

# ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS CAUSANDO SUPERTEMPESTADES E TEMPESTADES MAGNÉTICAS INTENSAS

Aline de Lucas<sup>1</sup>, W. D. Gonzalez<sup>1</sup>, E. Echer<sup>1</sup>, F. L. Guarnier<sup>2</sup>, A. Dal Lago<sup>1</sup>, L. E. Vieira<sup>1</sup>, M. R. Da Silva<sup>1</sup>, A. C. V. Saraiva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/DGE, Av. dos Astronautas, 1758, CEP 12245-970  
[delucas@dge.inpe.br](mailto:delucas@dge.inpe.br)

<sup>2</sup>Universidade do Vale do Paraíba/IPD, Avenida Shishima Hifumi, 2911, CEP 12244-000

**Resumo-** O vento solar é o principal meio através do qual as estruturas interplanetárias se movem a partir do Sol para o meio interplanetário. Dentre as principais estruturas que causam tempestades magnéticas, percebe-se que algumas delas apresentam características determinantes que as tornam mais geofetivas em comparação as demais. A configuração de campo magnético dentro destas estruturas determina o quão geofetivas elas podem vir a se tornar durante a ocorrência da interação vento solar-magnetosfera. A partir desta idéia, um estudo com trinta e três tempestades magnéticas foi realizado. Durante o período de 1981 e 2004, dezoito eventos de supertempestade magnética ( $Dst < -250$  nT) foram estudados. Para fazer um estudo comparativo, quinze tempestades magnéticas intensas ( $-250 < Dst < -100$  nT) foram selecionadas. O objetivo era determinar, dentro do conjunto, as estruturas mais importantes em gerar tempestades magnéticas com diferentes magnitudes: intensas e super intensas.

**Palavras-chave:** estruturas interplanetárias; nuvens magnéticas; regiões de bainha; estruturas complexas; tempestades magnéticas

**Área do Conhecimento:** Ciências Exatas e da Terra

## Introdução

A partir das observações de eclipses, verificou-se que a coroa solar é altamente estruturada e muda constantemente com o ciclo de atividade solar. Tais variações no tempo e na estrutura espacial foram registradas também no vento solar (NEUGEBAUER E SNYDER, 1966).

Durante a ocorrência da interação vento solar-magnetosfera, alguns parâmetros foram empiricamente determinados para caracterizar um distúrbio geomagnético. No lado diurno, a injeção de energia para dentro da magnetosfera deve ter uma duração superior a três horas. Além disso, a magnitude do campo elétrico interplanetário,  $vB_z$ , deve ser no mínimo  $5$  mV/m, correspondendo a um campo magnético interplanetário (IMF, do inglês *Interplanetary Magnetic Field*)  $B_z$  de intensidade menor ou igual a  $-10$  nT. Isto caracteriza os eventos de tempestade magnética intensa ( $-250 < Dst < -100$  nT) (GONZALEZ et al., 1987).

Baseados nestes parâmetros, determinadas estruturas interplanetárias tornam-se mais geofetivas do que outras. Um exemplo são as ejeções coronais de massa interplanetárias (ICMEs, do inglês *Interplanetary Coronal Mass Ejections*), que são os remanescentes das ejeções coronais de massa (CME, do inglês *Coronal Mass Ejection*). Estas estruturas são caracterizadas por campos magnéticos intensos e de longa duração, intensificando o processo de reconexão

(DUNGEY, 1961). Quando interagem com feixes rápidos, as ICMEs podem alcançar velocidades altas o suficiente para causar choques interplanetários que comprimem o IMF (GOSLING et al., 1991). Dentre as ICMEs, as estruturas chamadas nuvens magnéticas (MCs, do inglês *Magnetic Clouds*) representam uma subclasse com características bem definidas. Dentro destas estruturas a intensidade do campo magnético crescente, uma grande e lenta rotação do vetor campo magnético sobre o período de 1 dia, à distância de 1 UA (BURLAGA et al., 1981b; KLEIN E BURLAGA, 1982).

Baseados no conjunto de eventos selecionados dentro do período de 1981 a 2004, o objetivo é determinar as principais causas interplanetárias das tempestades, bem como o número de eventos causados por cada uma delas. Dentre as causas de intensos distúrbios geomagnéticos estão as ICMEs/MCs, as regiões de interação co-rotantes (CIRs), as regiões de bainha e aquelas formadas pela interação de duas ou mais estruturas (complexas).

