

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7263-TDI/705

**ESTUDO DE NUVENS MAGNÉTICAS GEOEFETIVAS NO MEIO
INTERPLANETÁRIO**

Alisson Dal Lago

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Walter Demétrio
Gonzalez-Alarcon e Dra. Alicia Luisa Clua de Gonzalez-Alarcon, aprovada em
10 de março de 1999.

INPE
São José dos Campos
1999

523.62

DAL LAGO, A.

Estudo de nuvens magnéticas geoféticas no meio interplanetário / A. Dal Lago. – São José dos Campos: INPE, 1999.

122p. – (INPE-7263-TDI/705).

1.Nuvens magnéticas. 2.Meio interplanetário. 3.Tempestades magnéticas. 4.Campo magnético interplanetário. 5.Interações sol-terra. I.Título.

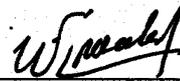
Aprovado pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de **Mestre**
em **Geofísica Espacial**.

Dr. Antonio Lopes Padilha



Presidente

Dr. Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon



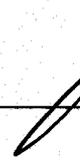
Orientador

Dra Alicia Luisa Clua de Gonzalez Alarcon



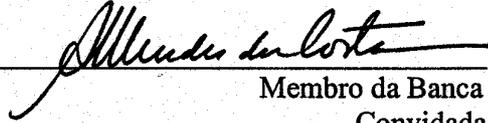
Membro da Banca

Dr. José Humberto Andrade Sobral



Membro da Banca

Dra Aracy Mendes da Costa



Membro da Banca
Convidada

Candidato: Alisson Dal Lago

São José dos Campos, 10 de março de 1999.

*Antes de sair,
verificou o boletim de Previsão do Clima Espacial desta manhã?*

(Frase para o Futuro)

*Dedico esta Dissertação aos meus queridos pais,
Oswaldo e Romi,
pela orientação, pelo incentivo e pelo auxílio dado em todos os momentos,*

*e à minha querida irmã e amiga,
Lissandra.*

Agradecimentos:

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Osvaldo e Romi, por terem incentivado minha vocação para o estudo científico desde quando eu ainda era criança, até hoje, me proporcionando os meios para o exercício da minha criatividade. Todas as minhas conquistas são conquistas de vocês também.

Agradeço aos meus padrinhos, Edgar e Frieda, pelo carinho, pelo apoio financeiro e principalmente por estarem constantemente me desejando o melhor em suas orações.

Um agradecimento a todos os colegas e amigos do INPE pela amizade e pelo companheirismo ao longo desta jornada.

Um especial agradecimento ao Dr. Nelson J. Schuch por ter revisado esta Dissertação e pela constante presença em vários momentos da minha vida, desde quando o conheci, como meu orientador de Iniciação Científica, até hoje, sempre me incentivando a fazer o melhor possível, com liberdade, imaginação e sabedoria.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE - São José dos Campos (SP) e INPE - Santa Maria (RS), pela infra-estrutura disponibilizada para a realização desta Dissertação.

Um agradecimento à CAPES pela bolsa de mestrado que me foi dada em continuação a bolsa PET de graduação.

Um agradecimento ao Dr. Bruce T. Tsurutani do “Jet Propulsion Laboratory” (JPL - NASA) pelas sugestões dadas para esta Dissertação.

Um agradecimento aos meus orientadores, Dr. Walter Demétrio Gonzalez-Alarcon e Dra. Alicia Luisa Clua de Gonzalez-Alarcon, por terem me proporcionado a valiosa oportunidade de enriquecer meu conhecimento nestes dois anos de estudo.

Por fim, agradeço a Deus por ter me dado o privilégio da Vida e por ter criado todos os Fenômenos Físicos da Natureza.

RESUMO

Nuvens Magnéticas são estruturas interplanetárias originadas em Ejeções de Massa Coronal Solares (EMCS). São identificadas por possuírem: campo magnético intenso (normalmente $> 10\text{nT}^1$); grande rotação do vetor direção do campo magnético enquanto a nuvem passa pelo ambiente espacial do satélite observador e medidor; baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta ($\beta \sim 0,1$)². Esta dissertação apresenta um estudo das características e parâmetros de plasma e campo magnético das Nuvens Magnéticas, para um conjunto de eventos previamente publicados em literatura especializada e para um novo conjunto de eventos selecionado que ocorreram no ano de 1979. É apresentada a existência de uma correlação estatística linear entre a velocidade de propagação das Nuvens Magnéticas com o módulo da intensidade de seu campo magnético intrínseco, levando a conclusão de que: Nuvens Magnéticas que se propagam no Meio Interplanetário com maior velocidade possuem maior intensidade de campo magnético. Esta associação parece ser propriedade exclusiva de Nuvens Magnéticas, uma vez que outras Ejeções de Massa Coronal Interplanetárias (EMCI)³, não-nuvens, não apresentam estas características e correlações. Os parâmetros velocidade e campo magnético estão relacionados a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas. As interações entre Nuvens Magnéticas e estruturas circunvizinhas no Meio Interplanetário são aqui investigadas através do cálculo da Pressão Total: Térmica, Magnética e Dinâmica, a fim de relacioná-las com a intensificação do campo magnético total das Nuvens Magnéticas. Esta dissertação contribui para: (1) a previsão do Clima Espacial através da obtenção da intensidade do campo magnético de Nuvens Magnéticas através de medidas de velocidade, que podem ser feitas através de imagens de coronógrafos, dois a três dias antes de sua chegada à Terra; (2) a investigação da ligação entre Nuvens Magnéticas e Tempestades Magnéticas Terrestres; (3) o estudo das interações entre Nuvens Magnéticas e estruturas do Meio Interplanetário.

¹ nT = nano Tesla = 10^{-9} T = 10^{-5} gauss; Indução Magnética.

² $\beta = (\text{pressão térmica})/(\text{pressão magnética}) = (NkT)/(B^2/8\pi)$

³ EMCI são as EMCS identificadas no Meio Interplanetário.

A STUDY OF GEOEFFECTIVE MAGNETIC CLOUDS IN THE INTERPLANETARY MEDIUM

ABSTRACT

Magnetic clouds are interplanetary structures whose origins are related to Coronal Mass Ejections (CME). Their features are: strong magnetic field intensity (typically $> 10\text{nT}^4$), a large rotation in the magnetic field angle as the cloud crosses the spacecraft, low proton temperature and β^5 values (~ 0.1). For a set of previously published magnetic cloud events and another set of clouds identified in the whole year of 1979 we present a study of plasma and magnetic field parameters. We have shown the existence of a relationship between the peak magnetic field strength and peak velocity value of the cloud, with a tendency that clouds which move at higher speeds also possess higher core magnetic field strengths. There is also an indication that this relationship is peculiar to magnetic clouds, whereas other types of non-cloud driver gas, or ICME⁶, events do not seem to show a similar relationship. Both parameters, velocity and magnetic field strength, are related to Magnetic Storms. It is also addressed the interaction between magnetic clouds and other features in the interplanetary medium by calculating the Total Static Pressure, Magnetic plus Thermal, and the Dynamic Pressure relative to other structures surrounding the cloud, investigating their possible relation to magnetic cloud field enhancement. This work contributes to: (1) Space Weather Forecasting, through the calculation of the magnetic cloud field strengths by knowing their velocities (the latter can be remotely measured by sequences of coronagraph images); (2) the study of the relation between magnetic clouds and magnetic storms; and (3) the study of the interaction between magnetic clouds and other interplanetary structures surrounding it.

⁴ nT = nano Tesla = 10^{-9} T = 10^{-5} gauss; Magnetic Induction.

⁵ $\beta = (\text{thermal pressure})/(\text{magnetic pressure}) = (NkT)/(B^2/8\pi)$

⁶ ICME – Interplanetary Coronal Mass Ejections

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 2	CONCEITOS EM MAGNETOIDRODINÂMICA INTERPLANETÁRIA	21
2.1	Equações Básicas	21
2.2	Pressão Em Um Plasma	24
2.2.1	<i>Pressões Estáticas e o Parâmetro Beta</i>	24
2.2.2	<i>Equação da Energia e Pressão Dinâmica</i>	25
2.2.3	<i>Equilíbrio de Pressão na Magnetopausa</i>	26
2.3	Choques	27
CAPÍTULO 3	O SOL, SUA ATIVIDADE, SUA INFLUÊNCIA NO MEIO INTERPLANETÁRIO E SEUS EFEITOS GEOMAGNÉTICOS	31
3.1	O Sol, O Vento Solar e o Campo Magnético Interplanetário	31
3.1.1	<i>O Sol</i>	31
3.1.2	<i>O Vento Solar</i>	33
3.1.3	<i>O Campo Magnético Interplanetário</i>	34
3.2	O Ciclo Solar De 11 Anos e as Ejeções de Massa Coronal Solares	35
3.2.1	<i>O Ciclo Solar de 11 Anos</i>	35
3.2.2	<i>Ejeções de Massa Coronal (EMC)</i>	36
3.3	Relação Entre Ejeções de Massa Coronal Solares e Estruturas do Meio Interplanetário	39
3.3.1	<i>Assinatura das EMC no Vento Solar</i>	39
3.3.2	<i>Relação Entre EMC Rápidas e Ondas de Choque no Vento Solar</i>	41
3.3.3	<i>Nuvens Magnéticas</i>	43
3.4	A Atividade Solar e os Efeitos Geomagnéticos	50
3.4.1	<i>Tempestades Geomagnéticas</i>	50
3.4.2	<i>Origem interplanetária das Tempestades Geomagnéticas</i>	52
CAPÍTULO 4	ANÁLISE, INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS PARA EVENTOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO	55
4.1	Introdução	55
4.2	Seleção e Caracterização de Eventos do Meio Interplanetário	56
4.2.1	<i>Seleção de Dados - Constituição do Grupo 1 de Eventos Interplanetários: Nuvens Magnéticas</i>	56
4.2.2	<i>Exemplos de Parâmetros Físicos de Eventos do Meio Interplanetário, Grupo 1 - Nuvens Magnéticas.</i>	58

4.2.3	<i>Seleção de Dados de Eventos Interplanetários, Constituição do Grupo 2, Sub-Grupos: A - Candidatos a Nuvens Magnéticas, B - Não Nuvens Magnéticas.</i>	61
4.2.4	<i>Exemplos de Parâmetros Físicos de Eventos do Meio Interplanetário, Grupo 2 - Sub-Grupos: A - Candidatos a Nuvens Magnéticas, B - Não Nuvens Magnéticas, Análise de suas Características.</i>	64
4.3	Método de Análise e Resultados Obtidos da Relação entre a Velocidade de Propagação de Nuvens Magnéticas e seu Campo Magnético Intrínseco.	73
4.4	Otimização da Amostragem de Nuvens Magnéticas: Análise e Discussão da Relação entre Parâmetros de Nuvens Magnéticas e de Tempestades Geomagnéticas	80
4.5	Interação de Nuvens Magnéticas com o Meio Interplanetário Circunvizinho	87
4.5.1	<i>Pressão Estática Total ao Longo dos Eventos - Nuvens Magnéticas</i>	88
4.5.2	<i>Pressão Total</i>	93
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES FINAIS		105
CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		107

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Medidas *in situ* do Meio Interplanetário têm sido feitas na região entre as órbitas dos planetas Mercúrio e Plutão. A sonda americana Mariner II fez as primeiras medidas em 1 UA¹. Os satélites americanos Helios 1 e 2 obtiveram dados entre 0,3 UA e 1 UA. As sondas *Interplanetary Magnetic Field* (IMPs), *Interplanetary Sun Earth Explorer 3* (ISEE-3), Vela e outras como a soviética Prognoz coletaram dados permitindo estudos detalhados em 1 UA. Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, e Voyager 2 (sondas americanas) estão se movendo e coletando dados do Meio Interplanetário para além da órbita de Netuno. A análise e a interpretação dos dados coletados e transmitidos por estas sondas espaciais nos proporciona um auxílio muito importante para o conhecimento da Atividade Solar e da dinâmica do Meio Interplanetário (Burlaga, 1995).

O Meio Interplanetário é um sistema físico muito especial, que serve de laboratório natural para estudos de fluxos Magnetoidrodinâmicos (MHD). Observações espaciais *in situ* proporcionaram medidas de campo magnético e de plasma no intervalo de escalas: desde menores do que o raio de giro do próton até maiores que 40 UA. Estas observações confirmaram a existência de muitos fenômenos MHD hoje conhecidos com profundidade, como choques rápidos e lentos não-colisionais, estruturas de pressão balanceada, descontinuidades tangenciais e rotacionais, configuração de campos “livres de força” (*force-free*) e ondas MHD (Burlaga, 1995).

Algumas estruturas, que envolvem configurações particulares dos parâmetros do plasma do Meio Interplanetário, como densidade, velocidade, temperatura, intensidade e direção do campo magnético, estão diretamente relacionadas a fenômenos terrestres. Dentre estes destacam-se as Tempestades Geomagnéticas, cujas conseqüências podem

¹ Unidade Astronômica (UA) é a distância entre a Terra e o Sol, $\sim 1,5 \times 10^{11}$ metros.

ser bastante importantes no espaço circunvizinho à Terra, afetando o chamado “Clima Espacial”.

Com o crescente avanço tecnológico das explorações espaciais, torna-se cada vez mais importante o entendimento dos fenômenos que ocorrem no Meio Interplanetário, suas possíveis causas de origem Solar, suas evoluções espaço-temporais, e o mais importante, o desenvolvimento da capacitação humana para a previsão, com altas taxas de segurança, destes fenômenos. Portanto, cada correlação descoberta e interpretada entre parâmetros experimentais medidos no Meio Interplanetário torna-se uma peça a menos do quebra-cabeças universal que a cada dia fica melhor compreendido, melhorando nosso entendimento do Espaço do nosso Sistema Planetário.

Este trabalho apresenta um estudo dos parâmetros de plasma e campo magnético de estruturas do Meio Interplanetário, conhecidas por Nuvens Magnéticas, com o objetivo de identificar características particulares e processos físicos nelas presentes e suas interações com o seu Meio Interplanetário circunvizinho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão breve dos principais conceitos da Magnetoidrodinâmica aplicada ao Meio Interplanetário, incluindo: as equações básicas, conceitos de pressão e de ondas de choque. O Capítulo 3 faz uma revisão bibliográfica dos conceitos físicos Solares, sua influência no Meio Interplanetário e seus efeitos geomagnéticos, referenciando importantes trabalhos sobre as ejeções solares e seus efeitos no Meio Interplanetário. Destacam-se dentre estas estruturas as Nuvens Magnéticas Interplanetárias, que têm importância fundamental na origem das Tempestades Magnéticas Terrestres. A metodologia de análise dos dados e os resultados referentes ao estudo dos parâmetros de plasma e de campo magnético de um conjunto de Nuvens Magnéticas pré-identificadas em eventos ocorridos em vários anos e interações com Tempestades Geomagnéticas é apresentada no Capítulo 4. Um estudo de eventos específicos, criteriosamente escolhidos, sobre a interação das ejeções EMCI com o Meio Interplanetário circunvizinho, através do cálculo das Pressões Estática

(Térmica e Magnética) e Dinâmica, conjuntamente com a análise e interpretação dos resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4. Finalmente, no Capítulo 5, as conclusões gerais do trabalho são apresentadas.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS EM MAGNETOIDRODINÂMICA INTERPLANETÁRIA

Podemos tratar o Meio Interplanetário com um fluido Magnetoidrodinâmico - MHD. Neste caso, os campos de interesse são os campos vetoriais, velocidade e campo magnético, e os campos escalares, densidade e temperaturas de prótons e elétrons. Se nos ativermos a um destes campos específicos (campo magnético ou velocidade), podemos identificar estruturas interplanetárias como: os setores solares, os feixes corrotantes e a Lâmina de Corrente Heliosférica - LCH. As discontinuidades nestes campos, como os choques e as fronteiras, são consideradas devido a sua importância nos processos e fenômenos que ocorrem no Meio Interplanetário. A conceituação e o formalismo matemático apresentados neste capítulo seguem preferencialmente aquela apresentada por Burlaga em seu livro *Interplanetary Magnetohydrodynamics* (Burlaga, 1995).

2.1 EQUAÇÕES BÁSICAS

Dos campos vetoriais e escalares mencionados são identificadas nove variáveis desconhecidas, seis com origem nos 2 campos vetoriais e 3 que surgem dos 3 campos escalares. A equação de movimento fornece 3 equações diferenciais relacionando variações espaciais e temporais entre o vetor velocidade - \vec{V} - e às variações espaciais do campo magnético - \vec{B} - e pressão - p' - , que conceitualmente resulta do somatório das pressões dos prótons e elétrons no Meio Interplanetário:

$$\mathbf{r} \frac{\partial}{\partial t} \vec{V} + \mathbf{r}(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p' + (\vec{J} \times \vec{B}) + \mathbf{r} \mathbf{n} \nabla^2 \vec{V} \quad (2.1)$$

O lado esquerdo da Equação 2.1 representa os efeitos inerciais, onde ρ é a densidade dada por $N.m_p$, isto é, densidade numérica multiplicada pela massa do próton. Se considerarmos movimentos puramente inerciais, o termo do lado esquerdo da Equação 2.1 pode ser escrito:

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{V} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = 0 \quad (2.2)$$

significando que o elemento de volume apresenta velocidade constante. A solução da Equação 2.2 descreve os efeitos cinemáticos básicos, mesmo quando as forças presentes não são negligenciáveis. Muitos resultados importantes aparecem, tais como: o campo magnético espiral solar de larga escala, a geometria da Lâmina de Corrente Heliosférica – LCH - e a expansão de Nuvens Magnéticas (Capítulo 3). Os aspectos dinâmicos dos fenômenos do meio interplanetário ainda não estão bem estudados, e é clara a necessidade de aprimoramento neste sentido. Os dois termos do lado direito da Equação 2.1 descrevem as forças básicas, tradicionalmente consideradas na dinâmica interplanetária: o gradiente de pressão $\nabla p'$, e a força magnética $\vec{J} \times \vec{B}$. A pressão térmica é dada em termos de quantidades mensuráveis N - densidade, T - temperatura, pois $p' = NkT$. A força magnética $\vec{J} \times \vec{B}$ pode ser expressa como a soma de duas forças: a tensão magnética $(\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} / 4\mu_0$ e o gradiente da pressão magnética $-\nabla(\vec{B} \cdot \vec{B}) / 8\mu_0$

$$\vec{J} \times \vec{B} = (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} / 4\mu_0 - \nabla(\vec{B} \cdot \vec{B}) / 8\mu_0 \quad (2.3)$$

Um importante tipo de equilíbrio é quando a força magnética total é nula, ou seja, há um equilíbrio entre os dois termos. Esta situação é chamada de configuração “livre de forças”

(*force-free*). O freamento provocado pela viscosidade do fluido ou força viscosa, descrito por $\mathbf{r}n\nabla^2\vec{V}$, é negligenciável no Vento Solar em quase todas as regiões do Meio Interplanetário, exceto em camadas bem delgadas onde ocorrem abruptas diferenças de velocidade, como em ondas de choque.

A conservação da massa é dada pela Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r} + \nabla \cdot (\mathbf{r}\vec{V}) = 0 \quad (2.4)$$

Outra lei de conservação fundamental é a Lei de Gauss:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

Da Equação que exprime a Lei de Faraday ($\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$) e considerando infinita a condutividade elétrica ($\vec{E} = -(\vec{V} \times \vec{B})$), em um referencial inercial, obtém-se a Equação:

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.6)$$

Para completar o conjunto de equações MHD faz-se necessária uma equação de energia, que será introduzida oportunamente na próxima Seção. Como há muitas incertezas na definição de temperatura no Meio Interplanetário, tais como dificuldades em suas medidas e a incompleta compreensão do transporte de energia térmica em um plasma de baixa densidade não-colisional, é razoável utilizarmos uma relação entre a pressão térmica e a temperatura. Podemos portanto assumir que as pressões de prótons e elétrons obedecem a Lei dos Gases Perfeitos descrita por: $p=NkT$.

2.2 PRESSÃO EM UM PLASMA

2.2.1 Pressões Estáticas e o Parâmetro Beta

Se considerarmos que não há movimento relativo de uma estrutura em relação ao meio, a Equação 2.1 pode ser escrita:

$$-\nabla p' + (\vec{J} \times \vec{B}) = 0 \quad (2.7)$$

Usando a Equação 2.3 sem o termo de curvatura pode-se obter uma solução da equação 2.7:

$$P = p' + B^2/8\mu_0 \quad (2.8)$$

onde P é a Pressão Estática Total, constituída das soma da Pressão Térmica, $p'=NkT$, com a Pressão Magnética, $p=B^2/8\mu_0$.

Para medir a importância relativa entre a Pressão Térmica e a Pressão Magnética, define-se o parâmetro beta de plasma, β :

$$\beta = \frac{\text{pressão térmica}}{\text{pressão magnética}} = \frac{p'}{B^2/8\mu_0} \quad (2.9)$$

Um plasma é dito com baixo valor de beta se $\beta \ll 1$ (Parks, 1991).

2.2.2 Equação da Energia e Pressão Dinâmica

Podemos derivar uma equação de energia para um fluido MHD a partir da Equação de movimento 2.1, que pode ser escrita:

$$\mathbf{r} \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla p' + \frac{1}{4\mathbf{p}} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (2.10)$$

O produto escalar desta equação por \vec{V} resulta:

$$\mathbf{r} \vec{V} \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{V} \cdot \nabla p' + \frac{\vec{V}}{4\mathbf{p}} \cdot (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (2.11)$$

Usando a equação da continuidade, e identidades vetoriais, obtém-se a equação da energia para um fluido MHD:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mathbf{r} V^2}{2} + p' + \frac{B^2}{8\mathbf{p}} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{r} V^2}{2} \vec{V} + p' \vec{V} + \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{4\mathbf{p}} \right) = 0 \quad (2.12)$$

Os termos no primeiro parêntese representam: a energia cinética do movimento do fluido; a energia térmica; a densidade total de energia do campo magnético. Os termos no segundo parêntese representam as taxas de variação espacial destas energias. Em primeira aproximação, considerando divergência nula, a solução da Equação 2-12 torna-se:

$$\frac{\mathbf{r} V^2}{2} + p' + \frac{B^2}{8\mathbf{p}} = const. = P_{tot} \quad (2.13)$$

onde P_{tot} é a Pressão Total no fluido. Os termos do lado esquerdo da igualdade representam respectivamente: a Pressão Dinâmica, ou Cinética; a Pressão Térmica; a Pressão Magnética. Formalismo baseado em Parks (1991).

2.2.3 Equilíbrio de Pressão na Magnetopausa

Na Magnetopausa, o equilíbrio de pressões se dá entre a Pressão Dinâmica do Vento Solar do lado externo e a Pressão Geomagnética do lado interno. O plasma do Vento Solar é totalmente desacelerado na Magnetopausa, convertendo sua Energia Cinética em Energia Magnética e Térmica na Lâmina Magnetosférica e em seguida em Energia Magnética no Campo Geomagnético. O diagrama da Figura 2.1 mostra as pressões em questão:

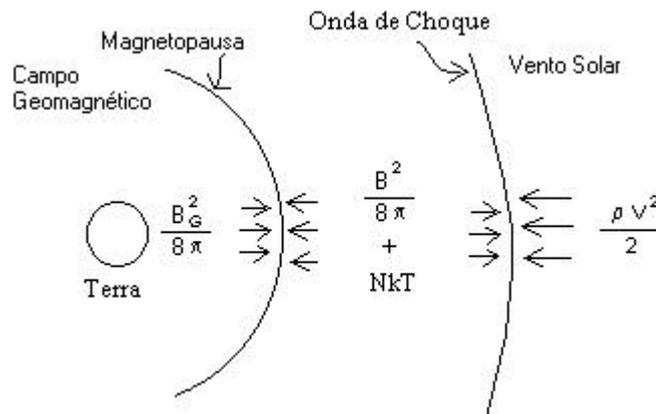


Fig. 2.1 - Equilíbrio de pressão entre a Magnetosfera e o Vento Solar.

Um exemplo do equilíbrio de pressões acima descrito pode ser verificado no estudo de onze eventos de compressão exercida pelo Vento Solar na Magnetopausa estudados por Tsurutani e Gonzalez (1995). Muitos destes eventos estavam associados a Ejeções de Massa Coronal Solares. Nos onze eventos estudados os valores das intensidades da velocidade do Vento Solar variaram de 365 a 750 km/s; a Pressão Dinâmica de 3,4 nPa a 16

nPa; o campo magnético no lado interno à Magnetopausa variou de 68 a 180 nT nestes eventos.

2.3 CHOQUES

Na dinâmica de gases ordinários a teoria de fluxos não-lineares que envolve velocidades supersônicas é bem desenvolvida. Tais fluxos tendem a conter planos através dos quais ocorrem mudanças significantes, quase descontínuas, nas condições do gás. Estas discontinuidades, que são chamadas de “ondas de choque”, se tornam tão delgadas que a taxa de dissipação dentro delas se torna muito grande. Uma das razões de interesse em ondas de choque é que elas tornam-se mecanismos de conversão de energia cinética do fluxo, à frente do choque, em energia térmica, atrás do choque. Como um exemplo, pode-se imaginar um longo tubo contendo um gás inicialmente uniforme, no qual uma perturbação é gerada pelo movimento de um pistão em uma das extremidades. Esta perturbação pode ser vista como um grande número de ondas do tipo funções degrau de baixa amplitude propagando-se à frente do pistão. Cada onda irá se propagar no fluido com uma velocidade igual à velocidade do som, determinada pelas propriedades do fluido. Uma vez que o meio é não-linear, a velocidade de propagação de uma dada onda depende das mudanças produzidas pela onda anterior. Conseqüentemente, as ondas propagam-se com velocidade diferentes e a perturbação sofrerá uma mudança de forma com o passar do tempo. Como a velocidade é diferente em cada ponto do meio, algumas das perturbações irão divergir enquanto outras irão convergir e se empilhar. As ondas não podem ultrapassar uma à outra, uma vez que a onda que está “empurrando” atrás apenas o está fazendo devido a mudança produzida pela onda da frente. Se esta onda de trás ultrapassasse a da frente, imediatamente se propagaria mais lentamente. Assim, as ondas convergentes tendem a se empilhar e produzir uma discontinuidade de grande amplitude, ou seja, uma onda de choque (Kunkel, 1966).

