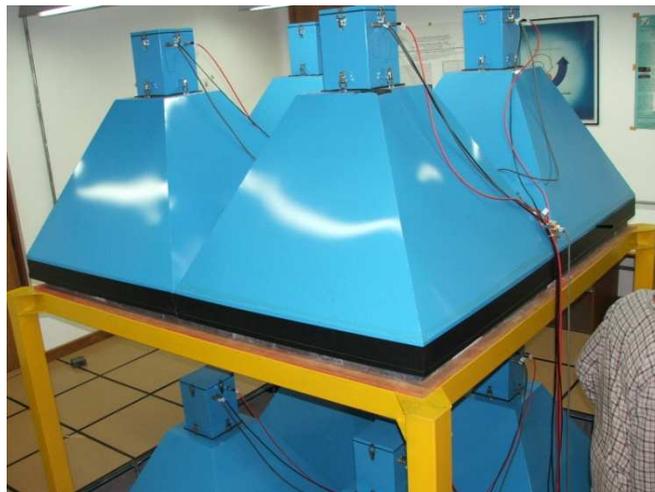


FIGURA 2.7: Foto do protótipo do DMM instalado no OES em 2001.



FIGURA 2.8: Foto do DMM instalado no OES em dezembro de 2005.

A detecção e contagem dos muons são realizadas pelo método de contagem por cintilação. Quando um muon atinge o plástico cintilante, localizado dentro de cada telescópio, alguns fótons são emitidos e detectados por uma fotomultiplicadora que está acoplada em cada telescópio e um muon é detectado através do registro de uma corrente elétrica. Quando é registrada a passagem de uma partícula em telescópio na camada e na de baixo ao mesmo tempo (tendo em vista que o muons se desloca com velocidades muito altas) o computador conta como um muons, a Figura 2.9 mostra um esquema do DMM. Os muons que são detectados no DMM devem ter energia $\geq 50\text{GeV}$, para isso foi colocada uma camada de chumbo em baixo de cada camada do DMM para filtrar partículas com energia inferior.

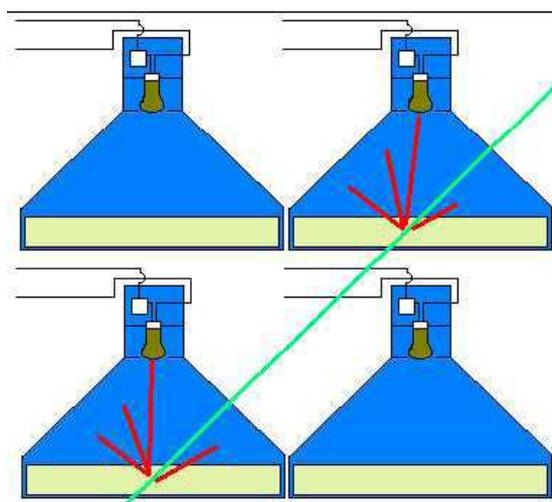


FIGURA 2.9: Esquema do método de contagem do DMM.

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. O DMM instalado no OES possui 13 direções de detecção que são dadas pela combinação dos detectores da camada superior e inferior, a Tabela 2.1 mostra as direções e o número de sub-telescópios do DMM.

Tabela 2.1: Informações do DMM.

Telescópio direcional	Número de sub-telescópios	Contagem horária (fator 10^6)	Erro de Poisson (%)
Vertical (V)	28	2,56	0,06
30º Norte (N)	21	1,03	0,10
30º Sul (S)	21	1,06	0,10
30º Leste (EE)	24	1,19	0,10
30º Oeste (W)	24	1,20	0,10
39º Nordeste (NE)	18	0,51	0,14
39º Noroeste (NW)	18	0,53	0,14
39º Sudeste (SE)	18	0,53	0,14
39º Sudoeste (SW)	18	0,54	0,14



49º Norte (NN)	14	0,36	0,17
49º Sul (SS)	14	0,35	0,17
49º Leste (EE)	20	0,49	0,14
49º Oeste (WW)	20	0,48	0,14

Neste projeto foram usados dados do telescópio instalado no OES, apenas para o estudo da modulação dos muons por nuvens magnéticas.