## Materiais e Métodos

Para a análise dos eventos foram usados os parâmetros de plasma (temperatura, densidade e velocidade) e os dados do IMF (componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  e a magnitude,  $B$ ) obtidos a partir dos satélites ISEE3 (*International Sun-Earth Explorer*) (FRANDSEN et al., 1978; BAME et al., 1978), IMP-8 (*Interplanetary Monitoring Platform*) (MISH E

LEPPING, 1976) e ACE (Advance Composition Explorer) (STONE et al., 1998).

Com base nestes dados, foi possível determinar as estruturas que causaram os eventos registrados. Isto se deve ao fato de que cada estrutura interplanetária apresenta determinadas características próprias. Tais características diferenciam-nas entre si e são responsáveis pela geofetividade observada nas mesmas.

As ICMEs, por exemplo, são importantes fontes de plasma e de IMF a 1 AU. São formadas como resultado da expansão para o meio interplanetário das ejeções de material solar, de regiões de linhas de campo fechadas. As principais características destas estruturas são: 1) aumento na quantidade de íons de Hélio; 2) queda de temperatura dos elétrons e íons dentro da estrutura; 3) estados de ionização raros; 4) campo magnético intenso; 5) poucas flutuações do vetor campo magnético; 6) fluxo bidirecional de prótons energéticos; e 7) fluxo bidirecional de elétrons supra-térmicos.

Dentro das ICMEs, como já fora mencionado anteriormente, existe uma subclasse bem organizada: as MCs. Dentro destas estruturas, a temperatura dos prótons é baixa (BURLAGA et al., 1981b; KLEIN E BURLAGA, 1982; BURLAGA, 1995). A Figura 1 representa a propagação de uma MC no meio interplanetário. Entre o choque formado e a estrutura, uma região turbulenta de intensos campos magnéticos surge. Esta região é denominada de região de bainha.

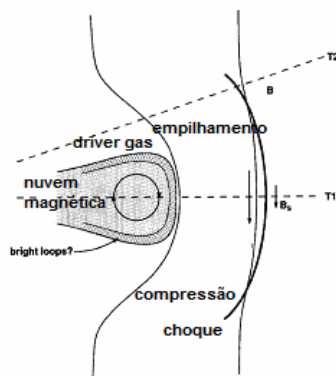


Figura 1 - Estrutura de uma ICME propagando-se e causando um choque interplanetário. FONTE: Adaptada de Gonzalez et al. (1999).

As regiões de bainha são geralmente formadas atrás dos choques interplanetários e são importantes fontes de intensas componentes de campo magnético sul ( $B_s$ ). Além disso, são caracterizadas por possuírem uma densidade de prótons e um beta de plasma elevados. Nesta região, o plasma é aquecido devido à compressão e ao acúmulo de linhas de campo em torno de um objeto. Isto resulta, por fim, num aumento observável na magnitude do campo  $\vec{B}$ . Como consequência, a pressão magnética aumenta

nesta região, levando a um beta de plasma bem baixo (GONZALEZ et al., 1999). A alta flutuação do campo nestas regiões deve-se às flutuações Alfvénicas comprimidas, que, por fim, levam à injeção de plasma na cauda magnética (HUTTUNEN, 2005).

A interação de duas ou mais estruturas no meio interplanetário ocorre freqüentemente. A ela está associada a ocorrência de inúmeros casos de tempestades magnéticas intensas (KNIPP et al., 1998, e outras referências ali encontradas). Dos casos já reportados, a maioria envolve um choque frontal rápido seguido por uma MC, e geralmente comprimida por um feixe rápido (DAL LAGO et al., 2001).

A porção à frente de um feixe rápido freqüentemente alcança a região de baixa velocidade do vento solar, e, por consequência, uma região de interação comprimida é formada. Estas regiões de compressão formam espirais no plano equatorial, que co-rotam com o Sol, quando o fluxo do vento solar é estacionário no tempo. Por esta razão, estas regiões de alta pressão são conhecidas como regiões de interação co-rotantes (SMITH E WOLFE, 1976), que é a última estrutura considerada.

## Resultados

A Figura 2 representa o número de eventos do conjunto de trinta e três tempestades causados por cada estrutura interplanetária. Dentre as estruturas, encontram-se tempestades que foram causadas por nuvens magnéticas, outras que foram causadas por regiões de bainha, além de estruturas complexas e CIRs.