Em gases ordinários só há uma velocidade característica, a velocidade do som, e portanto apenas um tipo de onda de choque: aquela produzida por uma superfície que se propaga com velocidade maior que a velocidade do meio a sua frente, como descrito no parágrafo anterior. Neste caso há um aumento de entropia, temperatura e densidade cruzando esta fronteira.

Em MHD, há três velocidades características: a velocidade do som, a velocidade de Alfvén, e a velocidade magnetoacústica. Estas velocidades podem produzir cinco tipos de choques MHD: choques rápidos, choques lentos, e três intermediários. Apenas os choques rápidos e lentos estão presentes no Vento Solar. Identifica-se um choque rápido pela elevação da intensidade do campo magnético através do choque, e um lento, pela sua diminuição. Apenas os choques rápidos serão estudados nesta Dissertação.

Um choque se movendo no sentido “para fora do Sol” em relação ao Meio Interplanetário é um choque “dianteiro”, do inglês *forward*; do contrário é um choque “reverso”, do inglês *reverse*. Como o Vento Solar do Meio Interplanetário se move supersonicamente para fora do Sol, ambos os choques, dianteiro ou reverso, se movem para fora do Sol (Burlaga, 1995).

Um parâmetro importante para a determinação da intensidade de um choque MHD é o Número de Mach magnetoacústico, definido por:

$$M = \frac{V_{sw}}{(V_A^2 + V_S^2)^{1/2}} \quad (2.14)$$

onde V_{sw} é a velocidade do Vento Solar, V_A é a velocidade de Alfvén e V_S é a velocidade do som. O fluxo é dito subsônico se $M < 1$ e supersônico se $M > 1$. Em plasmas com baixo valor do parâmetro β , como em Ejeções de Massa Coronal Interplanetárias (Nuvens

Magnéticas), é rara a formação de ondas de choque, uma vez que V_A é proporcional ao campo magnético, $V_A = B/(\mu_0 \rho)^{1/2}$ (Parks, 1991).

CAPÍTULO 3

O SOL, SUA ATIVIDADE, SUA INFLUÊNCIA NO MEIO INTERPLANETÁRIO E SEUS EFEITOS GEOMAGNÉTICOS

É definido o Meio Interplanetário como sendo a região que se estende do Sol até o Meio Interestelar. Um grande número de fenômenos físicos que ocorrem nesta região tem como origem o Sol e sua atividade, conseqüências diretas de processos físicos internos que nele ocorrem. Tais processos, que envolvem instabilidades de plasma e campos magnéticos, são ainda pouco entendidos e estão relacionados às causas das emissões transientes solares, cuja ocorrência varia de acordo com o chamado Ciclo de Atividade Solar de 11 anos. As estruturas interplanetárias estão intimamente relacionadas a fenômenos geomagnéticos, como as Tempestades Geomagnéticas.

3.1 O SOL, O VENTO SOLAR E O CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO

3.1.1 O Sol

A estrutura solar interior e a Atmosfera Solar é representada no diagrama da Figura 3.1, que é uma adaptação de Kivelson e Russell (1995). O interior é formado pelas seguintes regiões: **Núcleo**, se estendendo até 0,25 raios solares, onde a energia é gerada através de reação de fusão nuclear, apresentando uma temperatura, T , da ordem de $1,5 \times 10^7$ K e densidade $\rho \sim 1,6 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$; **Zona Radiativa**, se estendendo no intervalo de 0,25 a 0,75 raios solares, onde a energia gerada no núcleo é dissipada através do processo de difusão radiativa, tendo uma temperatura da ordem de 8×10^6 K; **Zona de Convecção**, estendendo-se no intervalo de 0,75 a 1 raio Solar, com temperatura no intervalo de 5×10^5 a 6600 K e onde a energia é dissipada sob a forma de convecção. A Atmosfera Solar, em função de suas características e processo físicos, é convencionalmente

constituída de três grandes regiões: **Fotosfera**, com espessura da ordem de $0,5 \times 10^6$ m, ou 0,5 Mm, e temperatura da ordem de 6600 K; **Cromosfera**, com espessura em torno de 2,5 Mm, temperatura no intervalo de 4300 a 10^6 K e densidade 10^{-11} m^{-3} ; **Coroa**, acima da Cromosfera e sem limite exterior, apresenta uma temperatura da ordem de 10^6 K. A Coroa é a região da Atmosfera Solar de maior importância para os fenômenos físicos do Meio Interplanetário. Através da “evaporação” de seu material, constitui o Vento Solar, que arrasta o Campo Magnético Solar através do Meio Interplanetário. Ejeções transientes lançam a altas velocidades, da ordem de 2000 km/s, grandes quantidades do material constituinte da Coroa. Ejeções estão fortemente relacionadas a fenômenos geomagnéticos, tais como Tempestade Geomagnéticas, e à variabilidade do “Clima Espacial”.

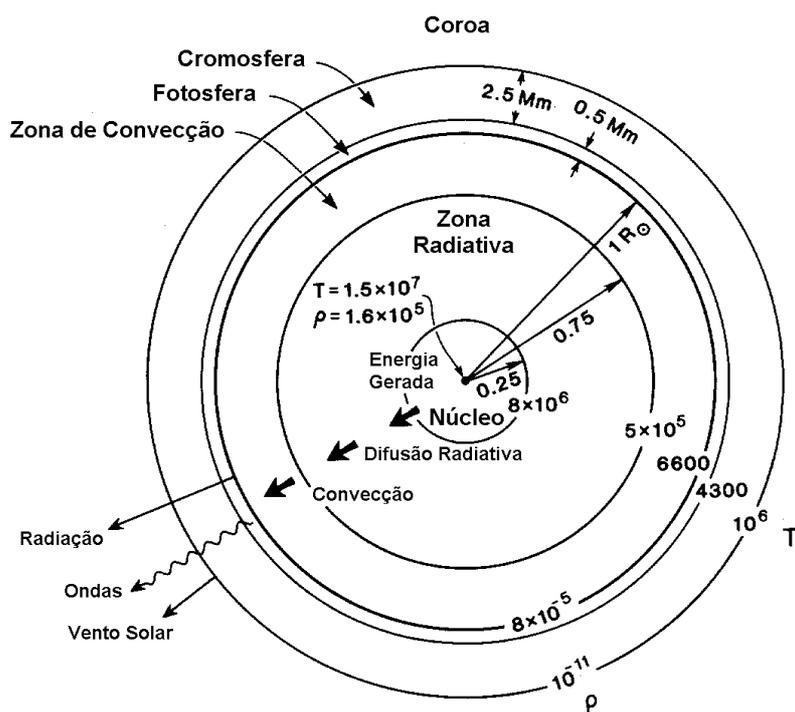


Fig. 3.1 - Estrutura do interior solar e atmosfera.

FONTE: Adaptado de Kivelson e Russell (1995, p.225).

O processo pelo qual se dá a elevação da temperatura da Fotosfera, ~6000K, para a Coroa, 10^6 K, ainda não é bem compreendido (Brant, 1970; Kivelson e Russell, 1995).

3.1.2 O Vento Solar

A existência do Vento Solar foi sugerida inicialmente por Ludwig Biermann, que publicou uma série de importantes trabalhos entre 1951 e 1957, baseados no estudo da direção de caudas ionizadas de cometas (aproximadamente radiais ao Sol, independente da direção do movimento), que o levaram a postular uma emissão de radiação corpuscular contínua (Brandt, 1970). A existência do Vento Solar também foi sugerida por outros cientistas que notaram mudanças no Campo Geomagnético, um dia ou mais após a ocorrência de grandes “Flares” solares (Burlaga, 1995).

O Vento Solar é, basicamente, um gás de prótons e elétrons que flui passando pela Terra com uma velocidade média de 400-500 km/s e uma densidade média de prótons e elétrons de 5 cm^{-3} (Brandt, 1970).

E. N. Parker em 1958 formulou um modelo dinâmico com um fluxo de partículas saindo da base da Coroa. Este modelo, conhecido por Modelo de Parker, propôs que o gradiente de pressão dos constituintes da Coroa Solar continuamente acelera o fluxo de partículas para fora do Sol. Este fluxo, chamado de “Vento Solar”, atinge velocidades supersônicas e chega à Terra com velocidade de algumas centenas de quilômetros por segundo (Parks, 1991).

O Vento Solar foi primeiramente medido pelas sondas Soviéticas Lunik 2 e Lunik 3 em 1960, e pela sonda Norte Americana Mariner 2 em 1962, confirmando as previsões de E. N. Parker. Desde então numerosas sondas e espaçonaves fizeram experimentos e identificaram como segundo mais abundante componente o íon $^4\text{He}^{++}$ (5%). Íons como $^3\text{He}^{++}$, $^4\text{He}^+$, O^{6+} e C^{3+} também existem no Vento Solar, porém em menores quantidades (Parks, 1991).

Observações de sondas espaciais indicaram que o Vento Solar se estende além de 50 UA. Na década de 1960 foi sugerido que o Vento Solar termina em uma grande onda de choque (Parker, 1961). Com muita incerteza foi estimado que a fronteira da grande onda de choque do Vento solar encontra-se em torno de 100 UA, de acordo com o sugerido por Suess (1990). A sonda Voyager 2 é a candidata mais provável a atravessar esta barreira e suas confirmações são ainda aguardadas.

3.1.3 O Campo Magnético Interplanetário

O Sol possui um Campo Magnético, cuja intensidade é 10^{-4} T na superfície da Fotosfera. Este campo é aproximadamente dipolar (Pneuman e Kopp, 1970), porém devido ao fato do Vento Solar ser altamente condutor, ele é transportado “congelado” para grandes distâncias, constituindo o chamado Campo Magnético Interplanetário - CMI, com intensidade de aproximadamente 5 nT nas circunvizinhanças da Terra.

O eixo do dipolo magnético é próximo ao eixo de rotação do Sol, e pode-se imaginar um plano de simetria cortando o seu equador. As linhas de Campo Magnético Interplanetário são aproximadamente radiais próximas ao Sol (de 1,5 a 2,5 raios solares), entrando no Sol acima do plano de simetria e saindo abaixo deste plano, dependendo da fase do ciclo solar de 22 anos, ou Ciclo de Hale. No Meio Interplanetário, a transição entre as linhas de campo entrando e saindo do Sol constitui uma estreita região, não necessariamente planar, onde forma-se uma lâmina de corrente, chamada Lâmina de Corrente Heliosférica, LCH (Schultz, 1973). Essa lâmina separa um hemisfério com polaridade negativa de outro com polaridade positiva, ilustrada no diagrama da Figura 3.2, adaptado da ilustração de Burlaga et al. (1981a).

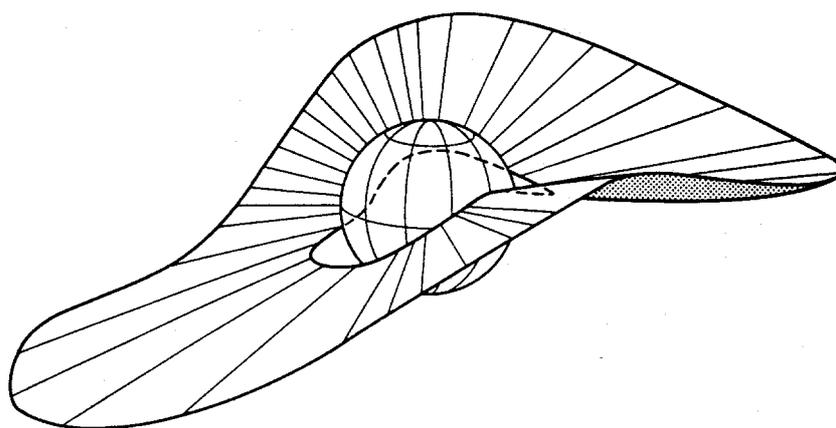


Fig. 3.2 - Lâmina de Corrente Heliosférica – LCH, próxima ao Sol.

FONTE: Burlaga et al. (1981a, p.8895).

Devido à rotação do Sol, o Campo Magnético Interplanetário tem, em larga escala, o aspecto de uma espiral de Arquimedes, sendo quase radial próximo ao Sol e praticamente perpendicular à direção radial além de 5-10 UA. Na circunvizinhança da Terra, 1 UA, o CMI tem inclinação de aproximadamente 45° .

A região onde o CMI domina os processos é conhecida como Heliosfera.

3.2 O CICLO SOLAR DE 11 ANOS E AS EJEÇÕES DE MASSA CORONAL SOLARES

3.2.1 O Ciclo Solar de 11 Anos

A Atividade Solar varia com um período de 11 anos, e como consequência, as estruturas do Meio Interplanetário e o Campo Magnético Interplanetário também variam com este mesmo período. O Ciclo Solar de 11 anos é medido tradicionalmente pelo número de manchas solares.

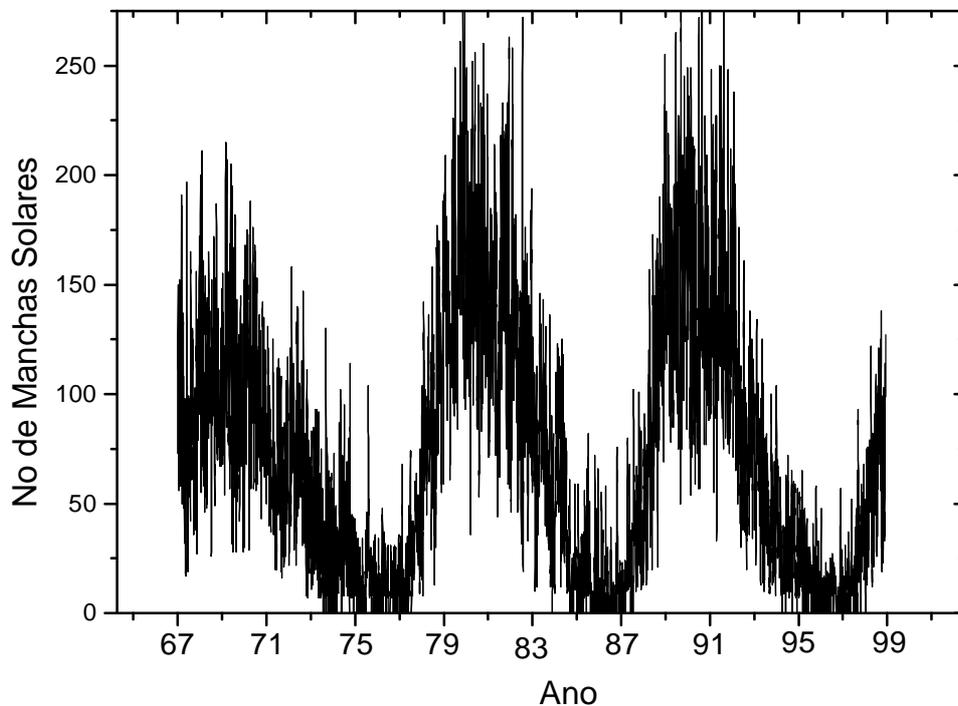


Fig. 3.3 - Valores diários do número de manchas solares em função do tempo.

FONTE: King (1998, <http://www.gsfc.nasa.gov/omniweb/>).

No Ciclo Solar podem ser identificadas quatro fases como ilustra a Figura 3.3: fase de mínimo solar, fase ascendente, fase de máximo solar, e fase descendente.

3.2.2 Ejeções de Massa Coronal (EMC)

Um exemplo de atividade que o Sol apresenta são as Ejeções de Massa Coronal (EMC).

Ejeções de Massa Coronal (EMC) Solares têm sido tópico de estudos extensivos desde a sua descoberta, através de observações feitas por coronógrafos na década de 70. Sequências de imagens de coronógrafos revelam a estrutura de densidade da Coroa Solar e suas variações temporais, bem como suas expulsões transientes de plasma, que são a essência das Ejeções de Massa Coronal (Hundhausen, 1997). A pesquisa em

EMC tem sido constantemente revisada e atualizada. Citamos como exemplo os trabalhos de Gosling (1990, 1992, 1993).

Um exemplo de expulsão transiente de plasma, ilustrada na seqüência de imagens da Figura 3.4, mostra uma Ejeção de Massa Coronal observada em 14 de abril de 1980, obtidas pela missão *Solar Maximum Spacecraft*, descrita por Hundhausen (1997), usando um coronógrafo. O coronógrafo mede a radiação fotosférica espalhada por elétrons no plasma coronal ionizado, mostrando a estrutura da densidade da Coroa. Nestas 4 imagens coloridas, as cores quentes, vermelho e laranja, mostram um aumento na radiação espalhada, e conseqüente aumento na densidade; as cores frias, azul, mostram uma diminuição desta radiação e da densidade. A seqüência de imagens mostra a passagem de duas regiões em forma de *loops* com forte brilho avermelhado, caracterizando a expulsão de material do Sol. A mais interna destas regiões apresenta uma aparência mais estruturada. Observou-se que esta região emitia na linha H α do Hidrogênio neutro, indicando a presença de um plasma mais frio. Esta estrutura foi interpretada como sendo uma Proeminência Solar que erupcionou acompanhando a EMC (Hundhausen, 1997).

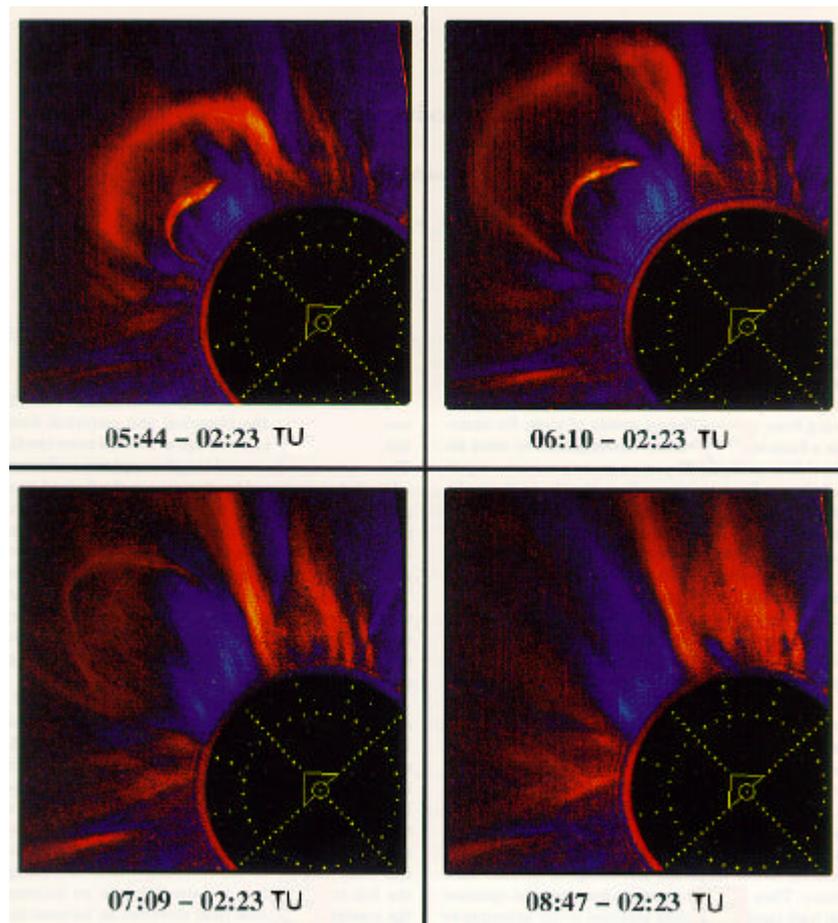


Fig. 3.4 - Sequência de imagens obtidas pela missão *Solar Maximum Mission Spacecraft* durante uma Ejeção de Massa Coronal em 14 de Abril de 1980.

FONTE: Hundhausen (1997, p.2).

As EMC são tipicamente observadas associadas a proeminências eruptivas (Gosling, 1997). Proeminências são filamentos escuros observados no Disco Solar, indicando que possuem temperaturas baixas.

Indícios no Meio Interplanetário da presença de material de uma proeminência eruptiva associada a uma EMC, tipo Nuvem Magnética (Seção 3.3.3), a 1 UA do Sol, próxima à Terra, em um evento ocorrido em 10 de janeiro de 1997, foram estudados por Burlaga et al. (1998). Esta Nuvem Magnética apresentava um região de densidade alta na parte traseira, chegando a $185 \text{ partículas/cm}^3$, que é aproximadamente 31 vezes o valor da densidade do Vento Solar normal, de $\sim 6 \text{ cm}^{-3}$.

É possível que as origens Solares das EMC estejam associadas aos Buracos Coronais, segundo Hewish e Bravo (1986). Os Buracos Coronais são regiões escuras, apresentando configuração de campo magnético aberta, de onde se originam Feixes de Altas Velocidades.

Tipicamente as EMC apresentam estrutura que pode ser caracterizada em três regiões distintas: *loop* externo; cavidade interna com densidade menor; proeminência eruptiva interna (Hundhausen, 1988).

As EMC apresentam frequência de ocorrência que varia ao longo do Ciclo Solar, variando de aproximadamente 0,2 eventos por dia no período de Mínimo Solar, a ~3,5 eventos por dia no período de máximo. As velocidades dessas ejeções próximo a superfície solar, 5 raios solares, variam de módulos inferiores a 50 km/s a valores superiores a 2000 km/s. Metade deles apresenta velocidades menores que a velocidade mínima do Vento Solar a 1UA, ~ 280 km/s, indicando que recebem aceleração adicional em distâncias maiores que 5 raios solares (Gosling, 1997 e referências neste trabalho).

3.3 RELAÇÃO ENTRE EJEÇÕES DE MASSA CORONAL SOLARES E ESTRUTURAS DO MEIO INTERPLANETÁRIO

3.3.1 Assinatura das EMC no Vento Solar

A identificação no Vento Solar do Meio Interplanetário do material ejetado em uma EMC, ou Ejeção de Massa Coronal Interplanetária – EMCI, é ainda um desafio a ser vencido. Não há uma característica única exibida por todas as nuvens de plasma resultantes de EMC Solares - EMCS. Várias características podem aparecer juntas ou isoladas, segundo Neugebauer e Goldstein (1997), tais como:

- 1) Temperatura cinética de íons ou elétrons baixa para uma dada velocidade do Vento Solar. A razão para tal característica é a expansão da estrutura;

2) Pronunciada anisotropia não usual da distribuição de prótons com temperatura paralela superior a temperatura perpendicular ao Campo Magnético Interplanetário, $T_{\parallel} > T_{\perp}$, causada pela conservação do momento magnético dos íons a medida que o plasma se expande;

3) Abundância de Hélio não usual. A razão entre a densidade de Hélio e a de prótons dificilmente excede $\sim 0,08$, exceto nas vizinhanças de uma EMC. Não se sabe ao certo a causa desta concentração atípica;

4) Abundância de outras espécies iônicas;

5) Feixes bidirecionais de elétrons supratérmicos e íons energéticos. Isto caracteriza uma configuração de Campo Magnético Interplanetário, candidato a ser o campo magnético interno de uma ejeção, fechado e com as extremidades presas ao Sol;

6) Suave e intenso Campo Magnético (item 5), que quando combinado com baixas temperaturas levam a baixos valores do parâmetro β de plasma. No plasma das EMC o valor de β geralmente é menor que 0,1;

7) Presença de rotação da direção do Campo Magnético (itens 5 e 6), que pode ser modelado como sendo um fluxo em corda. Algumas destas configurações são chamadas de Nuvens Magnéticas quando possuem: aumento de seu campo magnético por um fator maior que 2; rotação suave em um amplo intervalo de ângulo; e baixa temperatura iônica;

8) Decréscimo no fluxo de Raios Cósmicos de baixa energia.

Aproximadamente 1/3 das ejeções identificadas no Meio Interplanetário são Nuvens Magnéticas (Gosling, 1990), embora não se saiba ao certo qual parte das EMCS as originam.

3.3.2 Relação Entre EMC Rápidas e Ondas de Choque no Vento Solar

As EMC rápidas geralmente estão associadas a ondas de choque no Vento Solar. Gosling (1990) acredita que todas as ondas de choque transientes no Vento Solar em 1UA sejam causadas por EMC. Alternativamente, os Feixes de Alta Velocidade originados em Buracos Coronais podem ser os formadores das ondas de choque transientes, segundo Hewish e Bravo (1986). Seguindo este raciocínio, as EMC também estariam associadas aos Buracos Coronais, mas esta hipótese não é completamente aceita na comunidade científica. Vamos admitir nesta Dissertação que as ondas de choque observadas no conjunto de dados são causadas pelas EMC.

A Figura 3.5 mostra um esquema idealizado de uma onda de choque causada por uma EMC rápida. Por razões de ilustração, a EMC foi desenhada como sendo um plasmóide magneticamente desconectado do Sol. No entanto esta pode não ser a verdadeira configuração de uma EMC no Meio Interplanetário. A onda de choque é indicada pela linha curva e se propaga logo a frente da EMC. Entre o choque e a ejeção há uma região onde o plasma e o campo magnético do vento solar são comprimidos similarmente à Lâmina Magnetosférica da Terra (Capítulo 2, Figura 2.1).