CAPÍTULO 3

RESULTADOS

No Capítulo são descritos as análises e os resultados obtidos pelo aluno para nuvens magnéticas ocorridas. Foram realizadas análises gráficas com dados do satélite ACE e do Detector Multidirecional de Muons, todos os gráficos foram feitos em linguagem de programação IDL.

Os dias são contados com o calendário dia do ano (do inglês *day of year*) que não separa o ano em meses e vai de 1 a 365, exceto em anos bissextos que vai 1 a 366.

Foram utilizados dados do satélite ACE de parâmetros de plasma, como temperatura, densidade e velocidade dos prótons, e parâmetros de campo magnético, como módulo, componentes x, y e z do campo magnético interplanetário.

Os dados foram tratados em ambiente de programação IDL, e foram calculadas as pressões cinética e magnética e o parâmetro que as relaciona, o parâmetro beta.

A pressão cinética ou pressão termal é definida por $P_k = NkT$, onde N é a densidade numérica de prótons no vento solar dada em g/cm^3 , k é a constante de Boltzmann $k = 1,382 \times 10^{23} J/K$ e T é a temperatura dos prótons dada em K .

A pressão magnética é definida por $P_b = \frac{B^2}{2\mu_0}$, onde B é o módulo do campo magnético do vento solar e μ_0 é a constante de permeabilidade magnética no vácuo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N A^{-2}$.

O parâmetro beta definido como a razão entre as pressões cinéticas e magnéticas, mostrando qual das pressões é predominante no vento solar. Para o vento solar normal o beta varia entre valores em torno de 1, pois ele não é emitido com um fluxo constante. Dentro de uma nuvem magnética, o beta fica com valor entre 0 e 0,1 mostrando que a pressão magnética dentro da nuvem é maior que a pressão cinética do plasma.

Após a análise dos dados do meio interplanetário foram analisadas as variações percentuais na contagem de muons em diversas direções, com os dados do TCM, que é realizada através da seguinte equação.

$$\Delta\% = \left[\frac{\text{Contagem}(\text{Partic./h}) - \text{média}}{\text{média}} \right] \times 100$$

Onde a “contagem” significa a contagem de determinada amostra (em geral a contagem horária de muons em determinada direção) e “média” significa a média da contagem horária. Para calcular-se a média toma-se um período de tempo muito maior que o período de análise (geralmente o período de um mês ou um ano).

Foi analisado o período de 103 a 105 de 2006 que corresponde 13 a 15 de abril do mesmo ano. A Figura 3.1 mostra um painel com os gráficos realizados, de cima para baixo da temperatura, módulo do campo magnético, direção Z do campo magnético (no sistema de coordenadas GSM), pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta.

No período foi observado um evento interplanetário, a linha azul marca a onda de choque que precede a estrutura, as linhas vermelhas demarcam o início e o final da estrutura e as linhas pontilhadas são para mostrar as análises segundo os critérios de Burlaga para as nuvens magnéticas.