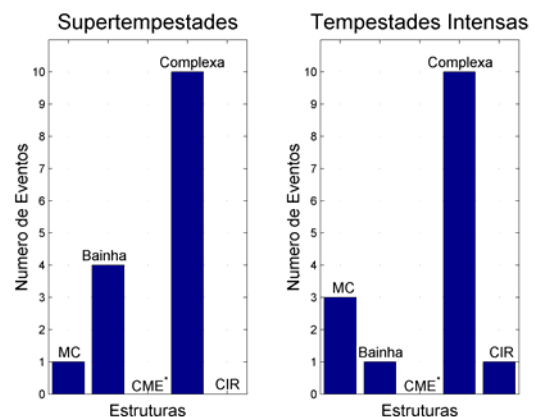


Figura 2 - Histograma mostrando o número de eventos causados por diferentes estruturas magnéticas. Dentre as principais estruturas, aparecem as MCs, regiões de bainha, CME<sup>+</sup> (não-MCs), as estruturas complexas e as CIRs. O maior número de eventos foi de estruturas complexas.

Conforme é observado na Figura 2, para ambas as classes de tempestade os eventos

complexos foram os mais numerosos. Em torno de 10 eventos complexos foram registrados para cada tipo de tempestade.

Em grande parte dos eventos, percebe-se que as regiões de bainha dão início à entrada de energia na magnetosfera. Gonzalez et al. (1999) descreveram os vários mecanismos para se gerar intensos campos nestas regiões. Geralmente elas se formam à frente das estruturas que se propagam com uma velocidade acima da velocidade do meio. Nas ICMEs, com a compressão causada devido à propagação destas, as regiões de bainha podem iniciar o processo de reconexão, sendo seguidas pelo *ejecta*.

Muitas vezes, a energização da corrente de anel, e, portanto, a observável deflexão da componente H do campo geomagnético, depende somente da bainha, conforme se observam vários eventos no conjunto selecionado. Em muitos deles, como é o caso dos eventos complexos, as regiões de bainha são logo seguidas pelo *ejecta*. Desde que isso ocorra, uma componente  $B_S$  pré-existente na bainha pode ser intensificada e resultar em uma tempestade causada por uma estrutura  $B_S$  complexa.

## Discussão

Os eventos de tempestades magnéticas intensas geralmente aparecem associados com estruturas interplanetárias complexas (GONZALEZ et al., 2002). O mesmo foi observado para o conjunto de eventos, onde tanto para supertempestades como para as tempestades magnéticas intensas, se observa um número maior de eventos causados por estas estruturas.

A compressão e a deflexão do fluxo de vento solar nas CIRs são altamente influenciadas pelo campo magnético. Desta forma, nas proximidades das fronteiras de setor magnético pode haver um aumento na magnitude das componentes do IMF, ou seja, um forte potencial para criar campos apontando para o sul, que, por consequência, resultam em tempestades magnéticas (SCHWENN, 2006). No entanto, como se observa na Figura 2, são poucos os casos de tempestades intensas que ocorrem somente devido a uma CIR. Em seu recente trabalho, Richardson et al. (2006) encontraram que, num conjunto de setenta e nove tempestades intensas entre 1996 e 2004, nove foram puramente causadas por CIRs. No entanto, uma CIR não é capaz de gerar uma supertempestade geomagnética, a menos que tenha interagido com estruturas mais geoefetivas.

Huttunen (2005), em um trabalho estatístico sobre as tempestades magnéticas durante o ciclo solar 23, mostrou que as principais causas de distúrbios geomagnéticos durante este período foram as regiões de bainha. Para todos os eventos de supertempestades analisados neste trabalho,

um número significativo deles foi causado por estas estruturas.

## Conclusão

No conjunto de trinta e três tempestades magnéticas intensas e muito intensas selecionadas para o presente trabalho, observou-se claramente que existe uma estrutura determinante na ocorrência de tempestades de maior magnitude. Os eventos em que estruturas complexas estão envolvidas foram os mais comumente observados.

Regiões de interação co-rotantes sozinhas não são capazes de causar supertempestade, a menos que sejam observadas interagindo e intensificando estruturas  $B_S$  pré-existentes. O mesmo foi observado para as ejeções coronais de massa dentro do período estudado. Para as CMEs (não-MCs) não foi registrado nenhum evento, para ambas as classes, que tenha sido puramente causado por uma delas.

No entanto, o conjunto de eventos selecionados para a classe das tempestades magnéticas intensas não envolve todos os eventos ocorridos no período. A partir do conjunto completo, pode-se fazer uma nova estatística, que, com certeza, mostrará que CMEs podem estar associadas a tempestades magnéticas intensas.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo espaço concedido. Além disso, pelas missões ACE, ISSE3 e IMP-8 pela disponibilidade dos dados que foram usados para o estudo. Também gostariam de agradecer às agências financiadoras brasileiras CNPq pelo suporte financeiro do projeto de doutorado no. 142012/2005-0, à agência FAPESP pelo projeto de doutorado 05/54800-1, os contratos de pós-doutorado 04/14784-4 e 02/12723-2, e o projeto 2005/03501-4.