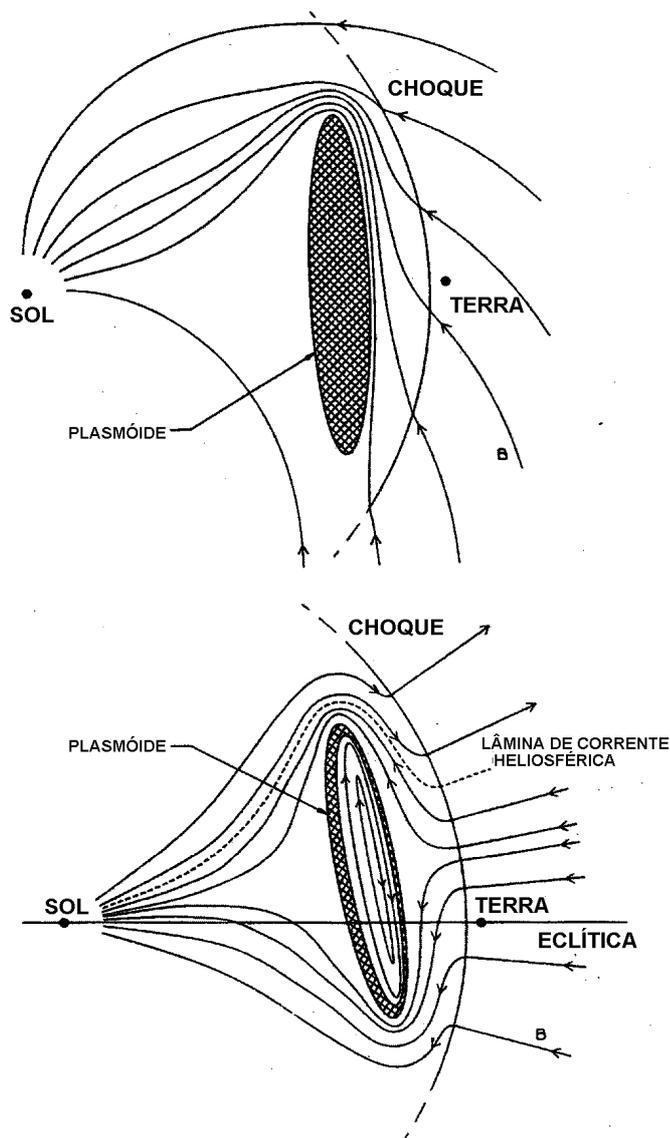


Fig. 3.5 - Esquema idealizado de uma onda de choque causada por uma EMC rápida.

FONTE: Gosling, (1997, p.10).

Não apenas o plasma e o campo magnético a frente da EMC são comprimidos a medida em que são empurrados pela EMC, como também é comprimida a parte interna frontal do plasmóide, como resultado da interação. Esta compressão tem um importante papel no aumento da magnitude do campo magnético dentro das EMCs.

3.3.3 Nuvens Magnéticas

Nuvens Magnéticas representam uma fração das ejeções identificadas no Meio Interplanetário (EMCI), apresentando assinatura e propriedades físicas únicas.

A definição de Nuvem Magnética foi primeiramente proposta por Klein e Burlaga (1982) como sendo uma estrutura com extensão radial de aproximadamente 0,25 UA (em 1 UA), campo magnético mais intenso que o do Vento Solar normal, tipicamente $B > 10$ nT, suave rotação da direção do campo magnético em um grande ângulo, próximo a 180° , baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta, $\beta \sim 0,1$.

A origem solar das Nuvens Magnéticas está relacionada às Ejeções de Massa Coronal Solares (EMCS). A relação entre uma EMCS, observada pelo satélite SOHO em 6 de janeiro de 1997, e a chegada de uma Nuvem Magnética na Terra, quatro dias depois, observada pelo satélite WIND, foi descrita por Fox et al. (1998). A região da cavidade interna da EMCS foi identificada como possível origem desta Nuvem Magnética por Gopalswamy et al. (1998). A relação entre EMCS e Nuvens Magnéticas ainda é um tópico que precisa ser melhor estudado.

Uma Nuvem Magnética observada por vários satélites possibilitou o estabelecimento de sua geometria, ilustrada no diagrama da Figura 3.6, adaptado de Burlaga et al. (1990). Na Figura 3.6 estão indicados os satélites que observaram o evento ocorrido em 5 de Janeiro de 1978: IMP-8, Helios B, Helios A e Voyager 2. Na Figura, os “x” representam a fronteira dianteira da Nuvem Magnética vista por cada um dos satélites, e os círculos, 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.

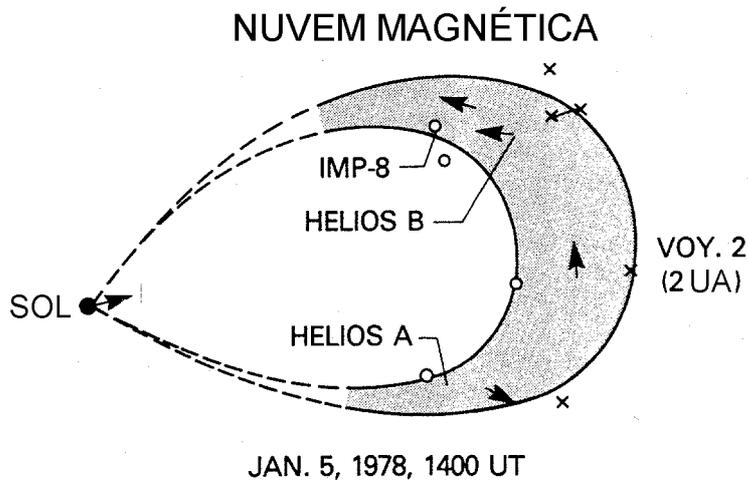


Fig. 3.6 - Geometria de uma Nuvem Magnética.

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

Medidas dos parâmetros de plasma e campo magnético são feitas por vários satélites no Meio Interplanetário, situados desde 0,3 UA, Helios, até dezenas de unidades astronômicas, Voyagers. Os parâmetros físicos que caracterizam uma Nuvem Magnética podem ser vistos, na forma de diagramas, no exemplo obtido pelo satélite Helios em 20 de junho de 1980, na Figura 3.7. A Figura 3.7 apresenta os seguintes parâmetros, descritos de cima para baixo: intensidade do campo magnético, ângulo de rotação das componentes do campo magnético B_z e B_y , velocidade, densidade numérica e temperatura de prótons. O sistema de coordenadas utilizado na Figura 3.7, chamado Sol-Terra-Eclíptica (GSE), é definido da seguinte maneira: x - na direção da linha imaginária que liga a Terra ao Sol, no plano da Eclíptica, apontando para o Sol; y - perpendicular a x, também no plano da Eclíptica; z - perpendicular a x, y e perpendicular ao plano da Eclíptica (Mendes Jr., 1992). Este evento apresenta uma rotação da componente B_z do campo magnético, área escura da Figura 3.7, de "Norte para Sul". Pode-se representar a rotação da componente do campo magnético através de um ângulo, com variação máxima de 180° , de -90° até $+90^\circ$. O evento da Figura 3.7 apresenta rotação da componente B_z de aproximadamente 120° . A Nuvem Magnética pode ser bastante inclinada em relação à Eclíptica, e neste caso, observa-se a rotação na

componente B_y do campo magnético. Uma onda de choque dianteira pode ser vista na Figura 3.7 pelo aumento abrupto da velocidade, campo magnético e temperatura.

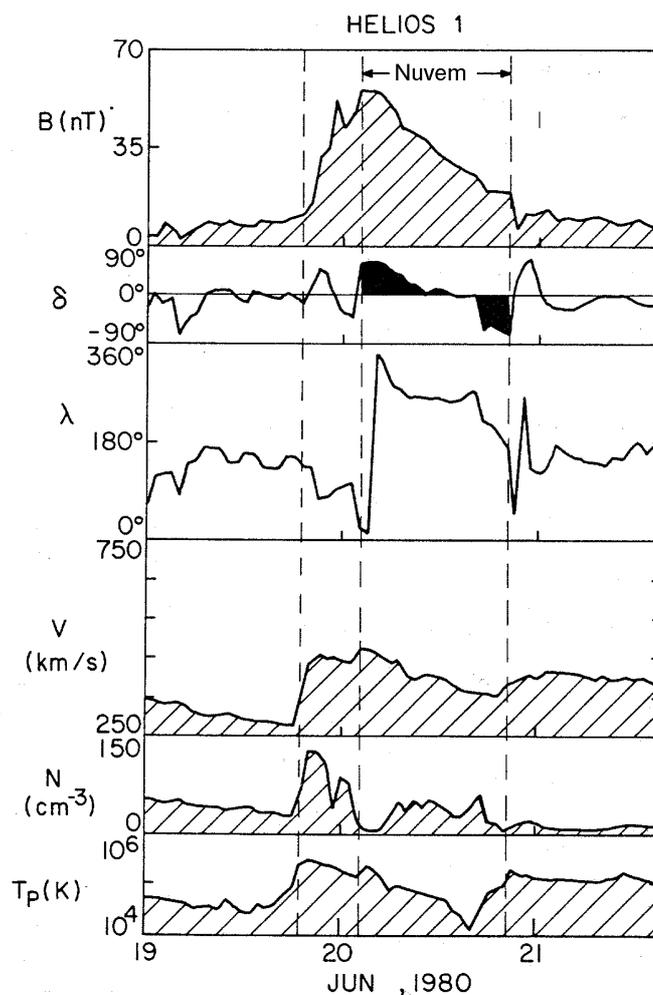
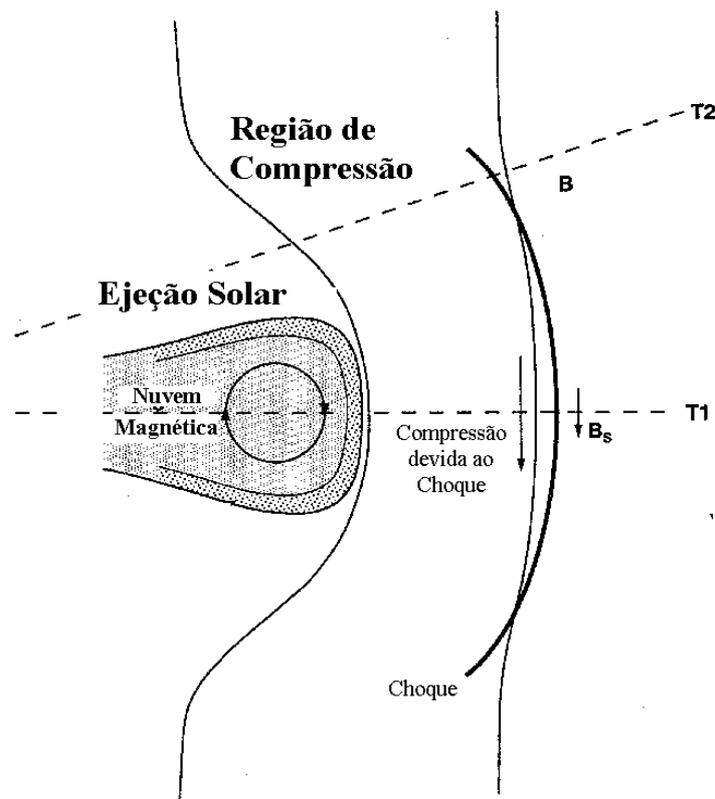


Fig. 3.7 – Variação temporal dos parâmetros físicos de um evento do Meio Interplanetário - Nuvem Magnética, observada pelo satélite Helios, em 20 de junho de 1980.

FONTE: Burlaga (1995, p.152).

Dependendo da trajetória do satélite, ilustrada na Figura 3.8, ao interceptar uma Nuvem Magnética, a rotação vista será maior, interceptando a parte central, ou menor, nas bordas da estrutura (Tsurutani e Gonzalez, 1997).



T1: Passando no centro da estrutura da Nuvem Magnética/Choque

T2: Passando fora do centro da estrutura da Nuvem Magnética/Choque

Fig. 3.8 - Desenho esquemático mostrando a estrutura de uma Nuvem Magnética, região de compressão e onda de choque. T1 e T2 são duas trajetória de satélite possíveis interceptando a ejeção de maneiras diferentes.

FONTE: Adaptado de Tsurutani e Gonzalez (1997, p.79).

Por se tratar, na maioria das vezes, de medidas com um único satélite, poderá haver alteração nos parâmetros medidos dependendo da trajetória relativa do satélite em relação a estrutura, ilustrado na Figura 3.8. Um satélite passando pela trajetória T2 pode não ver a rotação da direção do campo magnético, identificando apenas a onda de choque. Desse modo não seria possível a identificação do evento como sendo Nuvem Magnética.

Um conjunto de satélites obteve valiosos dados e continuam a observar o Vento Solar a 1 UA. Citamos: o satélite IMP-8; o satélite ISEE-3 situado no ponto Lagrangeano interno L1¹, no período de 1978-1979; o satélite WIND que foi colocado no ponto L1 por volta de 1994; mais recentemente, 1998, também no ponto L1, o satélite ACE.

Acredita-se que a estrutura do campo magnético de uma Nuvem Magnética pode ser descrita por um modelo “livre de forças”, do inglês *force-free*, onde a força magnética total é nula, através do equilíbrio entre o gradiente de pressão magnética e a curvatura do campo, Equação 2.3. Configurações deste tipo normalmente são dadas pela equação $\nabla \times \vec{B} = \alpha \vec{B}$. A solução para α constante que explica satisfatoriamente a orientação do campo magnético foi proposta por Burlaga (1988). Uma ilustração da configuração deste campo pode ser vista na Figura 3.9. Nesta figura está representado o campo magnético tridimensional de uma Nuvem Magnética segundo o modelo acima mencionado. Um corte da estrutura pode ser visto ampliado mostrando a estrutura do campo magnético no plano da página. Um satélite que estivesse no ponto Lagrangeano L1, ao interceptar a estrutura mediria seus parâmetros B_z , B_y e $|B|$ conforme ilustrado na parte de baixo da figura, onde pode-se observar a rotação da direção do campo magnético na direção z , de valores negativos para valores positivos. Também pode-se ver que a intensidade do campo magnético é maior no centro da estrutura.

¹ Ponto onde a força da gravidade da Terra e do Sol são compensadas, ~ 1UA.

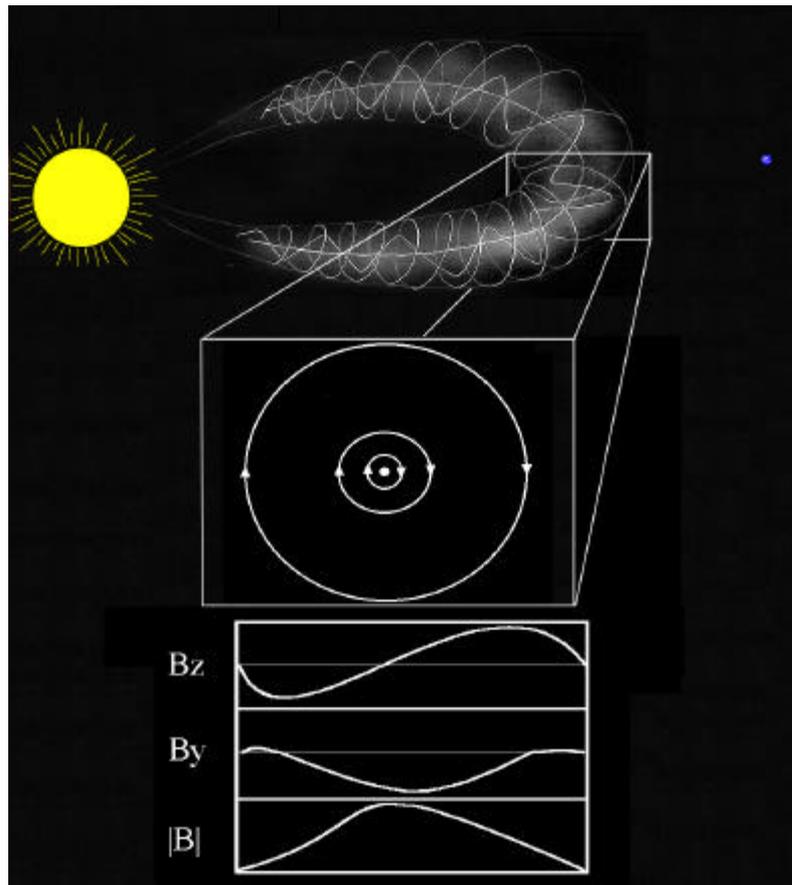


Fig. 3.9 - Ilustração da configuração do campo magnético de uma Nuvem Magnética.

O modelo “livre de forças”, também conhecido como “fluxo em corda”, do inglês *flux rope*, prevê um perfil simétrico da magnitude do campo magnético, o que muitas vezes não é observado. Esta questão será posteriormente abordada nesta Dissertação. Citamos como exemplo o apresentado por Lepping et al. (1990) e ilustrado na Figura 3.10. Na Figura 3.10 estão representados a intensidade do campo magnético, o ângulo de rotação da componente z e da componente y do campo magnético, calculados pelo modelo “fluxo em corda” e comparados com os mesmos parâmetros observados no Meio Interplanetário nos dias 354 e 355 do ano de 1980. Observa-se claramente que as rotações do campo magnético são muito bem descritas pelo modelo, mas a intensidade do campo magnético apresenta distorções evidentes.

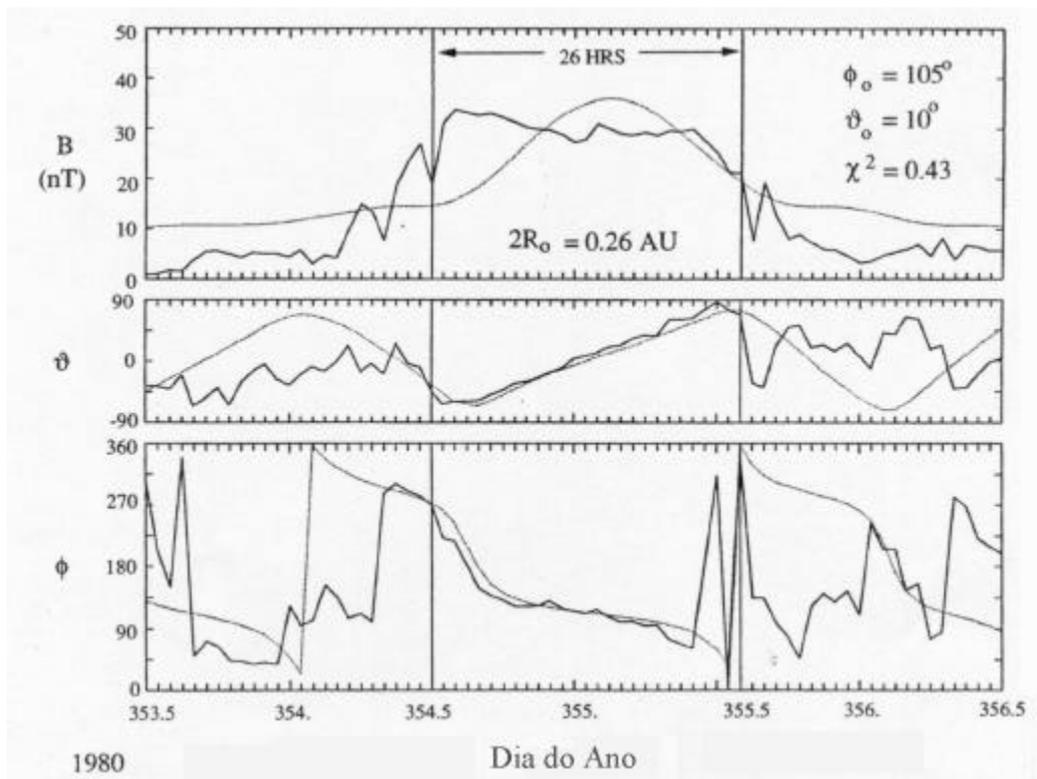


Fig. 3.10 - Comparação entre o modelo e os dados observacionais obtidos para as variações temporais dos parâmetros físicos de um evento do Meio Interplanetário - Nuvem Magnética.
 FONTE: Lepping et al. (1990, p.11959).

Normalmente os elétrons com energia ≥ 80 eV, que transportam o fluxo térmico de elétrons do Vento Solar, são colimados ao longo do Campo Magnético Interplanetário na direção apontando para fora do Sol. No entanto, dentro das Nuvens Magnéticas, observa-se um fluxo bi-direcional destes elétrons, indicando que elas são estruturas de campo magnético fechado. Este é um método para identificar Nuvens Magnéticas, bem como EMCI em geral, no Meio Interplanetário (Gosling et al., 1987).

Se a velocidade de uma Ejeção Solar, como por exemplo uma Nuvem Magnética, for maior que a velocidade magnetoacústica mais a velocidade de deslocamento do Vento Solar normal, uma onda de choque se formará na parte frontal da estrutura (Capítulo 2). O modelo de campo “livre de forças” considera que a pressão estática total deve ser máxima no centro da nuvem e mínima nas bordas. No entanto, uma ejeção associada a

uma onda de choque frontal certamente não obedece a esta consideração. Gosling (1990) mostrou através de um modelo computacional que uma região de alta pressão se desenvolve na parte frontal da ejeção, a medida que a ejeção “carrega” o meio a sua frente. Esta região de alta pressão é delimitada na parte frontal por um choque dianteiro. Uma possível configuração para uma ejeção envolvendo uma Nuvem Magnética está representada na Figura 3.8.

Neste mesmo trabalho de Gosling (1990) é apresentada uma ejeção possivelmente comprimida na parte traseira por um feixe de maior velocidade, o que também contribui para uma assimetria no perfil do campo magnético.

Burlaga et al. (1987) apresentaram dois eventos onde ocorre a interação de uma Nuvem Magnética com outras ejeções. Ambas causam Tempestades Magnéticas Intensas, sugerindo que a interação destas estruturas com o Meio Interplanetário circunvizinho pode ter influência nos parâmetros de plasma e campo magnético. A relação entre Nuvens Magnéticas e Tempestades Magnéticas será abordada na próxima seção.

3.4 A ATIVIDADE SOLAR E OS EFEITOS GEOMAGNÉTICOS

A Atividade Solar é responsável por diversas perturbações no Campo Geomagnético, que podem ser recorrentes ou transientes. As recorrentes normalmente estão relacionadas à rotação do Sol e têm períodos de aproximadamente 27 dias. As transientes estão fortemente relacionadas às Ejeções Solares como as Ejeções de Massa Coronal. Dentre estas perturbações podemos destacar as Tempestades Geomagnéticas.

3.4.1 Tempestades Geomagnéticas

Episódios de extraordinárias flutuações do Campo Magnético Terrestre foram denominadas “Tempestades Geomagnéticas” ou “Tempestades Magnéticas” na metade do século XIX (Gonzalez et al, 1994). Sua assinatura característica é um decréscimo na

componente H, horizontal, do Campo Magnético Terrestre, durando cerca de algumas dezenas de horas (Kamide et al., 1998b). Atribui-se este decréscimo a um aumento da população de partículas aprisionadas na Magnetosfera. Derivas devidas ao gradiente do campo magnético e a sua curvatura produzem a chamada “Corrente de Anel”, que é o movimento destas partículas: íons de leste para oeste; elétrons de oeste para leste. Para medir a intensidade desta corrente, utilizam-se valores horários da variação global da componente H em baixas latitudes, constituindo o índice Dst (Gonzalez et al., 1994). As variações do índice Dst da maior Tempestade Magnética ocorrida durante o Ciclo Solar 21, medida no período de 12 a 16 de julho de 1982 estão ilustradas na Figura 3.11.

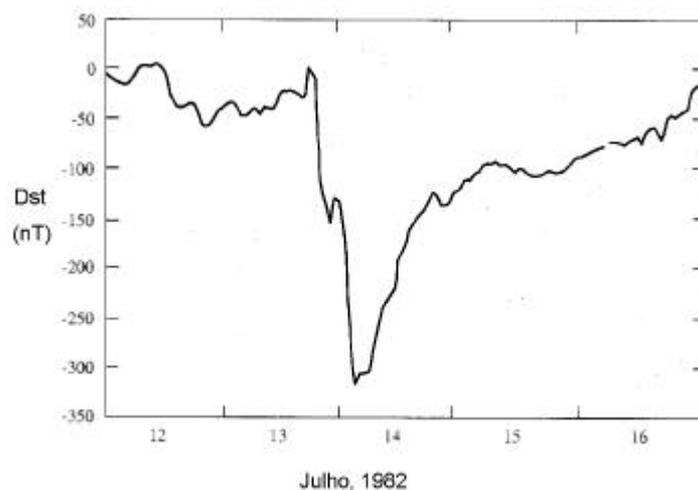


Fig. 3.11 - Valores horários do índice Dst para a Tempestade Magnética de 12-16 de julho de 1982.

FONTE: Gonzalez et al. (1994, p.5773).

Uma Tempestade Geomagnética pode ser caracterizada tipicamente por 3 fases: início súbito, caracterizado por um aumento do campo magnético; fase principal, que é o intervalo de alto decréscimo do índice Dst; e fase de recuperação, onde o campo magnético tende a restaurar sua intensidade normal.

Costuma-se agrupar as Tempestade Geomagnéticas em três grupos característicos, de acordo com sua intensidade: **fracas**: $Dst > -50\text{nT}$; **moderadas**: $-100\text{ nT} < Dst < -50\text{ nT}$; e **intensas**: $Dst < -100\text{ nT}$ (Gonzalez et al., 1994).

3.4.2 Origem interplanetária das Tempestades Geomagnéticas

Acredita-se que o mecanismo físico responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera seja a reconexão entre o Campo Magnético Interplanetário e o Campo Magnético Terrestre (Tsurutani e Gonzalez, 1997). Para tanto, é necessário que o Campo Magnético Interplanetário apresente substancial componente na direção – Z, considerando o sistema de coordenadas Sol-Magnetosfera², ou Bs, Sul.

O critério necessário para a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas intensas, $Dst < -100$ nT, é o de haver um Campo Elétrico Interplanetário, $\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B}_s$, na direção do anoitecer, maior que 5 mV/m, por um período maior que 3 horas. Esse critério foi empiricamente definido por Gonzalez e Tsurutani (1987), com dados obtidos nos anos de 1978 e 1979, e implica em um campo magnético Bs maior que 12,5 nT para uma velocidade do Vento Solar de aproximadamente 400 km/s.

As origens interplanetárias de campos magnéticos Bs, responsáveis pelas dez Tempestades Magnéticas intensas estudadas por Gonzalez e Tsurutani (1987), onde 5 foram causadas por Ejeções Solares identificadas no Meio Interplanetário, foram apresentadas por Tsurutani et al. (1988). Dentre estas ejeções estão as Nuvens Magnéticas, que podem apresentar uma intensa componente de seu campo magnético na direção sul e posteriormente na direção norte, ou vice-versa. Burlaga et al.(1987) identificaram 17 Tempestades Geomagnéticas no período de 1972 a 1983, onde pelo menos 10 foram associadas a Nuvens Magnéticas. Duas das cinco Tempestades Magnéticas mais intensas, com $Dst < -249$ nT do período de 1971 a 1986, foram associadas a Nuvens Magnéticas por Tsurutani et al. (1992).

Kamide et al.(1998a) estudaram mais de 1200 Tempestades Magnéticas e identificaram que em mais de 50 % das intensas a fase principal se desenvolveu em duas etapas.