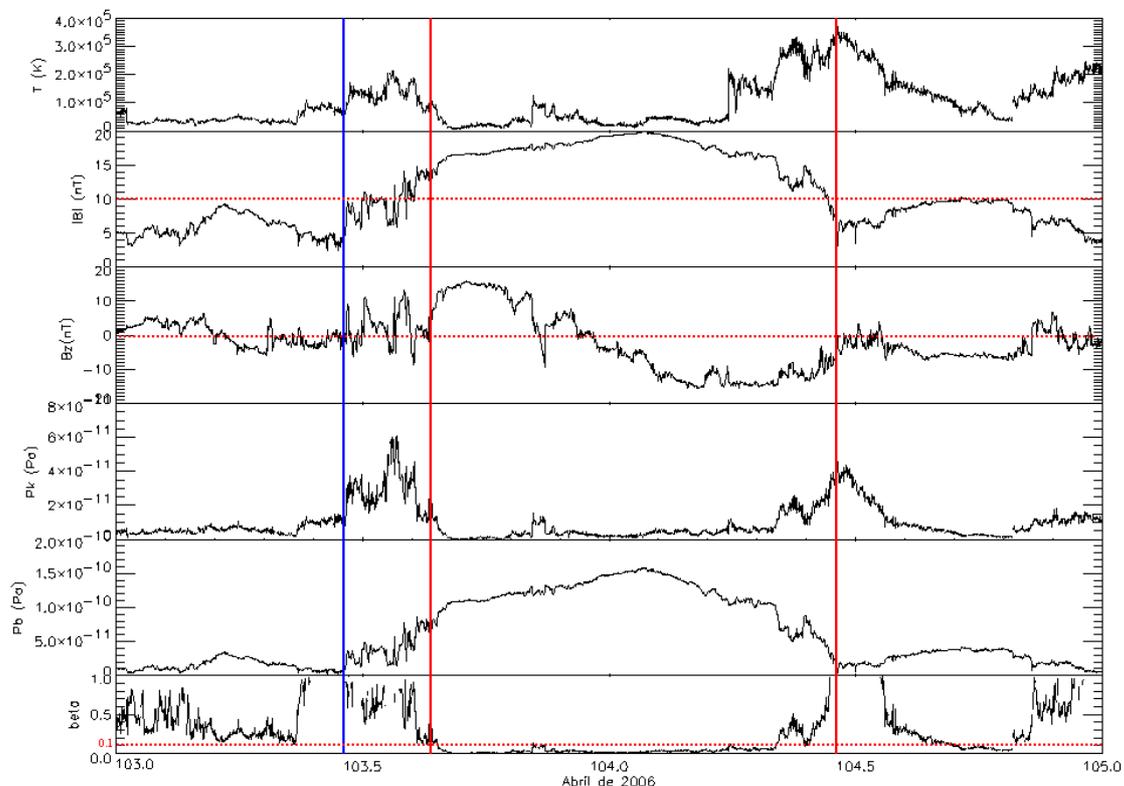


FIGURA 3.1: Painel de gráficos do meio interplanetário de abril de 2006.

A análise dos critérios mostra que o evento ocorrido trata-se de uma nuvem magnética com início no dia 103 de 2006, que corresponde ao dia 13 de abril.

O segundo gráfico mostra o módulo do campo magnético que atingiu aproximadamente 20 nT, o terceiro gráfico mostra que a coordenada Z do campo magnético passou de aproximadamente +15 nT à -15 nT, mostrando a rotação do campo nessa direção e o parâmetro beta ficou entre 0 e 0,1.

A análise das pressões mostra que na parte frontal da nuvem houve uma compressão de plasma, provavelmente gerada pela onda de choque fazendo com que a pressão cinética obtivesse valores altos, logo após, dentro da nuvem a pressão cinética diminui abruptamente e a pressão magnética é predominante mostrando que a estrutura possui um campo magnético muito intenso.

Outros dados do meio interplanetário do mesmo período são mostrados no painel da Figura 3.2, onde os gráficos são da velocidade e densidade do vento solar e coordenadas x e y do campo magnético.