## Referências

- BAME, S. J.; ASBRIDGE, J. R.; FELTHAUSER, H. E.; GLORE, J. P.; PASCHMANN, G.; HEMMERICH, P.; LEHMANN, K.; ROSENBAUER, H. ISEE-1 and ISEE-2 fast plasma experiment and the ISEE-1 solar wind experiment. **IEEE Transactions on Geoscience Electronics**, v. GE-16, p. 216-220, 1978.
- BURLAGA, L. F. Interplanetary Magnetohydrodynamics. New York: Oxford University Press, 1995.
- BURLAGA, L. F.; SITLER, E.; MARIANI, F.; SCHWENN, R.; NEUBAUER, F. M. Large-scale

- variations in the IMF: Voyager 1 and 2 observations between 1 and 5 AU. **Journal of Geophysical Research**, v.87, p. 4345, 1981b.
- DAL LAGO, A.; GONZALEZ, W. D.; CLÚA DE GONZALEZ, A. L.; VIEIRA, L. E. A. Compression of magnetic clouds in interplanetary space and increase in their geoeffectiveness. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63 (5), p. 451-455, 2001.
  - DUNGEY, J. W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. **Physical Review Letters**, v. 6, p. 47-48, 1961.
  - FRANSEN, A. M. A.; CONNOR, B. V.; VAN AMERSFOORT, J.; SMITH, E. J. The ISEE-C vector helium magnetometer. **IEEE Transactions on Geoscience Electronics**, v. GE-16, p. 195-198, 1978.
  - GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; LEPPING, R. P.; SCHWENN, R. Interplanetary Phenomena Associated with Very Intense Geomagnetic Storms. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 173-181, 2002.
  - GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; CLUA DE GONZALEZ, A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms ( $Dst < -100$  nT). **Space Science Reviews**, v. 88, n.3/4, p. 529-562, 1999.
  - GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ( $Dst < -100$  nT). **Planetary and Space Science**, v. 35, n. 9, p. 1101-1109, 1987.
  - GOSLING, J. T.; MCCOMAS, D. J.; PHILLIPS, J. L.; BAME, S. J. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, p. 7831-7839, 1991.
  - HUTTUNEN, K. E. J. Interplanetary shocks, magnetic clouds and magnetospheric storms. 2005. Tese (Doutorado em Física) – Department of physical Sciences, Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki, Finland, 2005.
  - KLEIN, L. W.; BURLAGA, L. F. Interplanetary Magnetic Clouds at 1 AU. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. 613-624, 1982.
  - KNIPP, D. J.; EMERY, B. A.; ENGBRETSON, N.; LI, X.; MCALLISTER, A. H.; MUKAI, T.; KOKUBUN, S.; REEVES, G. D.; EVANS, D.; OBARA, T.; PI, X.; ROSENBERG, T.; WEATHERMAX, A.; MCHARG, M. G.; CHUN, F.; MOSELY, K.; CRODESCU, M.; LANZEROTTI, L.; RICH, F. J.; SHARBER, J.; WILKINSON, P. An overview of the early November 1993 geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 26197, 1998.
  - MISH, W. H.; LEPPING, R. P. Magnetic field experiment data processing system: Explorers 47 and 50, NASA-GSFC, X-694-76-158, Greenbelt, MD, Aug. 1976.
  - NEUGEBAUER, M; SNYDER, C. W. Mariner 2 observations of the solar wind. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, p. 4469, 1966.
  - RICHARDSON, I. G.; WEBB, D. F.; ZHANG, J.; BERDICHEVSKY, D. B.; BIESECKER, D. A.; KASPER, J. C.; KATAOKA, R.; STEIBERG, J. T.; THOMPSON, B. J.; WU, C.-C.; ZHUKOV, A. N. Major geomagnetic storms ( $Dst \leq -100$  nT) generated by corotating interaction regions. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, CitelD A07S09, 2006.
  - SCHWENN, R. Space Weather: The Solar Perspective. **Living Reviews in Solar Physics**, 3, 2006.
  - SMITH, E.; WOLFE, J. H. Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneers 10 and 11. **Geophysical Research Letters**, v.3, n.3, p. 137-140, 1976.
  - STONE, E. C.; FRANSEN, A. M.; MEWALDT, R. A.; CHRISTIAN, E. R.; MARGOLIES, D.; ORMES, J. F.; SNOW, F. The Advanced Composition Explorer. **Space Science Reviews**, v. 86, Issue 1/4, p. 1-22 (1998).