² O sistema Sol-Magnetosfera, ou GSM, difere do sistema Sol-Terra-Eclíptica, ou GSE, por uma rotação em torno do eixo “x”, de modo que o eixo “z” fique paralelo ao eixo do Dipolo Magnético Terrestre (Mendes Jr., 1992).

Nesse caso, após uma pré-injeção de partículas na Corrente de Anel, através de um pré-evento Bs, ocorre um outro evento Bs, que provoca um decréscimo ainda maior do índice Dst. Um exemplo de Tempestade Magnética com fase principal em duas etapas pode ser visto nas variações temporais do índice Dst da Figura 3.11, onde a primeira etapa leva o índice para Dst ~ -150 nT e a segunda etapa para Dst ~ -320 nT. Um importante candidato para esta dupla estrutura de Bs é um campo Bs intenso, produzido por uma onda de choque seguida do campo Bs de uma Nuvem Magnética que esteja produzindo o choque.

O acoplamento da Magnetosfera Terrestre com o Meio Interplanetário e com o Sol, origem de todos os fenômenos apresentados neste Capítulo, pode ser mais facilmente compreendido pela visualização da ilustração gráfica da Figura 3.12, que foi introduzida por Tsurutani e Gonzalez (1997).

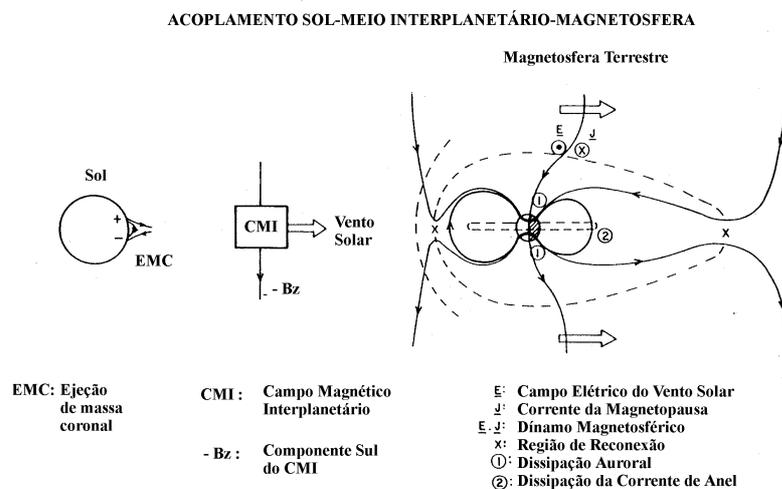


Fig. 3.12 - Acoplamento entre Sol, Meio Interplanetário e Magnetosfera Terrestre.

FONTE: Tsurutani e Gonzalez (1997, p.82).

CAPÍTULO 4

ANÁLISE, INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS PARA EVENTOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO

4.1 INTRODUÇÃO

Os principais objetivos da metodologia do Capítulo 4 são a definição dos conjuntos de critérios de seleção de eventos do Meio Interplanetário e a formação de grupos e sub-grupos de eventos. Estes servirão para a redução, a análise, a interpretação e a discussão dos processos físicos dos eventos, que serão caracterizados em Nuvens Magnéticas ou eventos de outra natureza, Não – Nuvens Magnéticas. São pesquisadas as relações entre os parâmetros intrínsecos destes eventos, relacionando-os com a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas e inter-relações com outras estruturas identificadas no Meio Interplanetário. Quatro seções principais, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, foram criadas com objetivos distintos e bem definidos.

A Seção 4.2 apresenta uma metodologia de escolha e determinação de dois conjuntos de Eventos de Ejeções de Massa Coronal Interplanetárias – EMCI. Um conjunto é composto de Nuvens Magnéticas, previamente estudadas em Literatura Especializada e outro composto de dois sub-grupos: Ejeções candidatas a serem classificadas como Nuvens Magnéticas identificadas no ano de 1979; Ejeções não classificadas como sendo Nuvens Magnéticas.

Seguindo-se ao estudo preliminar da Seção 4.2, é apresentado na Seção 4.3 um estudo da relação entre a velocidade de propagação e a intensidade do campo magnético interno dos eventos dos dois conjuntos apresentados na Seção 4.2.

Uma relação entre Nuvens Magnéticas e a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas é apresentada na Seção 4.4. Investigou-se nuvens “rápidas” e “lentas”, mostrando que as

últimas podem estar relacionadas a um mecanismo particular de desenvolvimento da fase principal das Tempestades Geomagnéticas.

A interação entre Nuvens Magnéticas e estruturas circunvizinhas é apresentada na Seção 4.5. Processos estáticos entre as Nuvens Magnéticas e as Ondas de Choque são estudados através do cálculo da Pressão Estática Total, isto é, Térmica e Magnética. Interações dinâmicas entre Feixes de Alta Velocidade e Nuvens Magnéticas são apresentadas e tratadas quantitativamente através do cálculo da Pressão Dinâmica.

4.2 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE EVENTOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO

4.2.1 Seleção de Dados - Constituição do Grupo 1 de Eventos Interplanetários: Nuvens Magnéticas

Foram identificados e selecionados eventos do Meio Interplanetário caracterizados como Nuvens Magnéticas, que foram estudados e publicados em Literatura Especializada. Dezesete eventos foram selecionados e constituem o Grupo 1, que com suas referências estão listados na Tabela 4.1. Os eventos selecionados foram observados por vários satélites presentes no Meio Interplanetário, dentre os quais podemos citar os satélites IMP, o satélite ISEE-3 e o satélite WIND, estando os dois últimos situados no ponto Lagrangeano L1, a aproximadamente 1 UA do Sol, isto é, próximo à Terra.

TABELA 4.1 - CONSTITUIÇÃO DO GRUPO 1 DE EVENTOS INTERPLANETÁRIOS: NUVENS MAGNÉTICAS - PUBLICADAS EM LITERATURA ESPECIALIZADA

EVENTOS (DATA)	REFERÊNCIA
14/01/1967 11/02/1969 01/04/1973 25/05/1975 11/11/1975	Klein e Burlaga, 1982
04/04/1979* 25/04/1979	Burlaga et al., 1987
29/09/1978 21/02/1979 04/04/1979** 29/08/1979 18/09/1979 13/04/1981	Tsurutani et al., 1988 e Tsurutani et al., 1992
27/08/1978 19/12/1980 13/01/1988	Farrugia et al., 1997
18/12/1995	Burlaga et al., 1996
27/05/96 09/01/97	—

* observado pelo satélite IMP-8

** observado pelo satélite ISEE-3

Os eventos escolhidos e relacionados na Tabela 4.1 foram selecionados por se tratarem de eventos clássicos, possibilitando da relação de sua velocidade de propagação com seu campo magnético intrínseco e serviram como amostragem do comportamento de Nuvens Magnéticas para outras amostras de eventos ainda não estudados. A exceção dos 5 eventos estudados por Klein e Burlaga (1982) e dos eventos ocorridos em 27/05/96 e 09/01/97, os outros 12 eventos relacionados na Tabela 4.1 foram escolhidos pelos autores citados devido às suas relações com Tempestades Magnéticas.

4.2.2 Exemplos de Parâmetros Físicos de Eventos do Meio Interplanetário, Grupo 1 - Nuvens Magnéticas.

Como um primeiro exemplo de evento do Meio Interplanetário, apresentamos uma Nuvem Magnética selecionada na Tabela 4.1, que foi observada por um dos satélites IMP, em 01 de Abril de 1973, e publicada por Klein e Burlaga (1982). Seus parâmetros físicos são sintetizados nos diagramas de variações temporais apresentados na Figura 4.1.

Os diagramas temporais da Figura 4.1, ordenados de cima para baixo apresentam as variações temporais: da intensidade do campo magnético; da componente Bz; da componente By; da velocidade, da temperatura de prótons e da densidade numérica de prótons. A rotação da componente Bz do campo magnético pode ser vista no segundo diagrama, sendo de Norte para Sul.

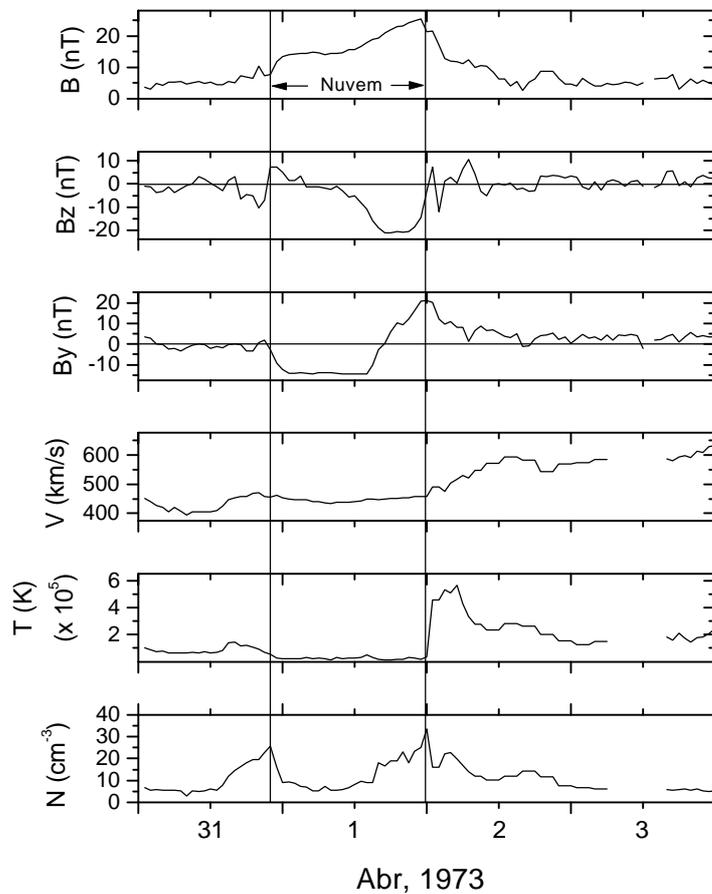


Fig. 4.1 - Variações temporais dos parâmetro físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário - Nuvem Magnética, observada por um dos satélites IMP em 01 de Abril de 1973.
 FONTE: Klein e Burlaga (1982, p.615).

Como um segundo exemplo de evento do Meio Interplanetário, apresentamos os parâmetros físicos de uma Nuvem Magnética observada pelo satélite WIND em 18 de dezembro de 1995, que foi estudada por Burlaga et al. (1996).

As variações temporais dos parâmetros físicos do evento acima mencionado são apresentadas na Figura 4.2, cujos diagramas de cima para baixo mostram: o campo magnético; rotação da componente Bz e By; densidade de prótons e velocidade. A Nuvem Magnética produziu uma onda de choque dianteira, indicado pelo primeiro “S”.

Um feixe mais veloz “empurrava” a Nuvem Magnética por trás e, na interface, outro choque foi observado, indicado pelo segundo “S”.

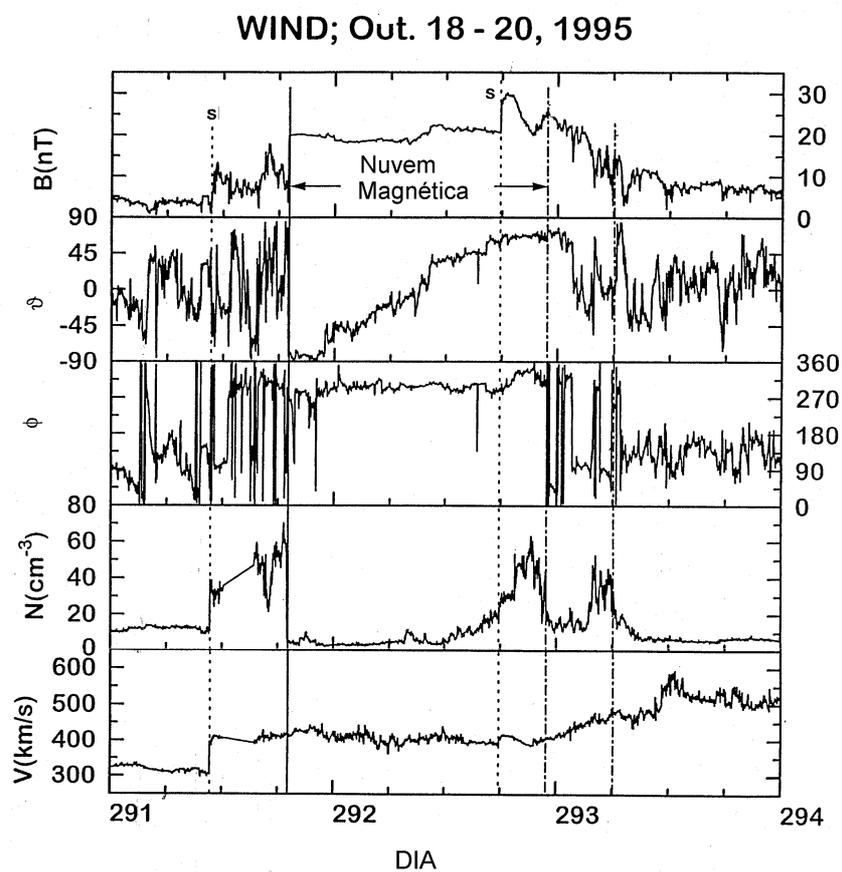


Fig. 4.2 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário - Nuvem Magnética, observada pelo satélite WIND em 18 de dezembro de 1995.

FONTE: Burlaga et al. (1996, p.3).

4.2.3 Seleção de Dados de Eventos Interplanetários, Constituição do Grupo 2, Sub-Grupos: A – Candidatos a Nuvens Magnéticas, B – Não Nuvens Magnéticas.

Complementando o estudo apresentado nas Seções anteriores, um segundo conjunto de Eventos Interplanetários, não necessariamente relacionado com Tempestades Geomagnéticas, foi selecionado entre os eventos ocorridos em 1979, constituindo o Grupo 2, subdividido em dois Sub-Grupos: A – Eventos candidatos a Nuvens Magnéticas e B – Eventos Não Nuvens Magnéticas. O Grupo 2 de eventos com seus respectivos sub-grupos estão listados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Na seleção dos eventos que constituem o Grupo 2, tomamos o ano de 1979, devido ao fato de que para este ano existe um conjunto completo de dados de parâmetros de plasma e campo magnético¹ medidos pelo satélite ISEE-3. Identificamos um conjunto de ejeções através do critério estabelecido nesta Dissertação, resultante da combinação dos critérios discutido por Zwickl et al. (1983) e por Tsurutani et al. (1988). Esses critérios estão dentro daqueles apresentados por Neugebauer e Goldstein (1997), que foram anteriormente citados na Seção 3.3.1.

Nosso critério, baseado na metodologia e concepção do parágrafo anterior, define como parâmetros para a caracterização de Ejeções: campo magnético suave, sem descontinuidades ou ondas de Alfvén; alto valor do campo magnético; baixa temperatura; presença de fluxo bidirecional de elétrons com energia ≥ 80 eV. Neste critério, foram utilizados dados com resolução de 5 a 15 minutos a fim de identificar a suavidade do campo.

O conjunto de dados que constitui o Grupo 2 – Sub-Grupo A, selecionado segundo nosso critério, está listado na Tabela 4.2. Contém 13 eventos com estruturas candidatas

¹ Este conjunto de dados está disponível no grupo de pesquisa Magnetosfera/Heliosfera.

a Nuvens Magnéticas. A caracterização como Nuvens Magnéticas foi efetuada segundo os critérios de Burlaga et al. (1981b). O Sub-Grupo B, contendo 23 eventos de ejeções, também selecionados segundo nosso critério, não apresenta em primeira análise eventos com características de Nuvens Magnéticas e estão listados na Tabela 4.3.

TABELA 4.2 – CONJUNTO DE DADOS DE EVENTOS DO MEIO INTER-PLANETÁRIO NO ANO DE 1979 QUE CONSTITUI O GRUPO 2 – SUB-GRUPO A, SELECIONADOS SEGUNDO NOSSO CRITÉRIO COMO ESTRUTURAS CANDIDATAS A NUVENS MAGNÉTICAS

Choque Associado		Evento	
Data	Horário	Data	Horário
06/01	0032	07/01	0040-2300
22/03	0748	22/03	0930-1400
-	-	26/03	0500-0940
-	-	05/04	0950-1200
06/10	1038	06/10	1820-2100
-	-	06-07/10	2100-0300
-	-	11/10	0630-0920
-	-	13-14/10	1950-0930
-	-	14-15/10	2100-1400
-	-	29/10	0440-1545
23/08	0739	23-24/08	1100-0100
11/11	0147	11-13/11	1430-1730
-	-	14-15/11	1045-0220

TABELA 4.3 – CONJUNTO DE DADOS DE EVENTOS DO MEIO INTER-PLANETÁRIO NO ANO DE 1979 QUE CONSTITUI O GRUPO 2 – SUB-GRUPO B, SELECIONADOS SEGUNDO NOSSO CRITÉRIO COMO ESTRUTURAS NÃO CARACTERIZADAS COMO NUVENS MAGNÉTICAS

Choque Associado		Evento	
Data	Horário	Data	Horário
25/01	0050	25/01	0350-0620
03/02	1740	04-05/02	2100-1800
11/02	0100	11/02	0500-1800
18/02	0220	18/02	0230-2100
06/03	0240	06-08/03	2130-1200
17/03	0200	17/03	0850-1220
-	-	17-18/03	0450-0620
22/03	0750	22-23/03	2030-0900
28/03	0754	29/03	0800-1430
19/04	2115	20-21/04	1645-0930
03/04	0930	03/04	2020-2220
-	-	06/04	0130-0730
02/05	1820	03-04/05	0430-0930
06/07	1850	07/07	0300-1140
12/07	1130	12-13/07	2000-0400
30/07	1230	30/07-01/08	1810-0800
29/08	0500	29/08	1800-2400
18/09	0530	18-19/09	1440-1750
06/10	1040	06-07/10	2100-0840
21/10	0540	21-22/10	2000-1350
07/11	1300	07-08/11	1600-1450
09/11	1130	09/11	1930-2300

4.2.4 Exemplos de Parâmetros Físicos de Eventos do Meio Interplanetário, Grupo 2 - Sub-Grupos: A – Candidatos a Nuvens Magnéticas, B – Não Nuvens Magnéticas, Análise de suas Características.

As variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura candidata a Nuvem Magnética, observada pelo satélite ISEE-3 em 07 de janeiro de 1979, classificada no sub-grupo A da Tabela 4.2, são apresentadas na Figura 4.3. Estão indicados, de cima para baixo, os diagramas das variações temporais dos parâmetros: temperatura de prótons; velocidade; densidade numérica; componente B_y do campo magnético; componente B_z do campo magnético; intensidade do campo magnético; índice Dst. As áreas escuras destacadas na Figura 4.3 representam eventos de fluxo bidirecional de elétrons com energia ≥ 80 eV, identificados por Gosling et al. (1987), e que levam a concluir a presença de uma estrutura de campo magnético fechado. A rotação da componente B_z do campo magnético é bem clara, Sul-Norte. O perfil da velocidade é decrescente, sugerindo que a estrutura está perdendo energia devido à expansão. A temperatura se manteve baixa durante todo o evento. Uma onda de choque pode ser identificada associada ao evento no início do dia 6, podendo ser identificada pelos aumentos abruptos: do campo magnético; da velocidade; da temperatura; e da densidade.

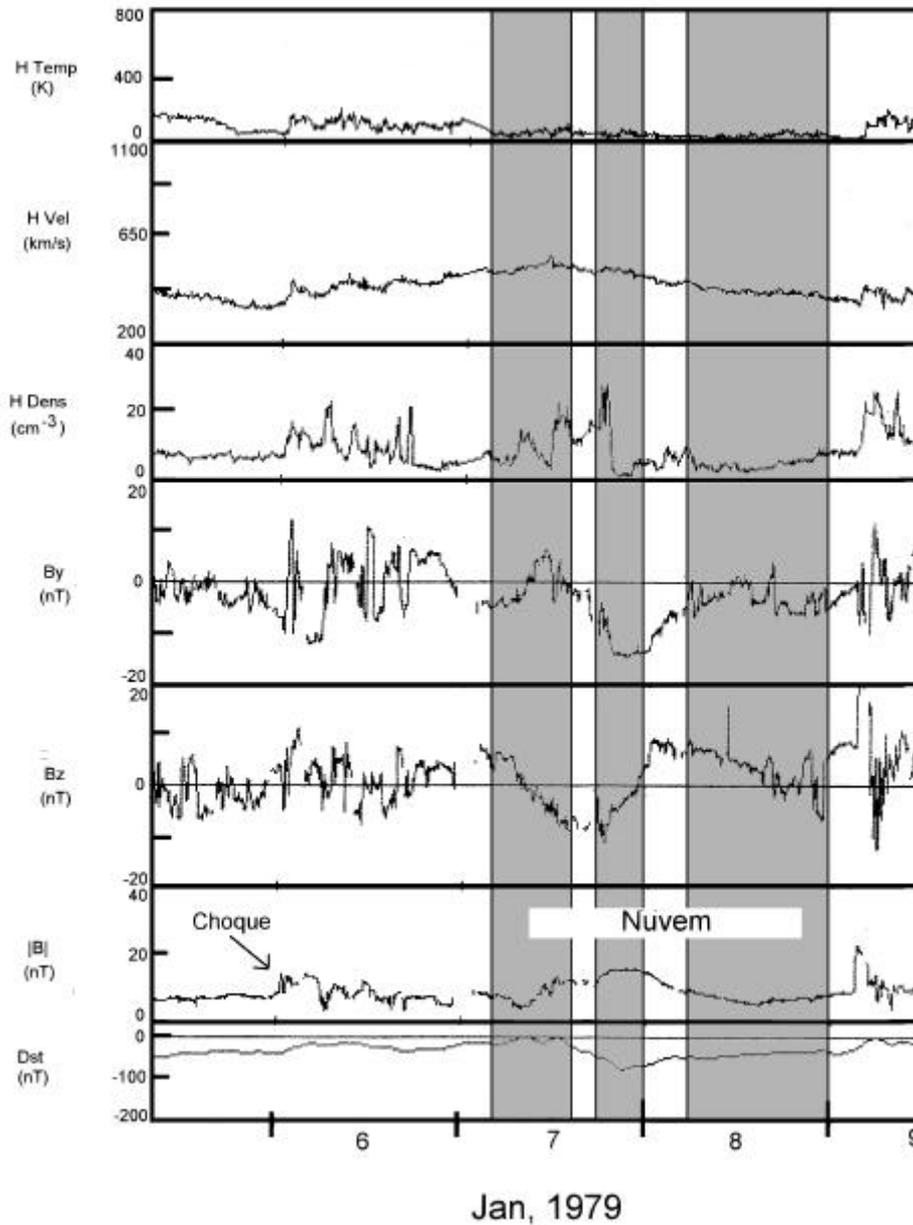


Fig. 4.3 - Variações temporais dos parâmetro físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário – candidata a Nuvem Magnética, observada pelo satélite ISEE-3 em 07 janeiro de 1979.

Como as fronteiras de uma Nuvem Magnética nem sempre podem ser facilmente definidas, calculamos o parâmetro beta para os eventos, utilizando médias horárias da densidade, temperatura e campo magnético. Farrugia et al. (1997) observaram que o valor do parâmetro beta dentro de Nuvens Magnéticas permanece baixo, em torno de

0,1, sendo este um bom parâmetro para definir as fronteiras do evento. As variações temporais do campo magnético, da componente Bz, do ângulo de rotação, e do parâmetro beta para o evento da Figura 4.3 são apresentadas na Figura 4.4.

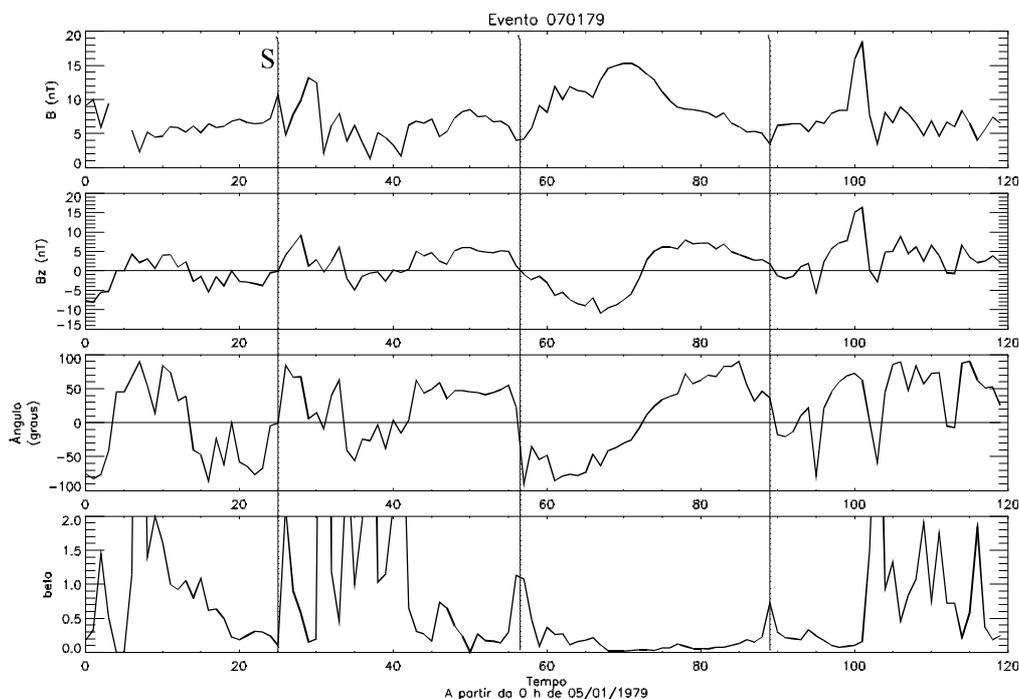


Fig. 4.4 - Variações temporais do campo magnético, da componente Z, do seu ângulo de rotação e do parâmetro beta, do evento observado pelo satélite ISEE-3, em 07/01/1979.

No evento observado pelo satélite ISEE-3 em 07/01/1979, Figura 4.4, a posição do choque está representada pela linha vertical “S”. Podemos definir as fronteiras da nuvem através do parâmetro beta, que deve apresentar baixo valor. Neste evento o parâmetro beta apresentou variação entre valores menores do que 0,1 a 0,4, no intervalo selecionado entre as linhas verticais da Figura 4.4. A rotação da componente Bz do campo magnético foi de aproximadamente 180° dentro deste intervalo. Portanto, estes resultados levam-nos a concluir que estas devem ser as fronteiras da ejeção, sendo uma forte candidata a Nuvem Magnética de acordo com os critérios definidos por Burlaga et al. (1981b).