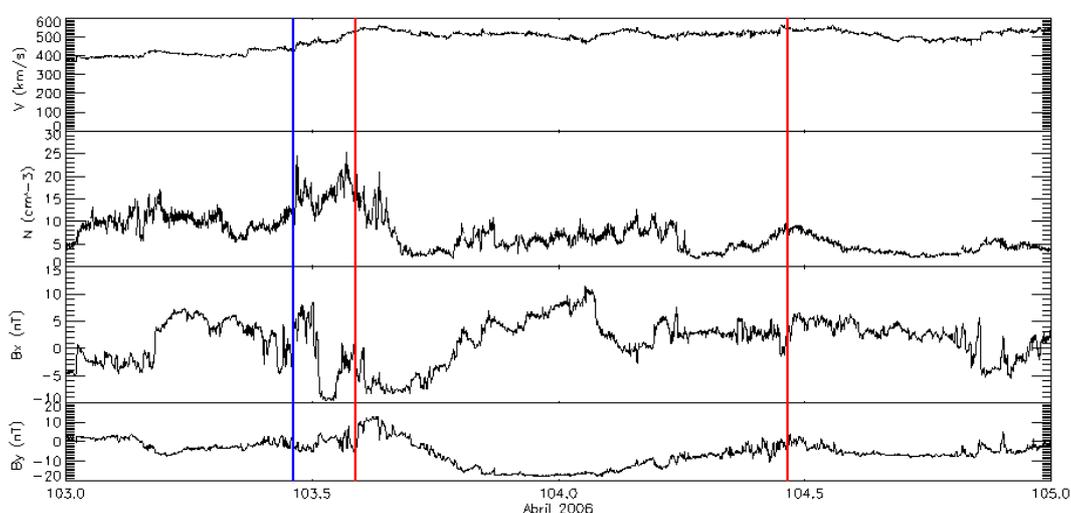


FIGURA 3.2: Painel mostrando gráficos dos demais parâmetros interplanetários analisados para abril de 2006.

O primeiro gráfico mostra a que a velocidade do vento solar passa de aproximadamente 400 km/s para aproximadamente 600 km/s, no segundo gráfico é possível ver que a densidade aumenta na região do choque reafirmando que houve uma compressão do plasma pela onda de choque da estrutura. Os gráficos das coordenadas x

e y mostram as variações do campo magnético nessas direções, onde a maior delas foi da coordenada y.

A nuvem magnética causou uma tempestade geomagnética intensa com o pico do índice Dst = -111 nT, no dia 104, 14 de abril, (FONTE: http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/200604/index.html).

Para este período foi analisado o decréscimo relativo da incidência de muons detectados com o TCM, a Figura 3.3 mostra um painel com as contagens para todas as direções do TCM, as direções analisadas foram vertical (V), 30° norte (N), 30° sul (S), 30° leste (E), 30° oeste (W), 39° nordeste (NE), 39° noroeste (NW), 39° sudeste (SE), 39° sudoeste (SW), 49° norte (NN), 49° sul (SS), 49° leste (EE) e 49° oeste (WW).

A tempestade não ocasionou um grande decréscimo na contagem dos muons, os maiores decréscimos foram nas direções vertical (~0.8%), 30° norte (~1.2%) e 30° oeste (0.7%).