As variações temporais dos parâmetros físicos de uma outra estrutura candidata a Nuvem Magnética também observada pelo satélite ISEE-3, em 11 de novembro de 1979, classificada no Grupo 2, Sub-Grupo A, de eventos candidatos a Nuvens Magnéticas da Tabela 4.2, são apresentadas na Figura 4.5. Estão indicados, de cima para baixo, os diagramas das variações temporais dos seguintes parâmetros: temperatura de prótons; velocidade; densidade numérica; componente B_y do campo magnético ; componente B_z do campo magnético; intensidade do campo magnético; índice Dst. As áreas escuras destacadas na Figura 4.5 representam eventos de fluxo bidirecional de elétrons com energia ≥ 80 eV, identificados por Gosling et al. (1987), que levam a concluir a presença de uma estrutura de campo magnético fechado. Podemos identificar uma onda de choque frontal, “S”. O campo magnético apresenta rotações nas componentes B_y e B_z , podendo indicar que se trata de uma estrutura do tipo Nuvem Magnética, bastante inclinada em relação à Eclíptica. A temperatura subiu após o choque, mas se manteve relativamente baixa posteriormente, durante o evento bidirecional. Não se observa diminuição da velocidade ao longo do evento, indicando a não ocorrência de expansão. Algumas vezes estas estruturas são ditas “velhas” porque já se expandiram até seu limite.

Para melhor definir as fronteiras do evento observado pelo satélite ISEE-3 em 11 de novembro de 1979, calculamos a rotação da componente B_z do campo magnético e o parâmetro beta, e os apresentamos na Figura 4.6. A primeira linha vertical da Figura 4.6 indica a posição do choque, “S”. Escolhemos como limites da estrutura a região delimitada pelas linhas verticais seguintes, utilizando na parte dianteira a queda do valor de beta para $\sim 0,2$, juntamente com as variações abruptas de direção do campo magnético, e na parte traseira o término da rotação do campo. A interpretação destes resultados leva-nos a concluir que o evento também é candidato a Nuvem Magnética e faz parte do Sub-Grupo A desta Dissertação, listados na Tabela 4.2.

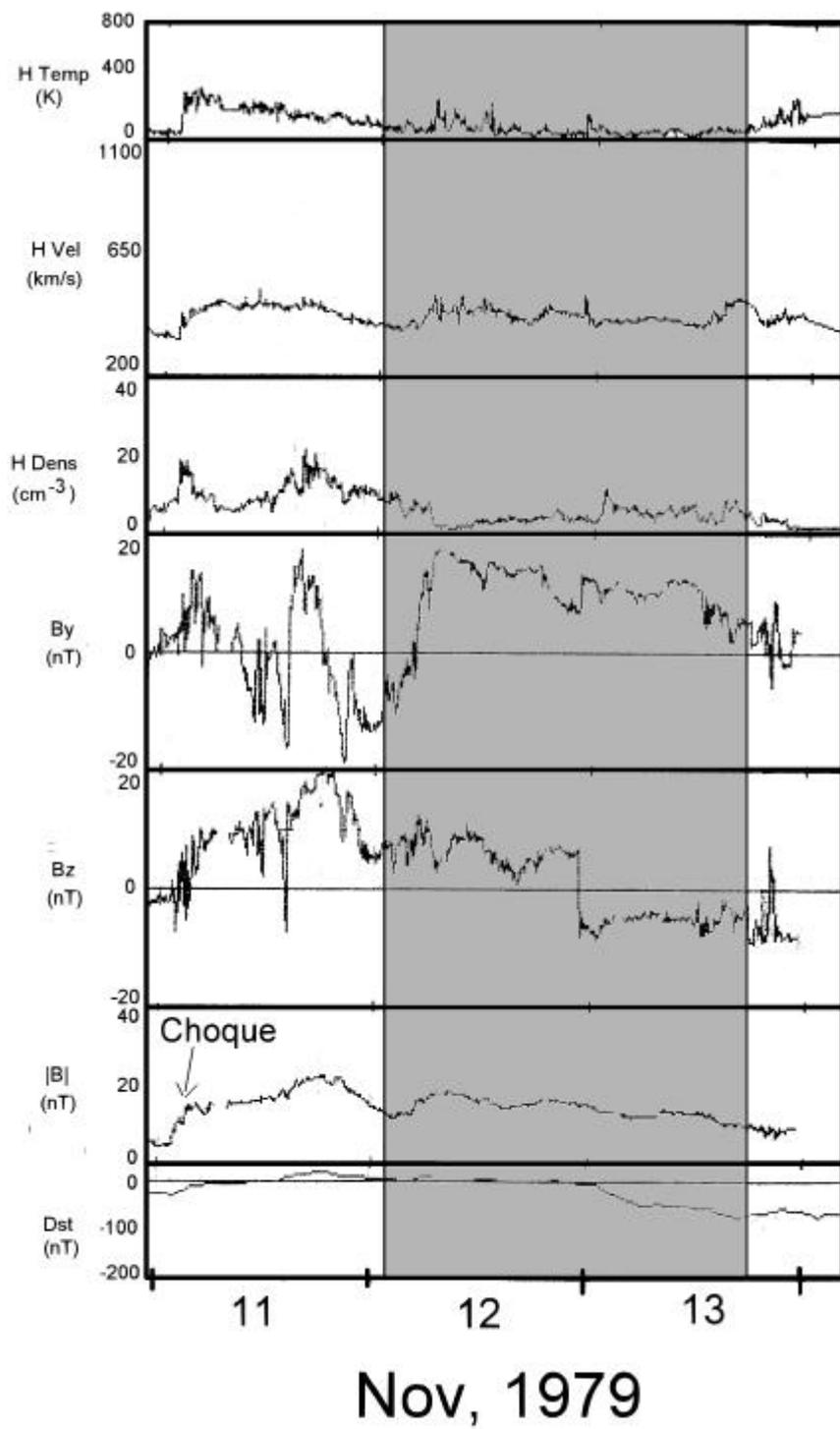


Fig. 4.5 - Variações temporais dos parâmetros físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário – candidata a Nuvem Magnética, observada pelo satélite ISEE-3 em 11 novembro de 1979.

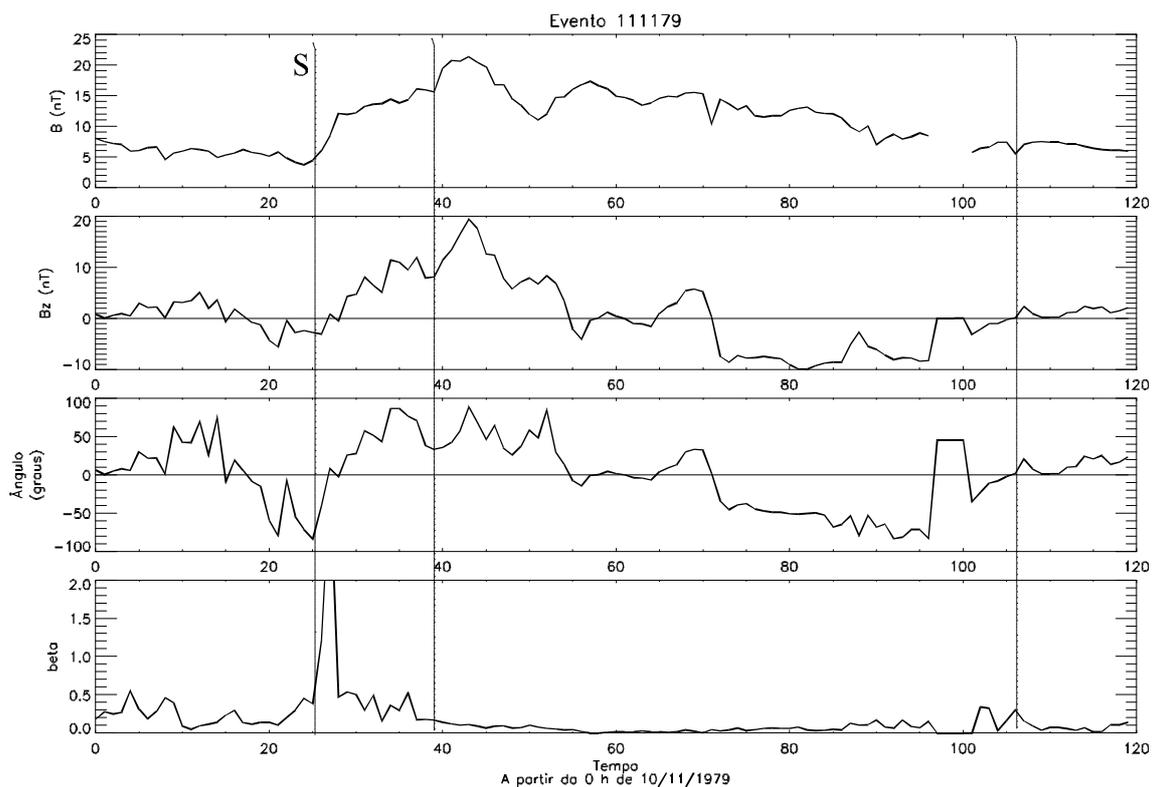


Fig. 4.6 - Variações temporais do campo magnético, da componente Z, do seu ângulo de rotação e do parâmetro beta, do evento observado pelo satélite ISEE-3, em 11/11/1979.

Os dois eventos ocorridos em 07/01/1979 e 11/11/1979 foram os eventos mais notáveis dos identificados na Tabela 4.2, isto é, dos 13 possíveis candidatos a Nuvens Magnéticas identificados para esta Dissertação. A pesquisa bibliográfica, realizada na Literatura Especializada, não nos apresentou nenhum estudo detalhado sobre estes dois eventos, exceto a identificação dos fluxos bidirecionais publicados por Gosling (1987).

As variações temporais dos parâmetros físicos de uma Ejeção, Não Nuvem Magnética observada pelo satélite ISEE-3 em 29 de Março de 1979, utilizada no Sub-Grupo B de Não Nuvens da Tabela 4.3, são apresentadas na Figura 4.7. Estão indicados, de cima para baixo, os diagramas das variações temporais dos seguintes parâmetros: temperatura de prótons; velocidade; densidade numérica; componente B_y do campo magnético; componente B_z do campo magnético; intensidade do campo magnético; índice Dst. A área escura destacada na Figura 4.7 representa um evento de fluxo bidirecional de

elétrons com energia ≥ 80 eV, identificado por Gosling et al. (1987), que nos leva a concluir a possível existência de uma estrutura de campo magnético fechado. As variações abruptas dos parâmetros apresentados na Figura 4.7 levam-nos a concluir a existência da presença de uma onda de choque dianteira. As variações do campo magnético nos revelam uma estrutura bastante complexa, apresentando flutuações intensas nas componentes B_y e B_z logo após a onda de choque, suavizando um pouco na região do evento bidirecional. A estrutura apresenta campo magnético na direção Sul em várias etapas, levando o índice Dst a valores próximos a -100 nT.

No evento observado pelo satélite ISEE-3, em 29/03/1979, Figura 4.8, a posição do choque está representada pela linha vertical “S”. O valor do parâmetro beta na região onde ocorre o fluxo bidirecional, indicado pelas duas linhas paralelas na Figura 4.8, foi alto, atingindo $\beta \sim 4$.

A análise dos parâmetros direção do campo magnético e beta nos leva a acreditar que este não é um evento que se caracteriza como uma Nuvem Magnética.

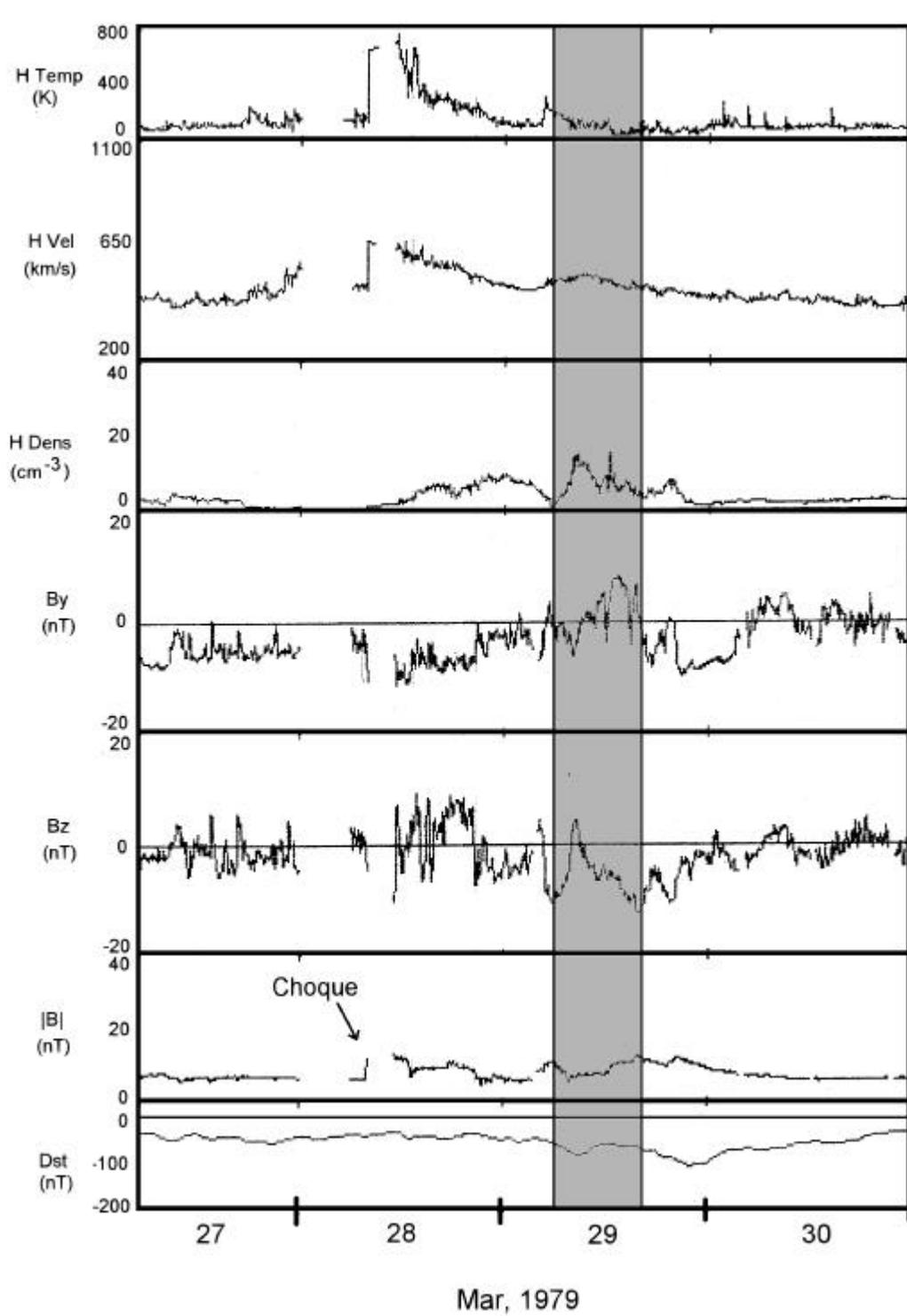


Fig. 4.7 – Variações temporais dos parâmetro físicos de uma estrutura do Meio Interplanetário – Não Nuvem Magnética, observada pelo satélite ISEE-3 em 29 de Março de 1979.

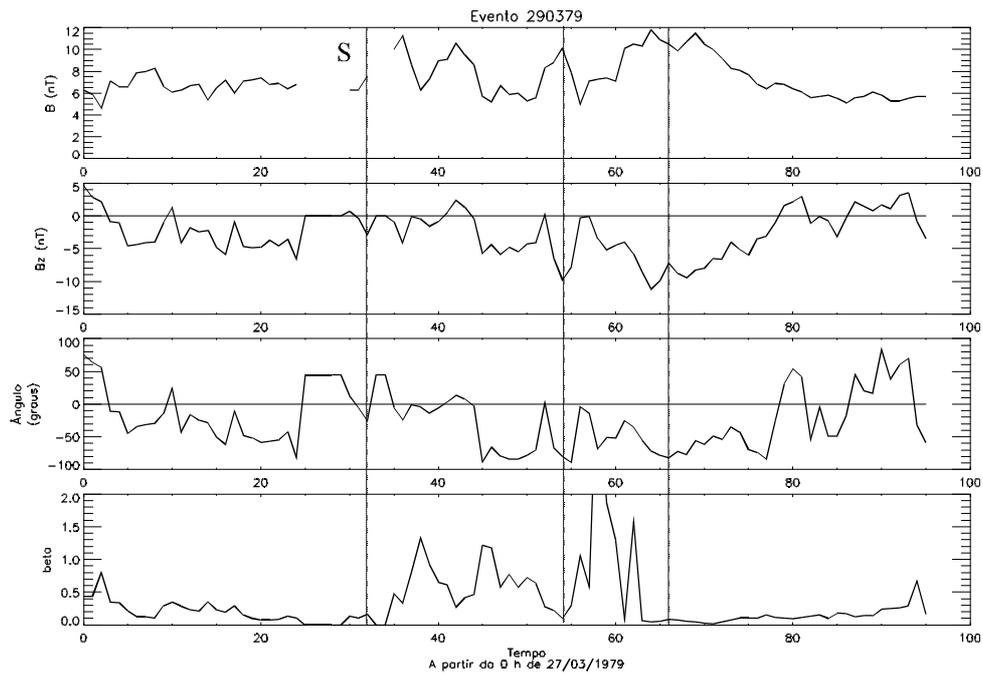


Fig. 4.8 - Variações temporais do campo magnético, da componente Z, do seu ângulo de rotação e do parâmetro beta, do evento observado pelo satélite ISEE-3, em 29/03/1979.

A análise dos dados apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8 permite-nos inferir que estamos tratando de uma ejeção não identificada como sendo uma Nuvem Magnética. O evento 29/03/1979 nos permite ilustrar o conjunto de 23 ejeções não caracterizadas como Nuvens Magnéticas no Meio Interplanetário do Grupo 2, Sub-Grupo B.

Os eventos do Grupo 2 – Sub-Grupo B são bastante complexos e provavelmente há várias estruturas diferentes neste conjunto de Ejeções. Algumas delas podem ser Nuvens Magnéticas cuja posição relativa ao satélite medidor era pouco favorável a sua identificação, como mostrado na Figura 3.8, Capítulo 3. Identificá-las é um trabalho complexo, mas muito interessante e sugerimos como trabalho futuro este tipo de estudo.

4.3 MÉTODO DE ANÁLISE E RESULTADOS OBTIDOS DA RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE NUVENS MAGNÉTICAS E SEU CAMPO MAGNÉTICO INTRÍNSECO

Para estudar a relação entre a velocidade de propagação de Eventos - Nuvens Magnéticas, e o valor absoluto de seu campo magnético interno, tomou-se o valor de pico da velocidade e do campo magnético interno de cada um dos eventos listados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3. Foram elaborados os diagramas Pico da Velocidade versus Pico do Campo Magnético Interno, para os parâmetros obtidos dos eventos selecionados nas tabelas mencionadas. Estes dois parâmetros são importantes porque estão relacionados ao Campo Elétrico Interplanetário ($\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B}_s$) responsável pelo processo de transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera Terrestre durante as Tempestades Magnéticas.

Os valores de pico da velocidade versus os valores de pico do campo magnético interno dos 17 eventos de Nuvens Magnéticas caracterizados como Nuvens Magnéticas listadas na Tabela 4.1, são apresentados na Figura 4.9.

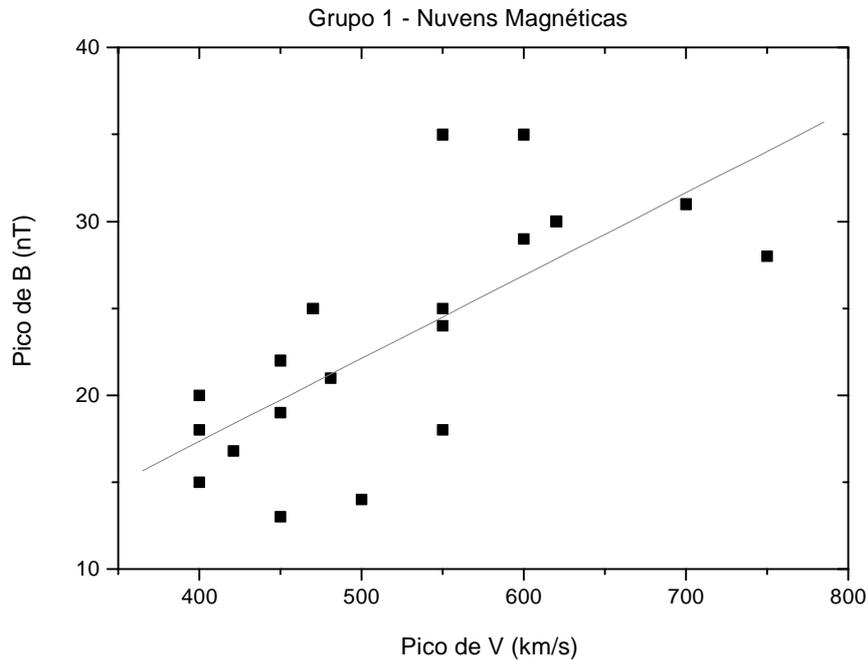


Fig. 4.9 - Pico do valor da velocidade versus pico do valor do campo magnético interno de Eventos - Nuvens Magnéticas, Grupo 1, listados na Tabela 4.1.

O resultado de uma regressão linear dos pontos diagramados na Figura 4.9, apresentando um coeficiente de correlação linear de 0,70, está indicado na Figura 4.9 pela reta, definida pela equação:

$$B_{pico} = 0,047 \cdot V_{pico} - 1,7 \quad (4.1)$$

Esta correlação pode ser considerada como uma técnica indireta para conhecer o valor aproximado do campo magnético interno de Nuvens Magnéticas, através de medidas de suas velocidades.

Os valores de pico da velocidade e campo magnético interno obtidos da análise dos eventos do Grupo 2 – Sub-Grupo A, candidatos a Nuvens Magnéticas, identificados no

ano de 1979 e listados na Tabela 4.2, estão diagramados na Figura 4.10 de forma similar à efetuada para os valores listados na Tabela 4.1. A regressão linear para este conjunto de pontos apresenta coeficiente de correlação igual a 0,73 e está representada na Figura 4.10 pela linha reta, definida pela equação:

$$B_{pico} = 0,065 \cdot V_{pico} - 15,7 \quad (4.2)$$

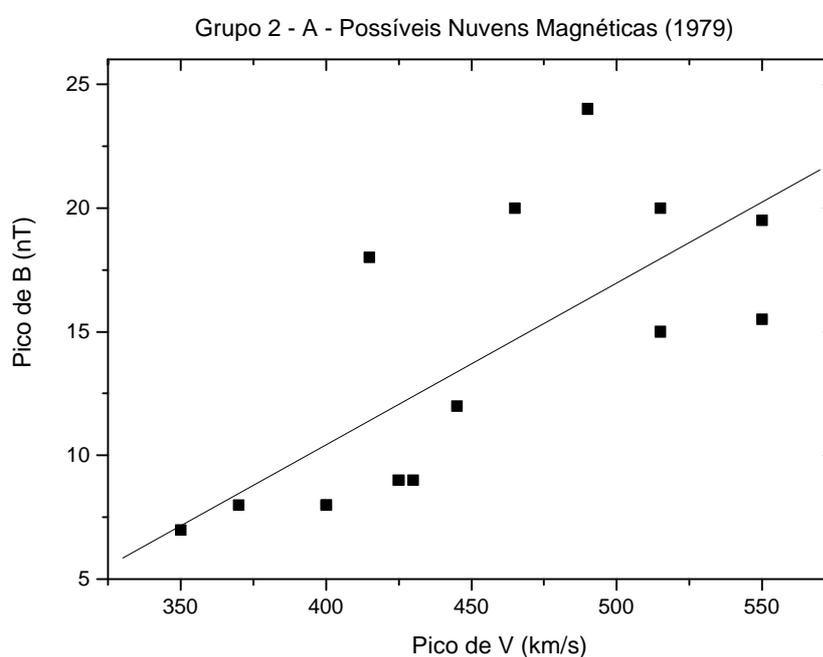


Fig. 4.10 - Pico do valor da velocidade versus pico do valor do campo magnético interno de eventos - candidatas a Nuvens Magnéticas, Grupo 2, Sub-Grupo A, listados na Tabela 4.2.

O conjunto de Eventos do Grupo 1 se refere a Tempestades Magnéticas mais intensas que o conjunto de Eventos do Grupo 2-A. Por esta razão, o intervalo de valores do campo magnético e da velocidade dos eventos é maior na Figura 4.9. As regressões lineares dos dois conjuntos apresentam algumas diferenças, principalmente devido a este fato.

Para podermos analisar os dois grupos juntos, precisamos compatibilizar os valores da Figura 4.10, extraindo os pontos com valores mais baixos, que segundo o critério de Gonzalez e Tsurutani (1987) não causariam Tempestades Magnéticas intensas (Seção 3.4.2). Os valores de pico da velocidade e campo magnético interno obtidos da análise dos eventos da combinação dos grupos: Grupo 1 – Nuvens Magnéticas e Grupo 2 – Sub-Grupo A - candidatos a Nuvens Magnéticas, excluídos os pontos de valores mais baixos, identificados no ano de 1979, estão diagramados na Figura 4.11. A regressão linear para este conjunto de pontos apresenta coeficiente de correlação igual a 0,66 e está representada na Figura 4.11 pela linha reta, definida pela equação:

$$B_{pico} = 0,050 \cdot V_{pico} - 4,6 \quad (4.3)$$

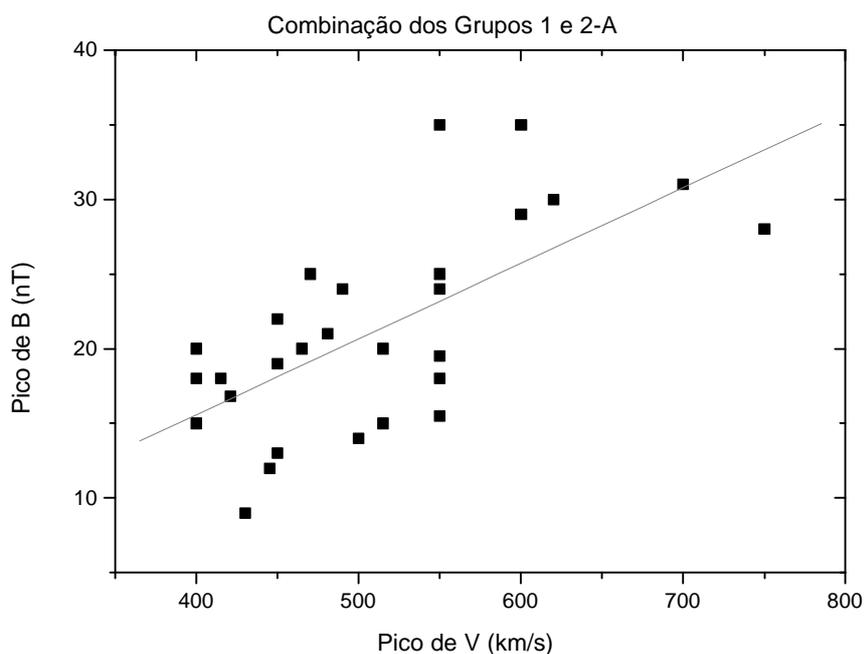


Fig. 4.11 - Pico do valor da velocidade versus pico do valor do campo magnético interno da combinação dos grupos: Grupo 1 – Nuvens Magnéticas e Grupo 2 – Sub-Grupo A - candidatos a Nuvens Magnéticas, identificados no ano de 1979 e listados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

É importante ressaltar que os picos dos valores do campo magnético e da velocidade são caracterizações preliminares importantes acerca da estrutura global do campo magnético e da velocidade das Nuvens Magnéticas, uma vez que apresentam estruturas internas de campo magnético altamente ordenadas.

Para o Grupo 2 – Sub-Grupo B, dos Eventos Interplanetários Não Nuvens Magnéticas listados na Tabela 4.3, a análise dos valores de pico da velocidade e do campo magnético estão diagramados na Figura 4.12. O espalhamento dos pontos não permite uma correlação linear, indicando uma aleatoriedade dos dados.

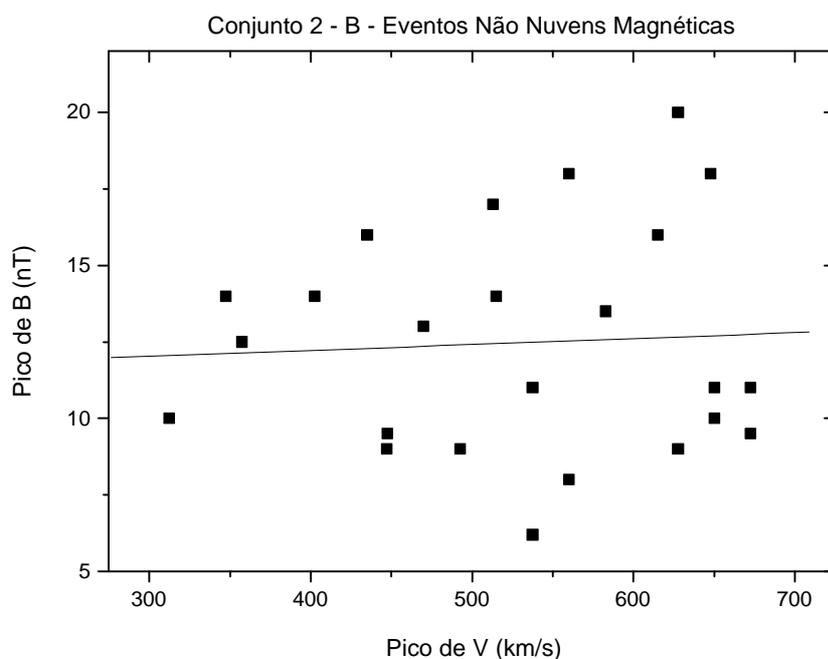


Fig. 4.12 - Pico do valor da velocidade versus pico do valor do campo magnético interno do Grupo 2 – Sub-Grupo B, dos Eventos Interplanetários Não Nuvens Magnéticas listados na Tabela 4.3.

A análise e interpretação dos resultados obtidos neste Capítulo permite-nos efetuar as seguintes considerações gerais que apresentamos e discutimos a seguir.

Em primeiro lugar, nos foi permitido estabelecer a relação empírica: Nuvens Magnéticas que possuem maior velocidade de propagação apresentam maior valor de seu campo magnético interno. Os dois fatores, velocidade e campo magnético, contribuem para a intensificação do Campo Elétrico Interplanetário, $\vec{E} = \vec{V} \times \vec{B}_s$, que sabe-se ser responsável pela transferência de energia do Vento Solar para a Magnetosfera Terrestre durante a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas.

Para os eventos do Grupo 2 – Sub-Grupo B, não identificados como Nuvens Magnéticas e listados na Tabela 4.3, não observamos nenhuma correlação significativa entre velocidade de propagação e valor do campo magnético interno.

As causas físicas da relação V - B , para Nuvens Magnéticas, ainda não são conhecidas. A relação V - B pode ser um indicativo da existência de um mecanismo de geração e aceleração distinto para Nuvens Magnéticas em comparação às demais Ejeções observadas no Meio Interplanetário. A princípio, todas estas estruturas vistas no Meio Interplanetário são originadas em Ejeções de Massa Coronal Solares - EMCS. No entanto, uma completa ligação entre estruturas como Nuvens Magnéticas Inteplanetárias e EMCS ainda não foi estabelecida.

Através de sensoriamento remoto espacial, utilizando como técnica seqüências de imagens de coronógrafos, como o do satélite SOHO, situado no ponto Lagrangeano L1, é possível calcular a velocidade de EMCS. Isto, através de uma regressão algébrica da Equação 4.1 para as proximidades do Sol, permitirá estimar o valor aproximado de seu campo magnético intrínseco. Dessa maneira, poder-se-á fazer não apenas um alerta da futura chegada de uma Estrutura Geoeffectiva na Terra, como também uma estimativa da intensidade da Tempestade Magnética que ela poderá causar. Este resultado acrescenta uma ferramenta muito importante para a previsão do Clima Espacial, podendo fornecer estimativas de geoeffectividade de EMCS com aproximadamente 2 a 3 dias de antecedência, que é o tempo aproximado da cobertura da distância entre o Sol e a Terra.

Esse fato pode ser contrastado com as previsões limitadas de aproximadamente 1h feitas atualmente, a partir de observações de satélites no ponto Lagrangeano L1.

Outro possível fator contribuindo para a relação $V-B$, entre a velocidade e o campo magnético de Nuvens Magnéticas, é a interação entre a estrutura e o meio circunvizinho. Como já mencionado no Capítulo anterior, Seção 3.3.2, estruturas que apresentam altas velocidades podem apresentar ondas de choque frontais, sendo possível a ocorrência de compressão da estrutura na parte frontal e conseqüente aumento do campo magnético, devido ao “empilhamento” das linhas de campo magnético. Como as Nuvens Magnéticas apresentam configuração de campo magnético bastante ordenada, este efeito será mais eficiente nas Nuvens Magnéticas do que em outras ejeções.

Nuvens Magnéticas, cujo campo magnético apresentava seu valor máximo na parte final de sua estrutura, também foram observadas, indicando a presença de um outro tipo de interação diferente, como por exemplo a aproximação de um Feixe de Alta Velocidade vindo por trás.

Estas idéias levam a uma outra questão de importância relevante acerca de como seja a interação entre Nuvens Magnéticas e o meio circunvizinho. Neste Capítulo será apresentada posteriormente uma abordagem desta questão através do cálculo das Pressões Estática e Dinâmica destas estruturas.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11, e 4.12 foram publicados em Literatura Especializadas durante o andamento dos trabalhos de análise dos dados, em conjunto com uma discussão de resultados teóricos de simulações que confirmaram a relação entre a velocidade e o campo magnético de Nuvens Magnéticas, aqui referenciado como Gonzalez et al.(1998a). Marubashi (1999) posteriormente realizou estudo semelhante acerca da velocidade e do campo magnético com outros eventos e obteve resultados semelhantes.

4.4 OTIMIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM DE NUVENS MAGNÉTICAS: ANÁLISE E DISCUSSÃO DA RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS DE NUVENS MAGNÉTICAS E DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

A metodologia para otimização da amostragem de Nuvens Magnéticas estudadas nesta Dissertação (isto é: Grupo 1, Grupo 2 – Sub-Grupos A e B) foi estabelecer o critério de considerar somente Eventos Interplanetários possuidores de parâmetros físicos claros e que caracterizam, com alto grau de confiabilidade, a natureza de que o evento trata-se de uma Nuvem Magnética. Portanto, um novo grupo foi criado, o Grupo 3, que é constituído pelos eventos Nuvens Magnéticas listados na Tabela 4.1, com a exceção de um único evento (o ocorrido em 13 de Abril de 1981, por não apresentar um conjunto completo de dados), mais o evento ocorrido em 07 de Janeiro de 1979 (membro do Grupo 2 – Sub-Grupo A, Tabela 4.2). O Grupo 3, com um total de 18 eventos interplanetários, é caracterizados pelo alto grau de confiabilidade das características de Nuvens Magnéticas e estão apresentados na listagem da Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – GRUPO 3 - NUVENS MAGNÉTICAS COM ALTO GRAU DE CONFIABILIDADE

DATA	GRUPO DE ORIGEM
14/01/1967	1
11/02/1969	1
01/04/1973	1
25/05/1975	1
11/11/1975	1
04/04/1979	1
25/04/1979	1
29/09/1978	1
21/02/1979	1
29/08/1979	1
18/09/1979	1
27/08/1978	1
19/12/1980	1
13/01/1988	1
18/12/1995	1
27/05/1996	1
09/01/1997	1
07/01/1979	2-A

Com o conjunto de eventos da Tabela 4.4 foi efetuada uma análise da relação entre Nuvens Magnéticas e Tempestades Geomagnéticas. As Nuvens Magnéticas do Grupo 3 foram divididas em dois sub-grupos: Sub-Grupo D - associadas a ondas de choque e portanto com velocidades altas, listadas na Tabela 4.5; Sub-Grupo E - não associadas a ondas de choque e portanto com velocidades baixas, listadas na Tabela 4.6.

No estudo dos Eventos do Meio Interplanetário do Grupo 3 - Nuvens Magnéticas, foram utilizados os critérios: análise detalhada da estrutura do campo magnético (visando identificar a rotação da componente Bz, dentro das Nuvens Magnéticas, listadas nas Tabelas 4.5 e 4.6, complementada pela análise das variações da componente Bz nas circunvizinhanças do evento); análise do desenvolvimento da fase principal das Tempestades Magnéticas associadas às Nuvens Magnéticas (a fim de identificar a ocorrência do processo de desenvolvimento em duas etapas).

TABELA 4.5 – SUB-GRUPO D - NUVENS MAGNÉTICAS ASSOCIADAS A ONDAS DE CHOQUE

Data	Dst (nT)	Rotação da Componente Bz Interna	Desenvolvimento da Fase Principal da Tempestade Magnética
07/01/79	-100	SN	2 etapas
14/01/67	-160	SN	-
18/10/95	-127	SN	-
04/04/79	-202	SN	2 etapas
25/04/79	-149	SN	2 etapas
28/09/78	-224	SN	2 etapas
21/02/79	-107	SN	-
29/08/79	-140	SN	2 etapas
18/12/80	-240	SN	-
14/01/88	-147	NS	-
26/08/78	-226	-	-
09/01/97	-78	SN	-
11/02/69	-136	SN	2 etapas

TABELA 4.6 – SUB-GRUPO E - NUVENS NÃO ASSOCIADAS A ONDAS DE CHOQUE.

Data	Dst (nT)	Rotação da Componente Bz Interna	Desenvolvimento da Fase Principal da Tempestade Magnética
17/11/75	-89	-	-
25/05/75	-37	SN	-
01/04/73	-211	NS	2 etapas
18/09/79	-158	SN	2 etapas
27/05/96	-33	SN	-

A partir da análise da Tabela 4.5, concluímos que as Nuvens Magnéticas associadas a ondas de choque estão relacionadas com a ocorrência de Tempestades Magnéticas Intensas, a exceção de uma, ocorrida em 09 de Janeiro de 1997. A observação da fase principal das Tempestades Magnéticas associadas aos Eventos da Tabela 4.5 indica que seis das treze Tempestades apresentaram o desenvolvimento da fase principal em duas etapas, representando 46% do total de Tempestades, em boa concordância com os resultados obtidos por Kamide et al. (1998a). A Nuvem Magnética do evento ocorrido

em 26 de Agosto de 1978 apresentava-se bastante inclinada em relação a Eclíptica, não apresentando rotação na componente B_z do campo magnético. Estava porém associada a uma Tempestade Intensa devido ao fato de seu campo magnético axial estar na direção $-Z$.

A partir da análise da Tabela 4.6 concluímos que, dos cinco Eventos - Nuvens Magnéticas não associadas a ondas de choque, três causaram Tempestades Geomagnéticas Fracas ou Moderadas ($Dst > -50$ nT e $-50\text{nT} > Dst > -100\text{nT}$), dois eventos causaram Tempestade Magnéticas Intensas (18 de Setembro de 1979, com $Dst = -158\text{nT}$ e 01 de Abril de 1973, com $Dst = -211\text{nT}$). Nestes dois últimos eventos, observou-se uma pré-intensificação do campo magnético na direção Sul à frente da estrutura, levando a ocorrência de uma Tempestade Magnética com a fase principal se desenvolvendo em duas etapas. Desta forma, o efeito do campo magnético interno da Nuvem Magnética foi intensificado pela configuração de campo magnético Sul pré-existente.

Para analisarmos com mais detalhes os eventos da Tabela 4.6 ocorridos em 18 de Setembro de 1979 e 01 de Abril de 1973, apresentamos nas Figuras 4.13 e 4.14, respectivamente, diagramas das variações temporais das médias horárias da intensidade do campo magnético, da componente B_z , e do índice Dst .

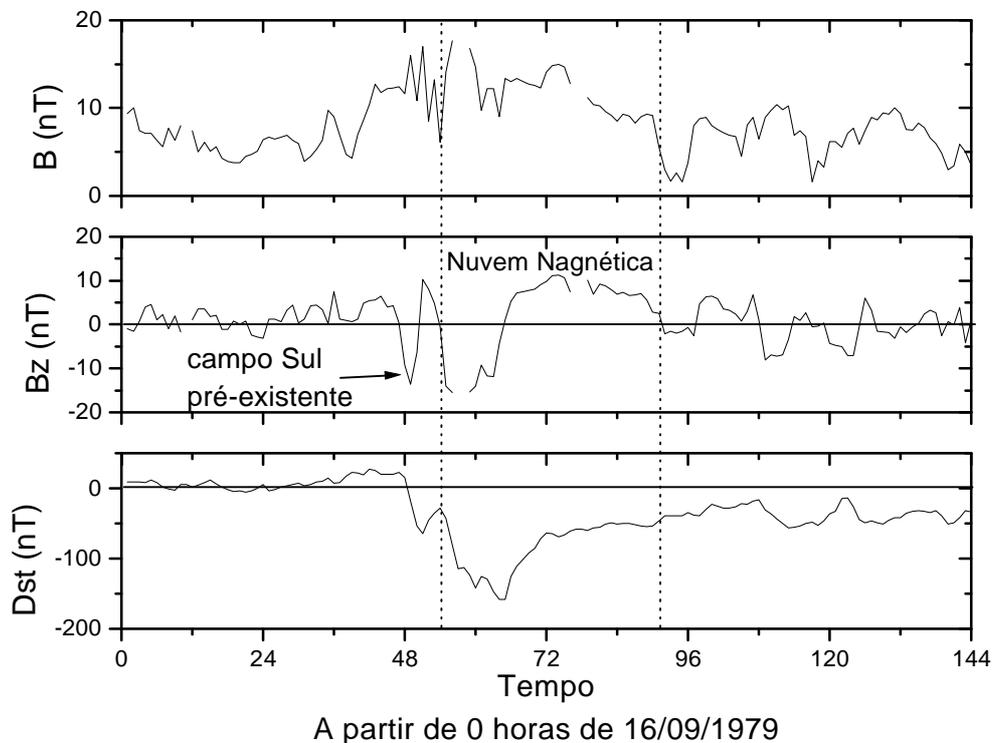


Fig. 4.13 - Variações Temporais das médias horárias da intensidade do campo magnético, da componente Bz do campo magnético, e do índice Dst do evento ocorrido em 18 de Setembro de 1979.

No Evento Nuvem Magnética ocorrido no dia 18 de Setembro de 1979, cujas variações temporais dos parâmetros são mostradas na Figura 4.13, a rotação da componente Bz do campo magnético se dá de Sul para Norte. Há um aumento da densidade na região logo a frente da Nuvem Magnética, atingindo o valor de mais de 30 partículas/cm³, simultaneamente acompanhada de um aumento do campo magnético total, atingindo 16 nT. Observamos a existência de um campo Sul, $-B_z$, pré-existente, seguido de uma rápida rotação para a direção Norte, permanecendo assim por aproximadamente 3 horas, antes da chegada da Nuvem Magnética. Esta configuração constitui uma dupla estrutura de campo magnético na direção Sul e está associada a uma Tempestade Magnética cuja fase principal se desenvolveu em duas etapas.

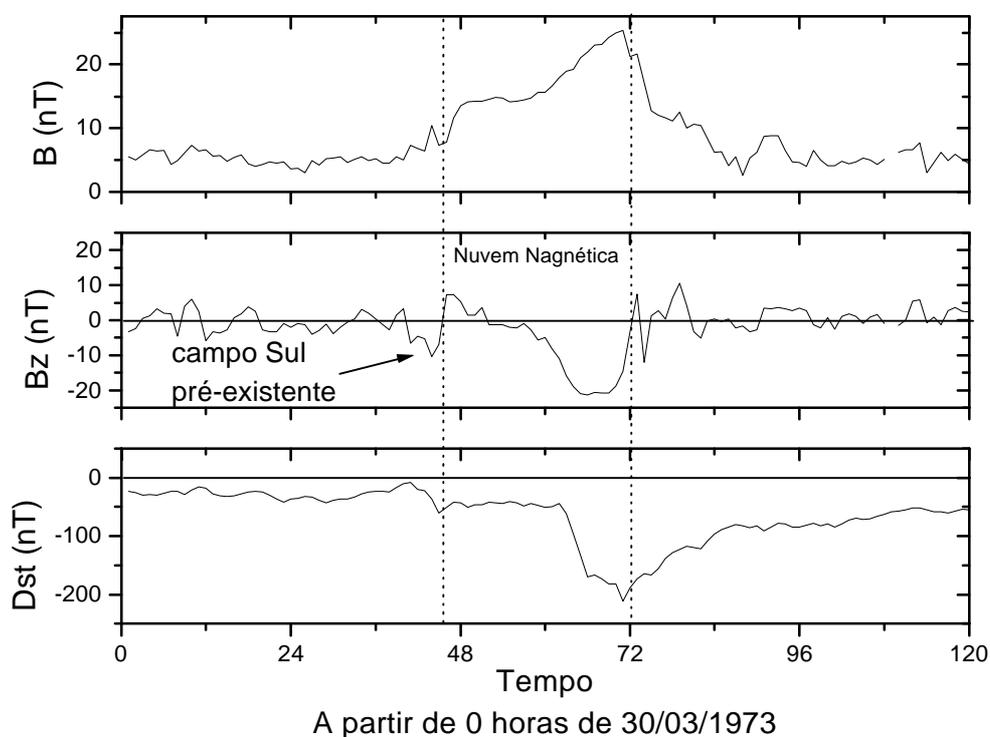


Fig. 4.14 - Variações Temporais das médias horárias da intensidade do campo magnético, da componente B_z do campo magnético, e do índice Dst do evento ocorrido em 01 de Abril de 1973.

No Evento Nuvem Magnética ocorrido no dia 01 de Abril de 1973, cujos parâmetros físicos estão diagramados na Figura 4.14, pode-se observar que a rotação da componente B_z do campo magnético é de Norte para Sul. Ocorre um aumento da intensidade do campo magnético, na região logo a frente da Nuvem Magnética, atingindo 10 nT, que leva o índice Dst a ~ -50 nT. Após a passagem da parte Norte do campo magnético interno da Nuvem Magnética é observada a segunda intensificação da Tempestade Magnética, que também se subdivide em duas etapas, levando o valor do índice Dst a -170 nT, e em seguida a -211 nT.

Os resultados das análises e interpretações do comportamento e natureza da variações temporais dos parâmetros físicos das Nuvens Magnéticas que constituem o Grupo 3, nos permitem sugerir que Eventos Nuvens Magnéticas com maior velocidade de propagação estão relacionados a Tempestades Magnéticas Intensas e Eventos Nuvens Magnéticas com menor velocidade de propagação estão relacionados a Tempestades Magnéticas Fracas e Moderadas. No entanto, configurações especiais de campo magnético podem associar um Evento Nuvem Magnética lento a uma Tempestade Magnética Intensa. Similarmente, as Nuvens Magnéticas que interagem com Feixes de Alta Velocidade podem causar Tempestades Magnéticas Intensas. Estas duas últimas importantes observações reveladas por nosso estudo ressaltam um aspecto diferente do abordado na Seção 4.1, no que se refere a previsão do Clima Espacial, isto é, apontando que Tempestades Magnéticas podem ter origens nos Processos Interplanetárias e não exclusivamente nas Fontes Solares. Gonzalez et al. (1998b), analisando Tempestades Magnéticas muito intensas ocorridas desde 1957 até a presente data, apontaram como possíveis causas interplanetárias destes eventos geomagnéticos as Nuvens Magnéticas e suas estruturas circinvizinhas, produzindo múltiplas estruturas de campo magnético Bs.

4.5 INTERAÇÃO DE NUVENS MAGNÉTICAS COM O MEIO INTERPLANETÁRIO CIRCUNVIZINHO

Para melhor compreender as interações Nuvens-Meio, efetuamos um estudo da interação de Nuvens Magnéticas com o Meio Interplanetário circunvizinho com os eventos do Grupo 3, listados na Tabela 4.4. Foram analisadas as variações temporais das médias horárias dos parâmetros de plasma e campo magnético fornecidos por King (1998). O cálculo das grandezas físicas foi efetuado utilizando-se rotinas escritas em linguagem IDL, disponível no Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial do INPE.

Para melhor visualizarmos a natureza da estrutura de pressão dos Eventos Nuvens Magnéticas e das Estruturas Circunvizinhas, dividimos qualquer dos eventos do Grupo 3, listados na Tabela 4.4, em quatro regiões características que são ilustradas no diagrama da Figura 4.15.

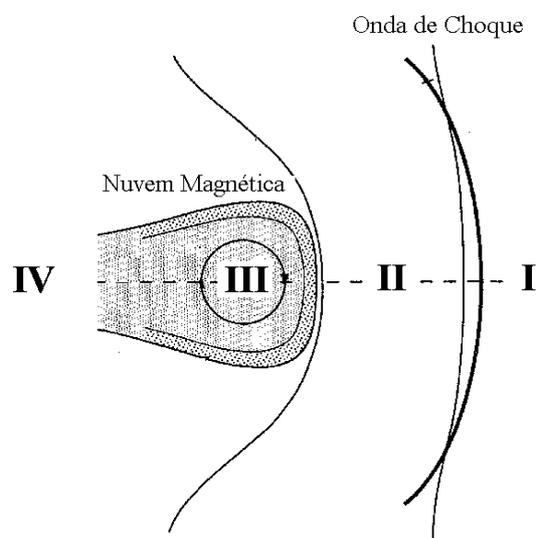


Fig. 4.15 - I – Região frontal

II – Região da lâmina entre a nuvem e a onda de choque (se houver)

III – Região interna da Nuvem Magnética

IV – Região logo atrás da Nuvem Magnética

4.5.1 Pressão Estática Total ao Longo dos Eventos – Nuvens Magnéticas

A Pressão Estática Total é dada pela Equação 2.8, $P = p' + B^2/8\mu_0$, onde $p' = NkT$ é a Pressão Térmica devida aos prótons e $B^2/8\mu_0$ é a Pressão Magnética devida ao campo magnético. As variações temporais da Pressão Estática Total de seis Eventos - Nuvens Magnéticas associados a ondas de choque, pertencentes ao Grupo 3, foram diagramados como exemplos ilustrativos na Figura 4.16. Nessa figura indicamos as quatro regiões definidas na Figura 4.15, para melhor visualização e compreensão dos processos físicos do Evento.