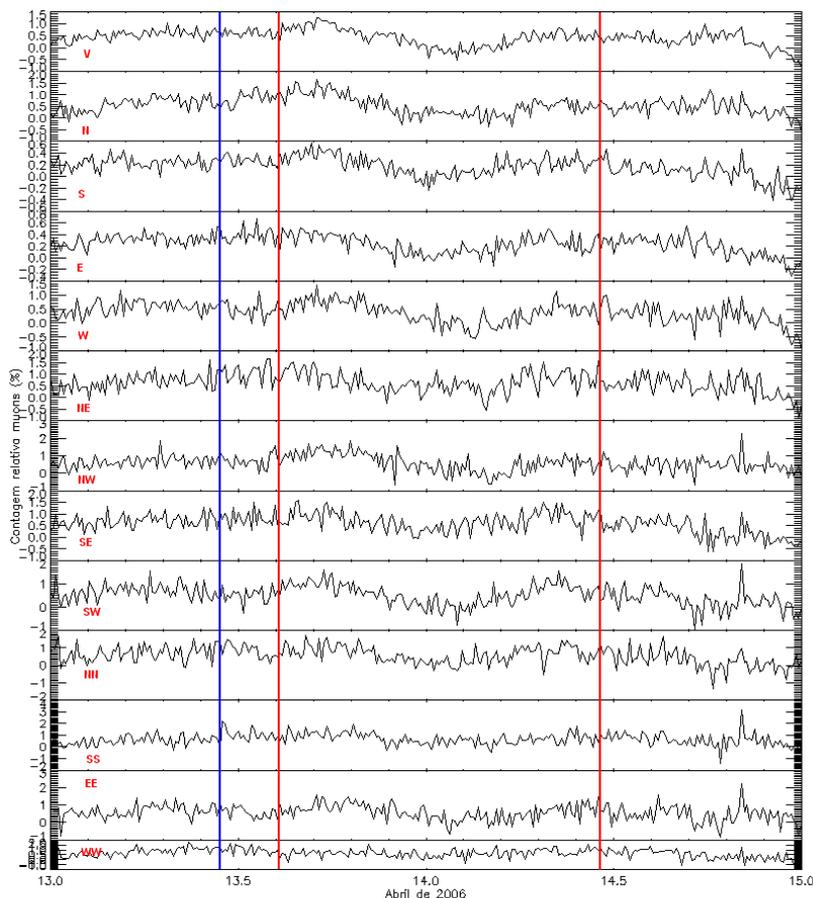


FIGURA 3.3: Painel mostrando gráficos da contagem relativa de muons detectados pelo DMM em abril de 2006.



CAPITULO 4

CONCLUSÕES

As análises da correlação entre decréscimos de raios cósmicos e parâmetros de choques frontais rápidos para o evento ocorrido em abril do ano de 2006 são apresentados. Observou-se a presença de uma clara relação entre $\Delta|B|$, ΔV_p , ΔT_p e decréscimos de RC. Os coeficientes de correlação estão bem associados a rigidez de corte do local para ΔV_p e V_c . Para esses parâmetros à uma clara tendência de seus coeficientes de correlação possuírem maiores valores quanto menor for a rigidez de corte. Por outro lado, os parâmetros de densidade não apresentam qualquer associação com decréscimos de raios cósmicos, possivelmente pelo fato da densidade no meio interplanetário ser muito baixa mesmo dentro da região compreendida por uma nuvem magnética.

De modo geral, no Relatório foi possível obter conhecimentos de diversos fenômenos envolvendo as relações Sol-Terra tais como atividades solar, tempestades geomagnéticas, raios cósmicos e estruturas magnéticas do meio interplanetário.



REFERÊNCIAS

Dal Lago, A., et al. (2006), The 17–22 October (1999) solar-interplanetary-geomagnetic event: Very intense geomagnetic storm associated with a pressure balance between interplanetary coronal mass ejection and a high-speed stream, **J. Geophys. Res.**, 111, A07S14, doi:10.1029/2005JA011394.

Dal Lago, A.; Schwenn, R.; Stenborg, G.; Gonzalez, W. 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.

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.

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.

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.

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.

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.



ANEXO

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/CNPQ/INPE

RELATÓRIO PARCIAL

Aluno (a): Aline Seeger Santos

Universidade: Universidade Federal de Santa Maria

Curso: Física Bacharelado

Orientador: Dr. Ezequiel Echer

Coord./Depto: DGE/CEA/INPE Ramal: 6779

Co-orientador: Dr. Nelson Jorge Shuch

Coord./Depto: CRS/INPE Ramal: 2026

Título do Projeto: ESTUDO DE DECRÉSCIMOS DE RAIOS CÓSMICOS CAUSADOS POR
NUVENS MAGNÉTICAS.

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PERÍODO DE AGOSTO A JANEIRO

Aprovo o relatório apresentado:



RELATÓRIO PARCIAL DE ATIVIDADES PIBIC/CNPq-INPE – FEVEREIRO DE 2010

1. Título do Projeto

ESTUDO DE DECRÉSCIMOS DE RAIOS CÓSMICOS CAUSADOS POR NUVENS MAGNÉTICAS.