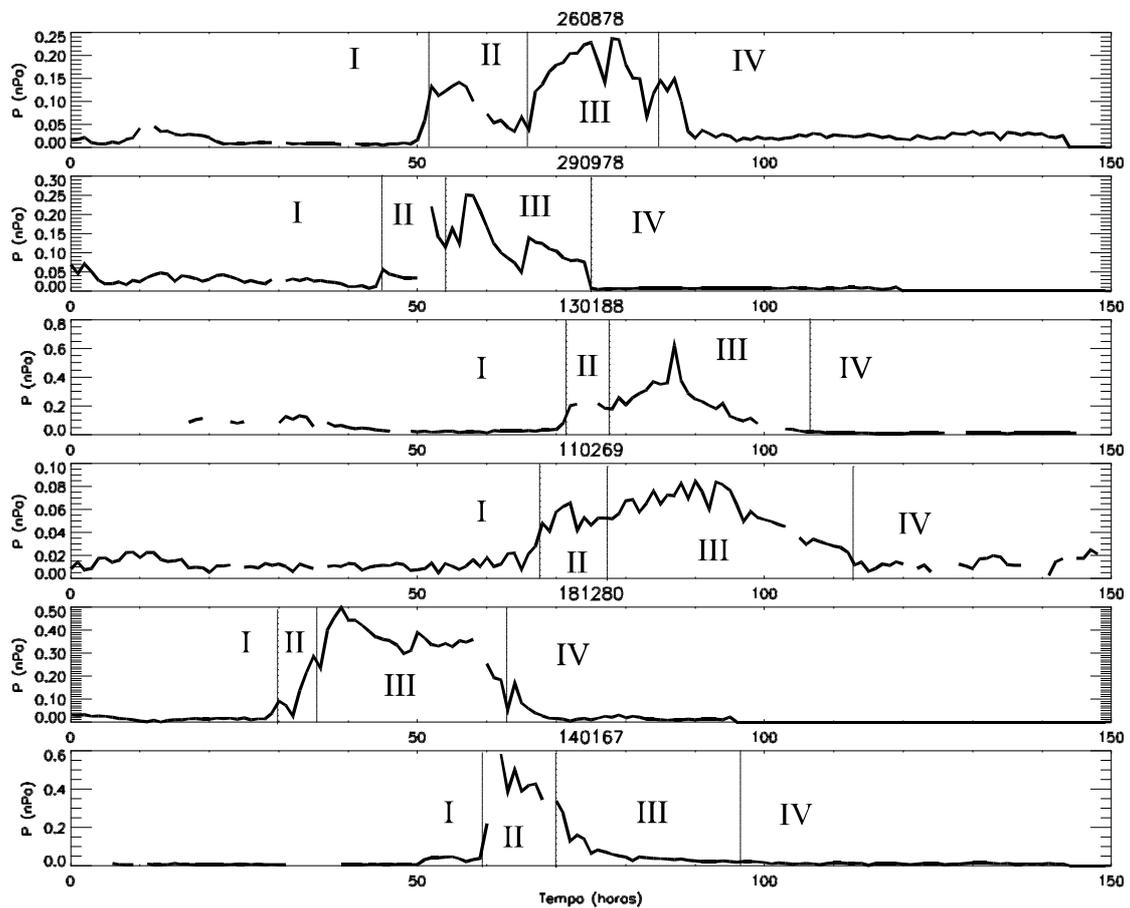


Fig. 4.16 - Variações temporais da Pressão Estática Total de seis Eventos Nuvens Magnéticas ocorridos em 26 de Agosto de 1978, 29 de Setembro de 1978, 13 de Janeiro de 1988, 11 de Fevereiro de 1969, 18 de Dezembro de 1980 e 14 de Janeiro de 1967.

A análise da Figura 4.16 leva-nos a estabelecer que a Pressão Estática Total na Região II é menor ou igual a Pressão Estática Total dentro da Nuvem Magnética. Esta interpretação é um importante fato e está de acordo com a hipótese de que o choque e a Região II são formados pela propagação da Nuvem Magnética, fortalecendo a idéia de que a Nuvem Magnética exerceu uma Pressão Estática na Região II, e que essa região reagiu no sentido de equilibrá-la.

Para o evento ocorrido em 26 de Agosto de 1978, as variações temporais da Pressão Magnética, Pressão Térmica, Pressão Estática Total e parâmetro beta foram diagramados separadamente na Figura 4.17, também ilustrado no painel superior da Figura 4.16.

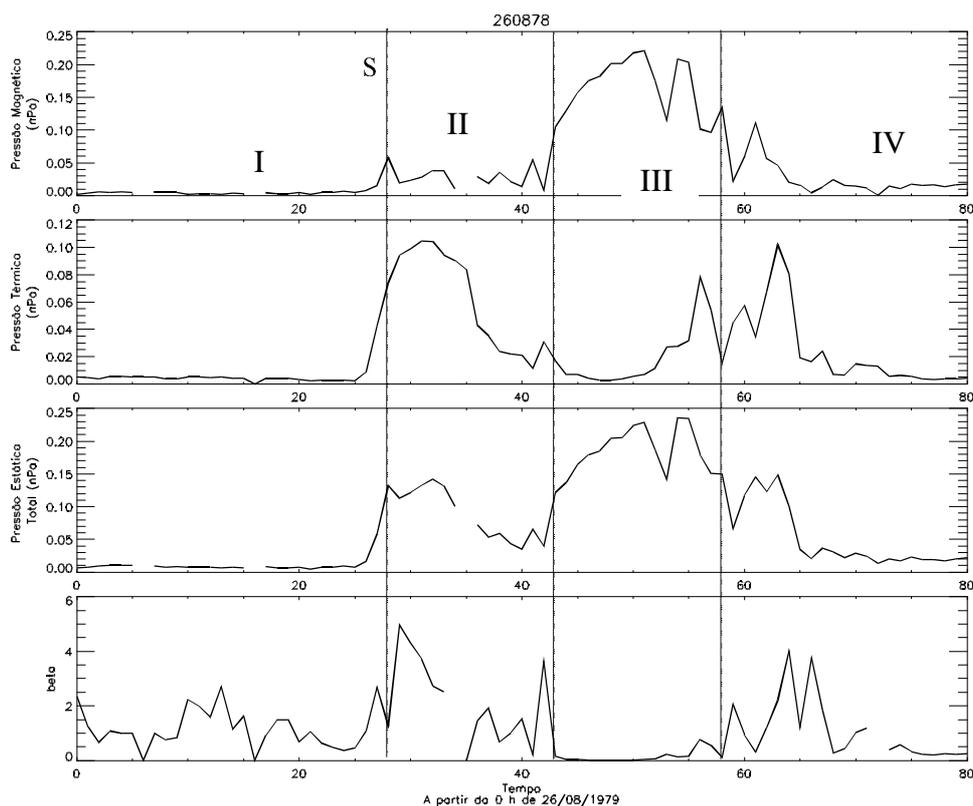


Fig. 4.17 - Variação temporal da Pressão Magnética, da Pressão Térmica, da Pressão Estática Total e do parâmetro beta do Evento Nuvem Magnética ocorrido em 26/08/1978.

Da análise e interpretação da Figura 4.17 podemos inferir com segurança que a Pressão Magnética predomina no interior da Nuvem Magnética, enquanto a Pressão Térmica predomina na Região II. A medida que se desloca, a Nuvem Magnética exerce uma Pressão Magnética sobre a Região II, que por sua vez reage no sentido de compensá-la com um aumento de temperatura e densidade, elevando a Pressão Térmica. Podemos concluir que há um balanço de pressão entre estas duas regiões. Para determinar a importância relativa entre a Pressão Térmica e a Pressão Magnética em cada uma das regiões ilustradas na Figura 4.17, computamos a variação temporal do parâmetro beta, diagramado no último painel inferior da Figura 4.17.

Para o evento ocorrido em 29 de Setembro de 1978 as variações temporais da Pressão Magnética, da Pressão Térmica, da Pressão Estática Total e do parâmetro beta foram diagramados na Figura 4.18, , também ilustrado no segundo painel da Figura 4.16.

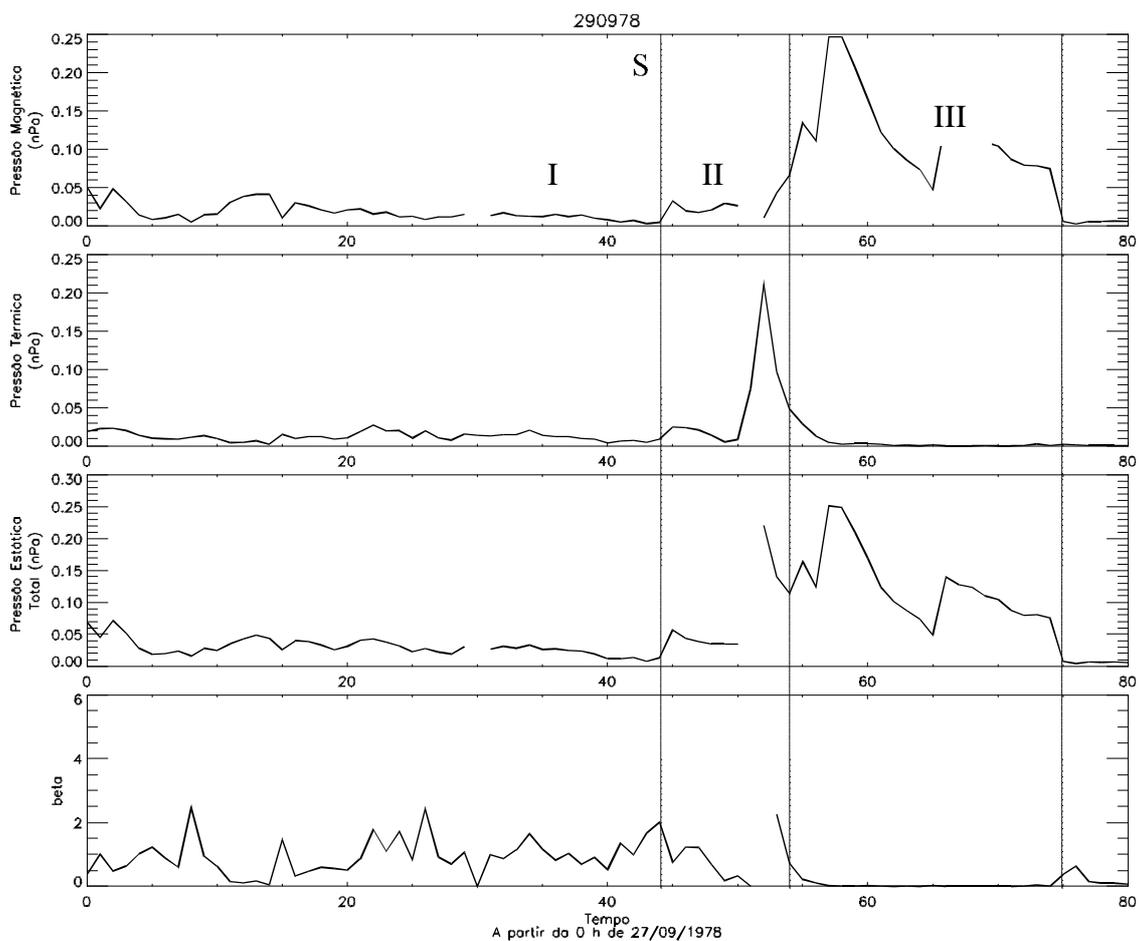


Fig. 4.18 - Variação temporal da Pressão Magnética, da Pressão Térmica, da Pressão Estática Total e do parâmetro beta do Evento Nuvem Magnética ocorrido em 29/09/1978.

Da análise e interpretação da Figura 4.18 observamos que há um pico de Pressão Térmica na Região II, que atinge um valor próximo ao valor da Pressão Magnética interna da Nuvem Magnética. O valor de beta neste pico foi próximo a 2, em contraste com os baixos valores dentro da nuvem, em torno de 0,1.

Este estudo foi feito para todos os eventos do Grupo 3 que apresentavam bom conjunto de dados, isto é, sem muitas lacunas, e verificou-se comportamento semelhante em muitos deles. A Tabela 4.7 apresenta os valores médios da Pressão Térmica (P_k), Pressão Magnética (P_b) e Pressão Estática Total (P) nas regiões II e III, calculados para todos os eventos do Grupo 3 que apresentavam dados com boa qualidade, ou seja, sem

muitas lacunas. Para o cálculo do valor médio das pressões na interface, adotamos o seguinte procedimento: calculamos as variações temporais das Pressões Térmica e Magnética ao longo de todos os eventos; calculamos a média de cada uma das pressões 10 horas antes da interface II-III e 10 horas depois dessa interface e anotamos os valores na Tabela 4.7.

TABELA 4.7 – PRESSÃO TÉRMICA – P_k , PRESSÃO MAGNÉTICA – P_b , PRESSÃO ESTÁTICA TOTAL– P , NA INTERFACE II-III PARA UM CONJUNTO DE 12 NUVENS MAGNÉTICAS

Data do Evento	Choque	Região II			Região III		
		P_k (nPa)	P_b (nPa)	P (nPa)	P_k (nPa)	P_b (nPa)	P (nPa)
11/02/69	Sim	0.0065	0.0480	0.0545	0.0023	0.0663	0.0686
28/09/78	Sim	0.0397	0.0180	0.0577	0.0202	0.1443	0.1645
07/01/79	Sim	0.0047	0.0179	0.0226	0.0079	0.0505	0.0584
14/01/88	Sim	0.0890	0.1162	0.2052	0.0293	0.2360	0.2653
26/08/78	Sim	0.0456	0.0255	0.0711	0.0068	0.1768	0.1836
18/10/95	Sim	0.0474	0.0204	0.0678	0.0034	0.1636	0.1670
18/12/80	Sim	?	0.0888	?	0.0167	0.3868	0.4035
01/04/73	Não	0.0220	0.0182	0.0402	0.0026	0.0780	0.0806
17/11/75	Não	0.0072	0.0160	0.0232	0.0054	0.0296	0.0350
27/05/96	Não	0.0020	0.0022	0.0042	0.0254	0.0258	0.0512
25/05/75	Não	0.0059	0.0075	0.0134	0.0012	0.0347	0.0359
18/09/79	Não	0.0233	0.0610	0.0843	0.0104	0.0738	0.0842

Dos estudos, análises e interpretações do comportamento da Pressão Estática Total na interface II-III dos eventos mostrados na Tabela 4.7, podemos concluir que o valor da Pressão Estática Total na Região II pode atuar como um obstáculo para a Nuvem Magnética, provocando um aumento da intensidade de seu campo magnético interno, pelo processo de “empilhamento” das linhas de campo. Este processo poderia contribuir para a assimetria do perfil do campo magnético, às vezes observada em Nuvens

Magnéticas. Em 4 dos 12 eventos estudados, o valor da Pressão Estática Total na região II foi comparável ao valor da pressão na Região III. Nos demais eventos a pressão interna da Nuvem Magnética apresentava valor maior.

4.5.2 Pressão Total

No estudo da Seção anterior, as regiões em questão se moviam com velocidades relativas bem próximas umas das outras, ou seja, se moviam “juntas”. No entanto, em alguns casos se observa a presença de Feixes de Alta Velocidade nas vizinhanças de um Evento Nuvem Magnética. Alguns autores observaram uma correlação entre estes “eventos compostos”, do inglês *compound streams*, e a ocorrência de Tempestades Magnéticas. Citamos como exemplo os eventos descritos por Burlaga et al. (1987). Cane e Richardson (1997) propuseram que a Tempestade Magnética de 26 de novembro de 1978 foi causada pela interação entre um Feixe Corrotante e um Evento Não Nuvem Magnética. Bothmer e Schwenn (1995) apontaram a interação entre um Feixe de Alta Velocidade e a Nuvem Magnética ocorrida em 01 de Abril de 1973 como principal causa da Tempestade Magnética associada a este período.

Passamos a apresentar uma análise quantitativa da interação de uma Nuvem Magnética e um Feixe de Alta Velocidade através do cálculo da Pressão Total, ou seja: Pressão Térmica, Pressão Magnética e Pressão Dinâmica. A Pressão Dinâmica aparece devido a diferença de velocidade entre as duas estruturas e foi definida no Capítulo 2 como sendo dada por: $(1/2).N.m_p.V_R^2$, onde N é a densidade numérica de prótons, m_p é a massa do próton e V_R é a velocidade relativa entre as duas estruturas.

Para a interface entre a parte traseira da Nuvem Magnética de 27-28/08/1978 e um Feixe de Alta Velocidade, indicada pela linha vertical, são diagramados na Figura 4.19 as variações temporais do campo magnético, da velocidade, da componente B_y do campo magnético e, no último painel são apresentados dois casos: a Pressão Estática Total (linha pontilhadas) e a Pressão Total, incluindo a Pressão Dinâmica (linha cheia).

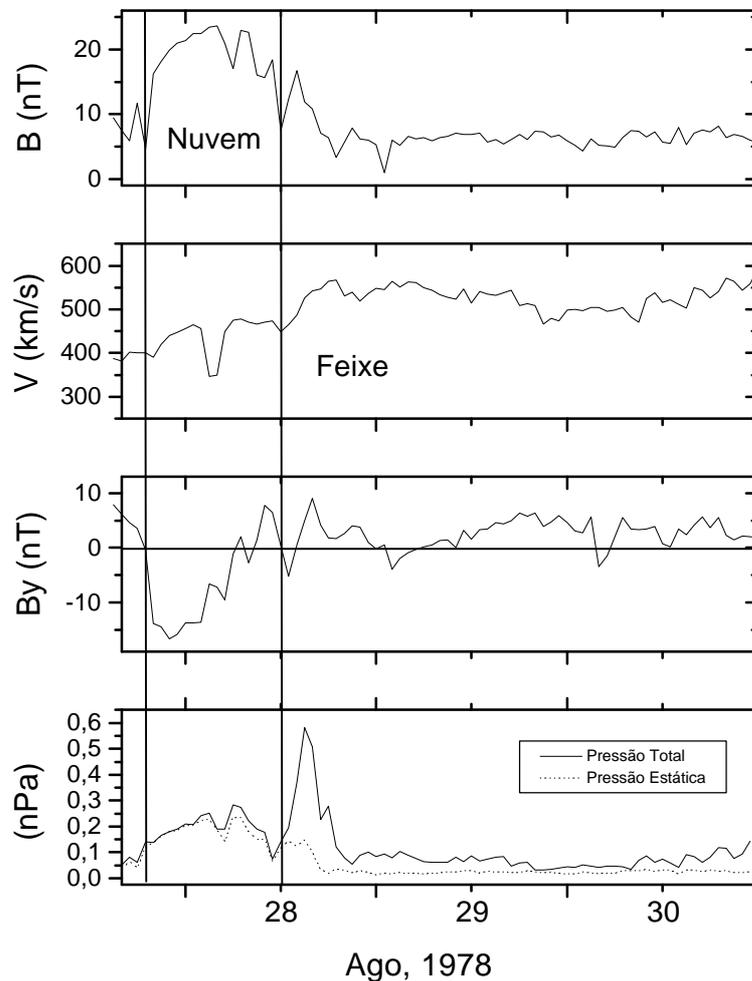


Fig. 4.19 - Variações temporais do campo magnético, da velocidade, da componente B_y do campo magnético, da Pressão Estática Total e da Pressão Total na interface entre uma Nuvem Magnética e um Feixe de Alta Velocidade, ocorridos em 28/08/1978.

Para calcular a pressão dinâmica ($1/2 Nm_p V_R^2$) precisamos determinar a velocidade relativa (V_R) entre o Feixe e a Nuvem Magnética. Para tanto tomamos a média da velocidade da Nuvem, que foi determinada ser $V = 429$ km/s, e mudamos para um sistema de referência movendo-se com esta velocidade, parado em relação à Nuvem. A Pressão Total apresentou um pico logo atrás da Nuvem, próximo à interface, atingindo o valor de aproximadamente 0,6 nPa. A comparação com a pressão da ordem de 0,25 nPa

no interior da Nuvem Magnética indica que o Feixe pode ter comprimido a Nuvem Magnética por trás. Sem a inclusão da Pressão Dinâmica, este pico se reduz significativamente para valores da ordem de 0,15 nPa, como pode ser visto na linha pontilhada da Figura 4.19. Esta Nuvem Magnética apresentava-se bastante inclinada em relação a Eclítica, tendo sido observada a rotação do campo magnético na direção Y, conforme o diagrama da Figura 4.19, de modo que seu campo axial estava na direção Sul. Este campo pode ter sido parcialmente intensificado pela interação com o feixe, influenciando a magnitude da Tempestade Magnética, que chegou a $Dst = -226$ nT.

Para o evento do dia 01 de Abril de 1973 efetuamos estudo similar ao apresentado na Figura 4.19 e os resultados das variações temporais estão diagramados na Figura 4.20. Nesta figura pode-se identificar a Nuvem Magnética entre as linhas verticais. Pode-se ver pelo diagrama da velocidade que, logo atrás da Nuvem, há um aumento considerável no valor da velocidade, indicando a presença de um Feixe de Alta Velocidade. Por ter apresentado maior velocidade que a Nuvem Magnética, o Feixe pode tê-la comprimido pela parte traseira. A Nuvem Magnética apresentou uma velocidade média de 449 km/s. A velocidade no Feixe começa com um valor comparável ao da Nuvem e se eleva até valores próximos a 600 km/s. Em função desta diferença de velocidade, a Pressão Total (Térmica, Magnética e Dinâmica) apresentou valor médio levemente maior no Feixe que na Nuvem, podendo ser visto na linha cheia do último painel da Figura 4.20. Se não levássemos em consideração a Pressão Dinâmica, a Pressão Total apresentaria valor médio inferior, podendo ser visto na linha pontilhada do último painel da Figura 4.20. Observando o valor da Pressão Total no lado interno traseiro da Nuvem Magnética, identificamos um aumento gradativo de seu valor, devido ao aumento da intensidade do campo magnético interno da Nuvem Magnética. Nota-se que o perfil da intensidade do campo magnético interno à Nuvem estava bastante assimétrico, apresentando seu valor máximo na parte traseira. Neste ponto o campo magnético estava direcionado para o Sul, levando a uma Tempestade Geomagnética intensa. Acreditamos que a Pressão Total exercida pelo feixe provocou uma compressão da Nuvem Magnética, intensificando seu campo magnético interno, e

consequentemente a componente B_z , levando a uma Tempestade Magnética Intensa, com $Dst = -211nT$.

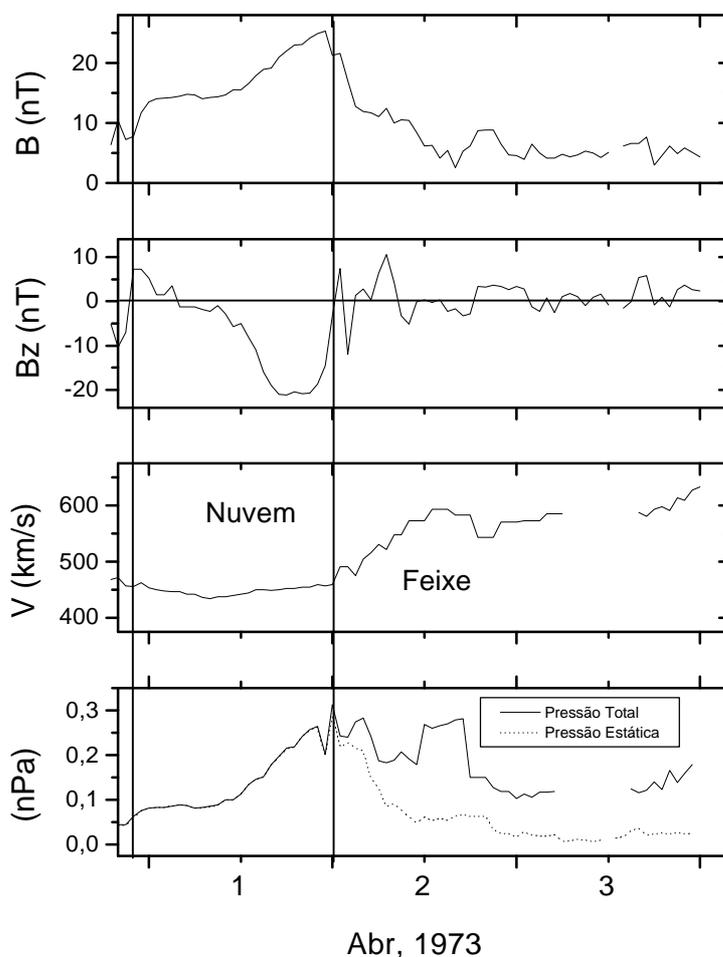


Fig. 4.20 - Variações temporais do campo magnético, da velocidade, da componente B_z do campo magnético, da Pressão Estática Total e da Pressão Total na interface entre uma Nuvem Magnética e um Feixe de Alta Velocidade, ocorridos em 01/04/1973.

Apresentamos a seguir, na Tabela 4.8, os valores médios da Pressão Térmica (P_k), Pressão Magnética (P_b), Pressão Estática Total (P), Pressão Dinâmica (P_d) e Pressão Total (P_t) para os 12 eventos da Tabela 4.7, na interface das regiões III-IV, ou seja,

entre a parte interna traseira da Nuvem Magnética e o meio externo logo atrás da Nuvem Magnética, conforme definido na Figura 4.15. Para o cálculo do valor médio das pressões nas interfaces, adotamos o seguinte procedimento: calculamos as variações temporais das Pressões Térmica, Magnética e Dinâmica ao longo de todos os eventos, sendo que para a Pressão Dinâmica utilizamos um sistema de referência que se movia com uma velocidade igual a velocidade média da Nuvem Magnética nas 10 últimas horas; calculamos a média de cada uma das pressões 10 horas antes da interface III-IV e 10 horas depois dessa interface e anotamos os valores na Tabela 4.8.

TABELA 4.8 – PRESSÃO TÉRMICA – P_k , PRESSÃO MAGNÉTICA – P_b , PRESSÃO ESTÁTICA TOTAL – P , PRESSÃO DINÂMICA – P_d E PRESSÃO TOTAL – P_t NA INTERFACE III-IV PARA UM CONJUNTO DE 12 NUVENS MAGNÉTICAS

Data do Evento	Região III			Região IV				
	P_k (nPa)	P_b (nPa)	P (nPa)	P_k (nPa)	P_b (nPa)	P (nPa)	P_d (nPa)	P_t (nPa)
11/02/69	0	0.0274	0.0274	0.0051	0.0061	0.0112	0.0032	0.0144
28/09/78	0	0.0792	0.0792	0	0.0063	0.0063	-	0.0063
07/01/79	0.0033	0.0191	0.0224	0.0213	0.0390	0.0603	0.0049	0.0652
14/01/88	0.0098	0.0658	0.0756	0.0144	0.0084	0.0228	-	0.0228
01/04/73	0.0064	0.1997	0.2061	0.0968	0.0718	0.1686	0.0597	0.2283
17/11/75	0.0039	0.0487	0.0526	0.0144	0.0295	0.0439	0.0402	0.0841
26/08/78	0.0302	0.1497	0.1799	0.0414	0.0367	0.0781	0.1369	0.2150
18/10/95	0.0181	0.2041	0.2222	0.0485	0.0405	0.0890	0.0850	0.1740
27/05/96	0.0128	0.0591	0.0719	0.0204	0.0133	0.0337	0.0201	0.0538
25/05/75	0.0076	0.0340	0.0416	0.0221	0.0098	0.0221	0.0819	0.1040
18/09/79	0.0030	0.0336	0.0366	0.0097	0.0140	0.0237	0.0054	0.0291
18/12/80	0.0076	0.2624	0.2700	0.0116	0.0335	0.0451	0.1098	0.1549

Observando a Tabela 4.8 pode-se verificar que 10 dos 12 eventos apresentaram valor de Pressão Total na região IV maior ou próximo ao valor da Pressão Estática Total na região III, ou seja, nestes eventos, a pressão no meio atrás da Nuvem era comparável à pressão no interior da Nuvem. Em 8 destes 10 eventos a Pressão Dinâmica exerceu papel importante no valor final da Pressão Total no lado externo atrás da Nuvem. No

evento ocorrido em 26/08/78, a Pressão Dinâmica foi predominante na região IV, o mesmo aconteceu no evento 18/12/80. Em três eventos, as pressões Térmica, Magnética e Dinâmica tiveram importância semelhante para o valor da Pressão Total na Região IV: 11/02/69, 01/04/73 e 27/05/96. Em dois eventos, 17/11/75 e 18/10/95, a Pressão Dinâmica apresentou valor comparável ao valor da Pressão Estática Total (Térmica + Magnética) na região IV. No evento ocorrido em 07/01/79, as pressões Térmica e Magnética foram predominante para o valor da Pressão Total. No evento 18/09/79, a Pressão Magnética no meio externo, ou seja, na região IV, foi predominante para o valor da Pressão Total. Todos os 12 eventos apresentaram predominância da Pressão Magnética em relação à Pressão Térmica no lado interno da Nuvem Magnética, ou seja, região III. Portanto, qualquer interação em termos de pressão nesta interface significa alteração do campo magnético interno da Nuvem Magnética.

A Figura 4.21 mostra a Interfaces II-III e III-IV e as pressões envolvidas nas Tabelas 4.7 e 4.8.

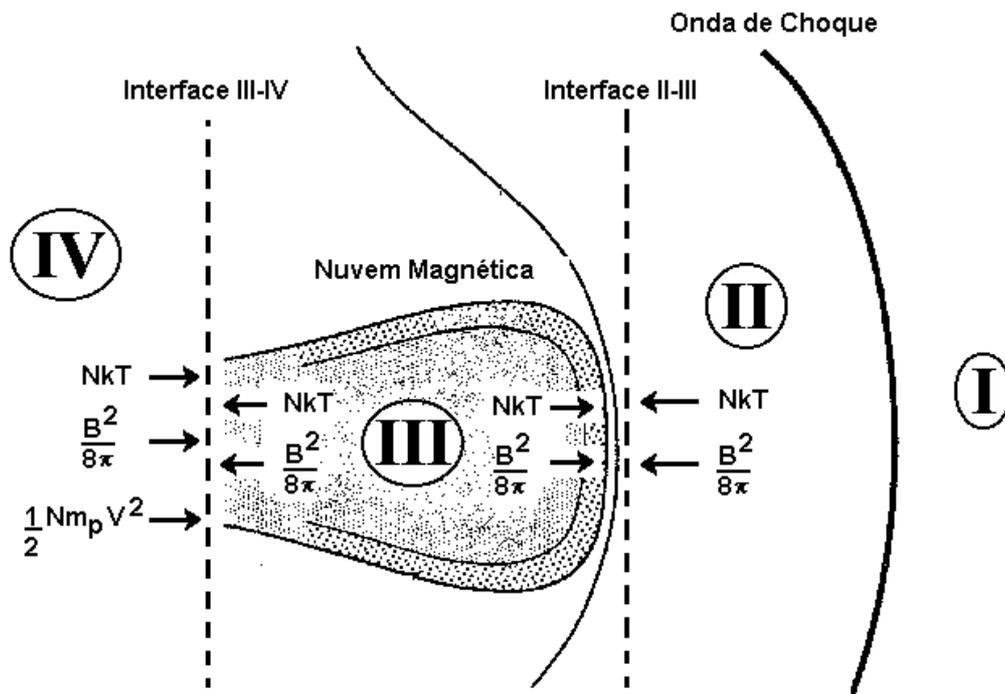


Fig. 4.21 - Interfaces II-III e III-IV e pressões envolvidas: Pressão Térmica, NkT ; Pressão Magnética, $B^2/8\pi$; Pressão Dinâmica, $\frac{1}{2} N.m_p.V^2$.

Para estudar a influência das interações de estruturas do Meio Interplanetário no campo magnético interno das Nuvens Magnéticas, observou-se a simetria do perfil do campo magnético dos eventos. Espera-se, pelo modelo do campo magnético de Nuvens, que o perfil da intensidade do campo magnético apresente um pico no centro da estrutura, como mostrado no Capítulo 3, Figuras 3.9 e 3.10. Na Figura 3.10, observa-se que os dados observacionais indicam um perfil da intensidade do campo magnético assimétrico, deslocado para a parte inicial da Nuvem Magnética em contraste ao perfil simétrico obtido pelo modelo. O evento ocorrido em 01/04/1973, estudado nesta dissertação, também apresenta perfil da intensidade do campo magnético assimétrico, porém, deslocado para a parte final da Nuvem Magnética, como pode ser visto na

Figura 4.20 deste Capítulo. Provavelmente isso é devido a interação da Nuvem Magnética com o Feixe de Alta Velocidade que se aproximava por trás.

Portanto, observou-se o perfil da intensidade do campo magnético a fim de identificar se este apresentava-se deslocado para a parte frontal (ou “empilhado” na parte frontal da Nuvem), para a parte final (ou “empilhado” na parte traseira da Nuvem) ou outra configuração, como por exemplo, dois pontos de máxima intensidade de campo magnético no interior da Nuvem Magnética. Comparamos estes perfis com as diferenças de pressões calculadas nas regiões II, III e IV, a fim de identificar se havia correlação entre estes deslocamentos do pico do campo magnético interno da Nuvem com as estruturas do meio circunvizinho.

Para os 12 eventos pertencentes ao Grupo 3 sintetizamos os valores das médias das Pressões Térmica, Magnética, Estática (Térmica mais Magnética), Dinâmica e Total (Térmica, Magnética e Dinâmica) nas interfaces das Regiões II–III e III–IV, juntamente com uma análise inicial do perfil da intensidade do campo magnético interno das Nuvens Magnéticas em questão, constituindo a Tabela 4.9.

São apresentados na Tabela 4.9: a Data do Evento; o Perfil do Campo Magnético Interno da Nuvem; as pressões na Região II; as pressões na Região III (interface Frontal e Traseira); as pressões na Região IV. Para representar o perfil do campo magnético interno da Nuvem, utilizamos a seguinte simbologia: /^\--. Campo magnético “empilhado” na parte frontal da Nuvem; .--/^\ Campo magnético “empilhado” na parte traseira da Nuvem; .-^-^-. Campo magnético apresentando dois picos no interior da Nuvem. Estas três simbologias para o perfil do campo magnético representam perfis diferentes do perfil teórico esperado, ou seja, perfil simétrico com o pico no centro da estrutura. Para enquadrar os eventos nos três grupos de perfis de campo magnético, /^\-- . , .--/^\ ou .-^-^- . , o autor desta Dissertação efetuou uma inspeção visual em cada um dos eventos.

Da análise da Tabela 4.9 podemos concluir que nos 4 eventos com campo magnético “empilhado” na parte frontal da Nuvem Magnética, o valor da Pressão Estática Média – P -, na Região II permaneceu menor que o valor de P na Região III. Porém o valor de P na região II em 2 destes eventos atingiu valores comparáveis ao valor da Pressão Estática – P – na região III, ($0,0545 \times 0,0686$) em 11/02/69 e ($0,2052 \times 0,2653$) em 14/01/88. Isto pode significar que a região II (Figura 4.21) pode ter atuado como um obstáculo para a Propagação da Nuvem Magnética e causou alterações na estrutura interna da Nuvem, comprimindo seu campo magnético na parte frontal. Nenhum destes eventos apresentou valor significativo da Pressão Dinâmica Média – P_d em relação à Pressão Estática Média – P , na Região IV (Figura 4.21), indicando que não estavam interagindo com Feixes de Alta Velocidade na parte traseira e, portanto, não estavam sendo comprimidas na parte traseira.

Em todos os eventos cujo campo magnético é “empilhado” na parte traseira da Nuvem Magnética, a Pressão Dinâmica Média – P_d , na Região IV, apresentou valor significativo em relação à Pressão Estática Média – P , nesta Região, variando de 0,33 a 2 vezes o valor de P , mostrando a influência de Feixes de Alta Velocidade no perfil do campo magnético interno de Nuvens Magnéticas. Nestes mesmos eventos, a Pressão Total Média – P_t , na Região IV, apresentou valores desde 74% a 160% dos valores de P na Região III interna a Nuvem Magnética, indicando a reação da Nuvem à aproximação da Região IV, ou seja, à compressão exercida pela região traseira na Nuvem .

Dos 3 eventos com 2 picos no campo magnético, 2 apresentaram valores significativos da P_d em relação a P na Região IV, indicando a aproximação de Feixes de Alta Velocidade. É interessante analisar o evento ocorrido em 18/09/79, pois este apresentou valores de pressão comparáveis na interface II-III (Figura 4.21) e também valores comparáveis de pressão total na interface III-IV. O autor desta Dissertação acredita que possam estar ocorrendo dois fenômenos distintos: (1) empilhamento do campo magnético na parte frontal interna da Nuvem, devido à região frontal estar atuando como um obstáculo; (2) um segundo empilhamento do campo interno à Nuvem, devido à aproximação de uma estrutura de alta velocidade por trás.

Esta conjunção de fenômenos estaria causando os dois picos da intensidade do campo magnético desta Nuvem Magnética.

Este tipo de estudo acerca da interação entre estruturas do meio interplanetário é um tópico bastante novo, não tendo sido realizado antes, pelo menos para o conhecimento do autor. Maiores discussões são necessárias para o aprimoramento deste tipo de análise, e para o aprimoramento do trabalho aqui desenvolvido. Porém, como primeiro passo, acreditamos que obtivemos resultados muito interessantes e importantes.

Dos estudos, análises e interpretações apresentados na duas Seções, 4.3.1 e 4.3.2, pudemos sugerir que ocorreu influência das interações ocorridas no Meio Interplanetário na intensificação do campo magnético intrínseco das Nuvens Magnéticas em alguns eventos. Isso resultou em alterações no campo magnético interno das Nuvens Magnéticas (intensificação), influenciando a intensidade das Tempestades Geomagnéticas por elas causadas. Ressaltamos que essas interações podem constituir um tópico adicional nas causas dos fenômenos geomagnéticos, além das causas exclusivamente solares, como tradicionalmente se pensa. É importante ter em mente estes fenômenos do Meio Interplanetário para o estudo da variabilidade do Clima Espacial e para a realização de uma Previsão do Clima Espacial.

TABELA 4.9 – PERFIL DO CAMPO MAGNÉTICO, PRESSÃO TÉRMICA – **Pk**, PRESSÃO MAGNÉTICA – **Pb**, PRESSÃO ESTÁTICA – **P**, PRESSÃO DINÂMICA – **Pd**, PRESSÃO TOTAL – **Pt**, NAS INTERFACES II-III E III-IV, PARA UM CONJUNTO DE 12 NUVENS MAGNÉTICAS

Data do Evento	Perfil de B	Região II			Região III						Região IV				
		Pk (nPa)	Pb (nPa)	P (nPa)	Parte Frontal			Parte Traseira			Pk (nPa)	Pb (nPa)	P (nPa)	Pd (nPa)	Pt (nPa)
					Pk (nPa)	Pb (nPa)	P (nPa)	Pk (nPa)	Pb (nPa)	P (nPa)					
11/02/69	/^\--.	0.0065	0.0480	0.0545	0.0023	0.0663	0.0686	0	0.0274	0.0274	0.0051	0.0061	0.0112	0.0032	0.0144
28/09/78	/^\--.	0.0397	0.0180	0.0577	0.0202	0.1443	0.1645	0	0.0792	0.0792	0	0.0063	0.0063	-	0.0063
07/01/79	/^\--.	0.0047	0.0179	0.0226	0.0079	0.0505	0.0584	0.0033	0.0191	0.0224	0.0213	0.0390	0.0603	0.0049	0.0652
14/01/88	/^\--.	0.0890	0.1162	0.2052	0.0293	0.2360	0.2653	0.0098	0.0658	0.0756	0.0144	0.0084	0.0228	-	0.0228
01/04/73	.-./^\	0.0220	0.0182	0.0402	0.0026	0.0780	0.0806	0.0064	0.1997	0.2061	0.0968	0.0718	0.1686	0.0597	0.2283
17/11/75	.-./^\	0.0072	0.0160	0.0232	0.0054	0.0296	0.0350	0.0039	0.0487	0.0526	0.0144	0.0295	0.0439	0.0402	0.0841
26/08/78	.-./^\	0.0456	0.0255	0.0711	0.0068	0.1768	0.1836	0.0302	0.1497	0.1799	0.0414	0.0367	0.0781	0.1369	0.2150
18/10/95	.-./^\	0.0474	0.0204	0.0678	0.0034	0.1636	0.1670	0.0181	0.2041	0.2222	0.0485	0.0405	0.0890	0.0850	0.1740
27/05/96	.-./^\	0.0020	0.0022	0.0042	0.0254	0.0258	0.0512	0.0128	0.0591	0.0719	0.0204	0.0133	0.0337	0.0201	0.0538
25/05/75	.-^.-.	0.0059	0.0075	0.0134	0.0012	0.0347	0.0359	0.0076	0.0340	0.0416	0.0221	0.0098	0.0221	0.0819	0.1040
18/09/79	.-^.-.	0.0233	0.0610	0.0843	0.0104	0.0738	0.0842	0.0030	0.0336	0.0366	0.0097	0.0140	0.0237	0.0054	0.0291
18/12/80	.-^.-.	?	0.0888	?	0.0167	0.3868	0.4035	0.0076	0.2624	0.2700	0.0116	0.0335	0.0451	0.1098	0.1549

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES FINAIS

Nuvens Magnéticas são Estruturas Interplanetárias bastante importantes no estudo da variabilidade do Clima Espacial. A partir das análises e interpretações dos Eventos Interplanetários, Nuvens Magnéticas e Não Nuvens Magnéticas, estudados nesta Dissertação, apresentamos neste Capítulo, de forma objetiva, as conclusões finais.

Esta Dissertação apresentou como um dos resultados mais importantes uma relação linear entre o pico do valor da velocidade de propagação e o pico da intensidade do campo magnético de Nuvens Magnéticas Interplanetárias. Isso indica que Nuvens Magnéticas que se propagam com maior velocidade possuem campo magnético intrínseco mais intenso. Como os parâmetros velocidade e campo magnético estão relacionados ao mecanismo de injeção de partículas do Vento Solar na Magnetosfera Terrestre, este resultado reforça a relação entre Nuvens Magnéticas e Tempestades Geomagnéticas. Esta associação poderá ser usada como um instrumento de previsão da geofetividade deste tipo de Ejeção de Massa Coronal - EMC, fornecendo uma estimativa do seu campo magnético interno a partir de dados observacionais de velocidades obtidas com técnicas coronográficas.

Da análise e interpretação da relação entre Nuvens Magnéticas e a ocorrência de Tempestades Magnéticas, concluímos que Nuvens Magnéticas que se propagaram com velocidades altas, e formaram ondas de choques dianteiras, estavam associadas a Tempestades Magnéticas Intensas. Em relação às Nuvens Magnéticas que se propagaram com velocidades baixas, não apresentando ondas de choque dianteiras, observou-se que dois dos cinco eventos estavam associados à Tempestades Magnéticas Intensas, devido a configurações pré-existentes de campo magnético na direção Sul e devido à interação com Feixes de Alta Velocidade. Tal fato indica a importância das interações ocorridas no Meio Interplanetário para a ocorrência de Tempestades Geomagnéticas.

A partir do estudo da Pressão Estática Total, observou-se que em Nuvens Magnéticas que se propagam com velocidades altas, formando ondas de choque dianteiras, a Pressão Térmica na lâmina entre a Nuvem Magnética e a onda de choque pode atingir valores comparáveis à Pressão Magnética no interior da Nuvem Magnética, de modo que se estabelece um equilíbrio de pressões entre estas duas estruturas. Com base neste resultado, propõe-se que esta interação possa contribuir para a intensificação do campo magnético interno da Nuvem Magnética, e conseqüentemente para o aumento de sua geofetividade.

Mostrou-se de maneira quantitativa os efeitos da interação entre Nuvens Magnéticas e Feixes de Alta Velocidade através do cálculo da Pressão Total, isto é, Pressão Térmica, Pressão Magnética e Pressão Dinâmica das duas estruturas. Observou-se que um Feixe pode apresentar uma Pressão Total igual ou maior que a Pressão Total no interior da Nuvem Magnética. Os resultados desta análise levaram a conclusão de que, em alguns casos, a interação entre Nuvens Magnéticas e Feixes de Alta Velocidade no Meio Interplanetário tem significativa importância para a intensificação do campo magnético interno das Nuvens Magnéticas e para a ocorrência de Tempestades Magnéticas.

De maneira geral, os resultados desta Dissertação reforçam a relação entre Nuvens Magnéticas e Tempestades Magnética, devido as suas propriedades intrínsecas, campo magnético e velocidade, e as suas interações com outras Estruturas do Meio Interplanetário, tais como Feixes de Alta Velocidade.

REFERÊNCIAS

- Brant, J. C. **Introduction to the solar wind**. San Francisco: W. H. Freeman, 1970. 216p.
- Bothmer, V.; Schwenn, R. The interplanetary and solar causes of major geomagnetic storms. **J. Geomag. Geoelectr.**, v.47, p.1127-1132, Sept. 1995.
- Burlaga, L. F. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. **J. Geophys. Res.**, v.93, n.A7, p.7217-7224, Jul. 1988.
- Burlaga, L. F. **Interplanetary magnetohydrodynamics**. New York: Oxford University Press, 1995, 256p.
- Burlaga, L. F.; Hundhausen, A. J.; Zhao, X. –P. The coronal and interplanetary current sheet in the early 1976. **J. Geophys. Res.**, v.86, n.A11, p.8893-8898, Oct. 1981a.
- Burlaga, L. F.; Sittler, E.; Mariani, F.; Schwenn, R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP-8 observations. **J. Geophys. Res.**, v.86, n.A8, p.6673-6684, Aug. 1981b.
- Burlaga, L. F.; Behannon, K. W.; Klein, L. W. Compound streams, magnetic clouds, and major geomagnetic storms. **J. Geophys. Res.**, v.92, n.A6, p.5725-5734, Jun. 1987.
- Burlaga, L. F.; Lepping, R. P.; Jones, J. Global configuration of a magnetic cloud. In: Russel, C. T. Priest, E. N.; Lee, L. C. ed. **Physics of magnetic flux ropes**. Washington, DC: AGU, 1990. v.58, p.373-385.

Burlaga, L. F.; Lepping, R. P.; Mish, W.; Ogilvie, K. W.; Szabo, A.; Lazarus, A. J.; Steinberg, J. T. A magnetic cloud observed by Wind on October 18-20, 1995. NASA preprint, GSFC, Feb. 1996.

Burlaga, L. F.; Fitzenreiter, R.; Lepping, R.; Ogilvie, K.; Szabo, A. Lazarus, A.; Steinberg, J.; Gloeckler, G.; Howard, R.; Michels, D.; Farrugia, C.; Lin, R. P.; Larson, D. E. A magnetic cloud containing prominence material: January 1997. **J. Geophys. Res.**, v.103, n.A1, p.277-285, Jan. 1998.

Cane, H. V.; Richardson, I. G. What caused the large geomagnetic storm of November 1978? **J. Geophys. Res.**, v.102, n.A8, p.17445-17449, Aug. 1997.

Farrugia, C. J.; Burlaga, L. F.; Lepping, R. P. Magnetic clouds and the quiet-storm effect at Earth. In: Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Kamide, Y.; Arballo, J. A. ed. **Magnetic storms**. Washington, DC: AGU, 1997. v.98, p.91-106.

Fox, N. J.; Peredo, M.; Thompson, B. T. Cradle to grave tracking of the January 6-11, 1997 Sun-Earth connection event. **Geophys. Res. Lett.**, v.25, n.14, p.2461-2464, Jul. 1998.

Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT). **Planet. Space Sci.**, v.35, n.9, p.1101-1109, jul. 1987.

Gonzalez, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M. What is a magnetic storm? **J. Geophys. Res.**, v.99, n.A4, p.5771-5792, Apr. 1994.

- Gonzalez, W. D.; Clúa de Gonzalez, A. L.; Dal Lago, A.; Tsurutani, B. T.; Arballo, J. K.; Lakhina, G. K.; Buti, B.; Ho, C. M.; Wu, S. –T. Magnetic cloud field intensities and solar wind velocities. **Geophys. Res. Lett.**, v.25, n.7, p.963-966, Apr. 1998a.
- Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Kamide, Y.; Gonzalez, A. L. C.; Dal Lago, A.; Arballo, J. K. Interplanetary cause of very intense magnetic storms. **Phys. Space Plasmas**, n.15, p.129-133, 1998b.
- Gopalswamy, N.; Hanaoka, Y.; Kosugi, T.; Lepping, R. P.; Steinberg, J. T.; Plunkett, S.; Howard, R. A.; Thompson, B. J.; Gurman, J.; Ho, G.; Nitta, N.; Hudson, H. S. On the relationship between coronal mass ejections and magnetic clouds. **Geophys. Res. Lett.**, v.25, n.14, p.2485-2488, July 1998.
- Gosling, J. T.; Baker, D. N.; Bame, S. J.; Feldman, W. C.; Zwickl, R. D. Bidirectional Solar Wind Electron Heat Flux Event. **J. Geophys. Res.**, v.92, n.A8, p.8519-8535, Aug. 1987.
- Gosling, J. T. Coronal mass ejections and magnetic flux ropes in interplanetary space. In: Russel, C. T. Priest, E. N., e Lee, L. C. ed. **Physics of magnetic flux ropes**. Washington, DC: AGU, 1990. v.58, p.343-364.
- Gosling, J. T. In situ observations of Coronal Mass Ejections in interplanetary space. In: Svstka, Z. Jackson, B. V., e Machado, M. E. ed. **Eruptive solar flares**. New York, NY: Springer-Verlag, 1992. p.258-267.
- Gosling, J. T. Coronal mass ejections: the link between solar and geomagnetic activity. **Phys. Fluids B 5**, v.7, p.2638-2645, July 1993.

Gosling, J. T. Coronal Mass Ejections: An Overview. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. **Coronal mass ejections**, Washington, DC: AGU, 1997. v.99, p.9-16.

Hewish, A.; Bravo, S. The sources of large-scale heliospheric disturbances. **Solar Phys.**, v.106, p.185-200, Apr. 1986.

Hundhausen, A. J. The origin and propagation of coronal mass ejections. In: International Solar Wind Conference, 6., Boulder, 1988. **Proceedings**. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1988. p.181-214.

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.

Kamide, Y.; Yokoyama, N.; Gonzalez, W. D.; Tsurutani, B. T.; Daglis, I. A.; Brekke, A.; Masuda, S. Two-step development of geomagnetic storms. **J. Geophys. Res.**, v.103, n.A4, p.6917-6921, Apr. 1998a.

Kamide, Y.; Baumjohann, W.; Daglis, I. A.; Gonzalez, W. D.; Grande, M.; Joselyn, J. A.; McPherron, R. L.; Phillips, J. L.; Reeves, E. G. D.; Rostoker, G.; Sharma, A. S.; Singer, H. J.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M. Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationships. **J. Geophys. Res.**, v.103, n.A8, p.17705-17728, Aug. 1998b.

King, J. H. **OMNI Data Center**. [online]. < <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>>. Mar. 1998.

- Kivelson, M. G.; Russell, C. T. **Introduction to space physics**. Los Angeles: Cambridge University Press, 1995. 568p.
- Klein, L. W.; Burlaga, L. F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. **J. Geophys. Res.**, v.87, n.A2, p.613-624, Feb. 1982.
- Kunkel, W. B. **Plasma physics in theory and application**. New York: McGraw-Hill, 1966.
- Lepping, R. P.; Jones, J. A.; Burlaga, L. F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. **J. Geophys. Res.**, v.95, n.A8, p.11957-11965, Aug. 1990.
- Marubashi, K. Physics of interplanetary magnetic flux ropes: toward prediction of geomagnetic storms. The International Symposium of coronal mass ejections, Tokio, Japan, 1998. In Press, 1999.
- Mendes Jr. **A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das Tempestades Geomagnéticas Moderadas (1978-1979)**. São José dos Campos. 268p. (INPE – 5445 – TDI/491). Tese (Doutoramento em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992.
- Neugebauer, M.; Goldstein, R. Particle and field signatures of coronal mass ejections in the solar wind. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. **Coronal mass ejections**. Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.245-251
- Parker, E. N. The stellar-wind regions. **Astrophys. J.**, v.134, p.20-27, Feb. 1961.

- Parks, G. K. **Physics of space plasmas: an introduction**. Redwood City: Addison-Wesley, 1991. 538p.
- Pneuman, G. W.; Kopp, R. A. Coronal streamers III: energy transport in streamers and interstreamer regions. **Solar Phys**, v.13, p.176-193, Jan. 1970.
- Schultz, M. Interplanetary sector structure and heliomagnetic equator. **Astrophys. Space Sci.**, v.24, p.371-383, May 1973.
- Suess, S. T. The heliopause. **Rev. Geophys.**, v.28, p.97-115, Feb. 1990.
- Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D. The efficiency of “viscous interaction” between the solar wind and the magnetosphere during intense northward IMF events. **Geophys. Res. Lett.**, v.22, n.6, p.663-666, Mar. 1995.
- Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D. The interplanetary cause of magnetic storms: a review. In: Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Kamide, Y.; Arballo, J. A. ed. **Magnetic storms**. Washington, DC: AGU, 1997. v.98, p.77-89.
- Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Tang, F.; Akasofu, S. I.; Smith, E. J. Origin of interplanetary southward magnetic field responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979). **J. Geophys. Res.**, v.93, n.A8, p.8519-8531, Aug. 1988.
- Tsurutani, B. T.; Gonzalez, W. D.; Tang, F.; Lee, Y. T. Great magnetic storms. **Geophys. Res. Lett.**, v.19, n.1, p.73-76, Jan. 1992.
- Zwickl, R. D.; Asbridge, J. R.; Bame, S. J.; Feldman, W. C.; Gosling, J. T.; Smith, E. J. Plasma properties of driver gas following interplanetary shocks observed by ISEE-3. **Solar wind five**. p.711-717, 1983, local: NASA, CP. 2280.