2. Identificação do aluno e orientadores

Bolsista: Aline Seeger Santos

Orientador: Dr. Ezequiel Echer

Co-orientador: Dr. Nelson Jorge Schuch

Protocolo: 107417/2009-0

3. Colocação do problema estudado:

No Laboratório Clima Espacial – Previsão de Tempestades Geomagnéticas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LCEPTM/CRS/INPE – MCT, em Santa Maria, RS, no âmbito da parceria INPE/UFSM, com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – MCT, são realizados estudos referentes à identificação e análise de fenômenos físicos ligados às interações Sol - Terra, especificamente estudo de decréscimos de raios cósmicos causados por nuvens magnéticas. Também estudará o efeito das nuvens magnéticas e de seus choques sobre o decréscimo de raios cósmicos, medido pelo detetor de muons instalado no OES.

4. Metodologia

Compilar lista de nuvens magnéticas no ciclo solar 23, a partir de 2001 (ano da instalação do detetor de muons);

Graficar parâmetros do vento solar; identificar choques e nuvens magnéticas; graficar dados do detetor de muons; identificar os decréscimos e quantificá-los; correlacionar a amplitude dos decréscimos de muons com os parâmetros do vento solar (por exemplo, campo total na nuvem magnética).

5. Resultados obtidos até janeiro de 2010

O aluno revisou a leitura da bibliografia básica; compilação da lista de nuvens magnéticas; estudo dos dados do vento solar e raios cósmicos. Fez leitura bibliográfica sobre raios cósmicos e vento solar, confeccionou gráficos do vento solar e raios cósmicos. O aluno está tendo contato com linguagem de programação utilizando o programa MATLAB, ambiente onde é trabalhado os dados.

Como exemplo das análises feitas, abaixo apresenta gráficos do da identificação das nuvens magnéticas.

Os dados obtidos pelo satélite ACE de densidade, temperatura, velocidade do Vento Solar componente Bz do campo magnético e valor de β são apresentados na Figura 1 e na Figura 2 onde já é identificado a passagem da nuvem magnética.

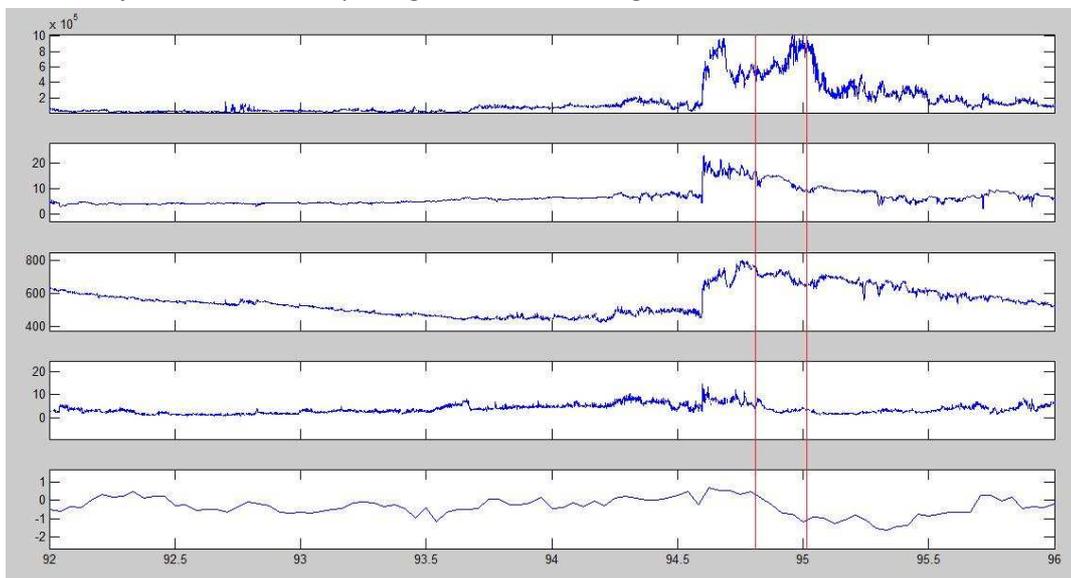


Figura 1 – Dados do Satélite ACE, TDM protótipo do dia 94 e 95 do ano de 2001.

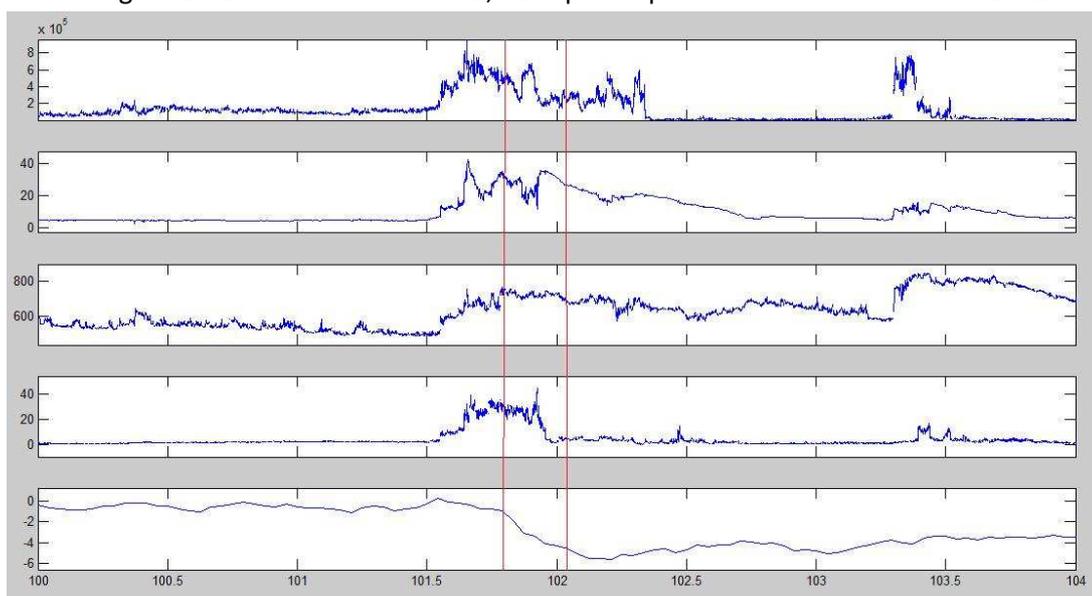


Figura 2 - Dados do Satélite ACE, TDM protótipo do dia 102 do ano de 2001.

Houve estreita interação com pesquisadores brasileiros e estrangeiros a partir dos contatos estabelecidos durante a participação do acadêmico em eventos científicos ou/ durante a visita dos pesquisados ao CRS/INPE – MCT.

O aluno participou dos seguintes eventos e atividades científicas:

- **24ª Jornada Acadêmica Integrada**, foi realizada no período de 10 a 13 de novembro de 2009. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.



- Até a presente data o aluno submeteu e apresentou em eventos científicos, como autor ou co-autor, os seguintes resumos de trabalhos científicos:

SANTOS, S, A.; ECHER, E.; SCHUCH, N. J. STEKEL, R., C, T. ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE EXPLOSÕES SOLARES E DE SEUS EFEITOS NA TERRA SICINPE 2009. In: 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009, Santa Maria. Anais da 24ª Jornada Acadêmica Integrada, 2009.

6. Resultados a serem obtidos até julho de 2010

O aluno dará continuidade a realização os cálculos dos decréscimos de raios cósmicos e correlacionará com parâmetros do vento solar, e preparará trabalhos para apresentar em conferencias. Nos últimos três meses será elaborado relatório final de atividades no Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT e serão preparados trabalhos científicos a serem submetidos em congressos ou periódicos nacionais e internacionais.