

CARACTERIZAÇÃO DE DUAS NUVENS MAGNÉTICAS SOBREPOSTAS DURANTE O PERÍODO DE 9 A 10 DE NOVEMBRO DE 2004

Livia Geovana da Silva, Marcos William da Silva Oliveira, Rosemeire Aparecida Rosa Oliveira.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Câmpus São José dos Campos, Rod. Pres. Dutra, km 145 - s/n - Jardim Diamante, 12223-201 - São José dos Campos-SP, Brasil, livia.geovana@aluno.ifsp.edu.br, oliveiramw@ifsp.edu.br, meirematematica@gmail.com.

Resumo – O artigo tem como objetivo caracterizar a sobreposição de duas nuvens magnéticas durante o período de 9 de novembro de 2004 a 10 de novembro de 2004. A metodologia adotada inclui pesquisas bibliográficas, busca e análise de dados de satélites, e utilização de software específico para a classificação e identificação do limite de início e fim de cada evento, como também suas propriedades de acordo com os dados do campo magnético e do método de mínima variância. Este estudo detecta os intervalos de cada evento no período, que são nuvens distintas em suas polaridades. Por fim, o trabalho permite uma análise mais detalhada e efetiva sobre estes em conjunto com software.

Palavras-chave: AMCDA, Campo magnético Interplanetário, Método da Mínima Variância.

Área do Conhecimento: Física Espacial.

Introdução

Este artigo é oriundo de uma pesquisa, que está em desenvolvimento, sobre a caracterização do comportamento de nuvens magnéticas (MCs), através dos dados obtidos durante a passagem das ejeções de massa coronal interplanetária (ICMEs) pela sonda *Advanced Composition Explorer* (ACE) em órbita no ponto lagrangiano L1, ou seja, no ponto de equilíbrio gravitacional Terra-Sol do meio interplanetário (BURLAGA, 1988; MARUBASHI, 1986; MARUBASHI; LEPPING, 2007; OLIVEIRA, 2021).

As Ejeções de Massa Coronal (CMEs) são grandes quantidades de plasma quente, liberadas pelo Sol originadas pela ruptura do campo magnético solar. Ademais, a CME pode ser nomeada como Ejeção de Massa Coronal Interplanetária quando há deslocamento da baixa coroa para o meio interplanetário ocorrendo o resfriamento do plasma por razão da expansão sofrida (OLIVEIRA, 2021).

Desse modo, quando há interação do campo magnético terrestre e do campo das ICMEs, ambos com polaridades opostos, é possível desencadear processos de reconexão magnética que permite a injeção de partículas em todo o sistema magnetosférico (CHINCHILLA, 2019). Esses eventos, quando apresentam quatro propriedades simultâneas, são chamados de nuvens magnéticas. Tais características são: a baixa velocidade térmica dos íons, maior intensidade de campo magnético que o ambiente, rotação suave do vetor campo e valores de beta de plasma (pressão cinética/pressão magnética) menores que a unidade (BURLAGA *et al.*, 1981).

A catalogação de Huttunen *et al.* (2005) é utilizada como validação para o estudo da caracterização das nuvens. A classificação é feita primeiramente pelos ângulos latitudinais, quando o eixo do tubo é quase paralelo ao plano de eclíptica ($|\theta| \leq 45^\circ$) é uma nuvem bipolar. De outro modo, quando esse ângulo possui alta inclinação ($|\theta| > 45^\circ$), é definido unipolar. Os ângulos longitudinais (φ) tem classificação, se caso o ângulo for maior que 180° apresenta um comportamento para Oeste (W), do contrário indica para Leste (E). No entanto, analisando os tipos de eventos magnéticos e seus ângulos foi encontrado algumas incoerências, conforme o evento da Tabela 1.

Tabela 1 – Incoerência na catalogação pelos ângulos da nuvem magnética obtidos pelo MVA.

Evento	Data início	Data final	Horário início	Horário final	Tipo	Huttunen (φ)	Huttunen (θ)
1	14/06/1998	14/06/1998	02:00	00:00	SWN	83°	14°

Fonte: Huttunen *et al.* (2005).

O evento 1 deveria ser um tubo do tipo SEN pois apresenta ângulo (φ) menor que 180° , indicando um comportamento para Leste, contudo o tipo informado por Huttunen *et al.* (2005) foi um evento SWN. Dessa forma, houve a necessidade da aplicação do software AMCDA - *Automatic*



Magnetic Cloud Data Analization (OLIVEIRA, 2021), que considera o modelo livre de força de Farrugia, Osherovich e Burlaga (1995) para uma nuvem ideal ajustável a um tubo de fluxo de larga escala com as linhas de campo torcidas. Isto é, considera que a MC assume uma forma cilíndrica através dos estudos da seção transversal da nuvem distorcida elipticamente devido à sua interação com o vento solar (CID *et al.*, 2002; CHINCHILLA *et al.*, 2018). Por tanto, busca-se interpretar a posição que este cilindro ocupa quando se aproxima do satélite e, conseqüentemente, da magnetosfera terrestre (BURLAGA, 1988; OLIVEIRA, 2021).

Os dados sobre o período de interesse de cada evento são expressos pela lista “*Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections Since January 1996*”¹ (“Ejeções de massa coronal interplanetária próxima à Terra desde janeiro de 1996”) de Richardson *et al.* (2021), conforme a Tabela 2, identificando as informações sobre o intervalo estudado neste trabalho.

Tabela 2 – Identificação do evento estudado.

Dia inicial	ICME Plasma Início e fim Mês/dia		Início e fim		MC início e fim		dV	Vel.	Vel. máx	B	MC	DST
09/11 1825 (W)	09/11 2000	11/11 2300	0	0	0	-36 (2 MCs)	170 S	640	810	14	2	-263

Fonte: Richardson *et al.* (2021).

Colunas: (1) O tempo de chegada da perturbação relacionado ao ICME; (2) e (3) Hora de início e fim do ICME correspondentemente; (4) e (5) Compensações de início e fim da assinatura de composição / estado de carga em relação aos tempos; (6) e (7) Deslocamentos de início e fim de nuvem magnética em relação a ICME; (8) Aumento da velocidade do vento solar na perturbação. ‘S’ indica que isso incluiu um choque; (9) Velocidade média do vento solar no intervalo; (10) Velocidade máxima do vento solar no intervalo da perturbação até a borda final da ICME; (11) Intensidade média do campo magnético; (12) 2 = nuvem magnética relatada; (13) Valor mínimo do índice geomagnético Dst.

Segundo Richardson (2010), ocasionalmente, duas nuvens magnéticas são identificadas no intervalo de interesse, indicado por “(2 MCs)”. Os deslocamentos são estimados a partir da borda inicial da primeira nuvem e a borda final da segunda. Contudo, não se identifica a borda final da primeira e o começo da segunda nuvem, pois estão sobrepostas. Portanto, o objetivo deste trabalho é identificar as bordas desses eventos e caracterizá-los.

Metodologia

O trabalho estudou o evento do período entre 9 de novembro de 2004 a 10 de novembro de 2004, com análise dos dados obtidos pela sonda ACE. Estas informações são medições vetoriais do campo magnético interplanetário (IMF), elas são disponibilizadas on-line pelo *ACE Science Center* (ASC)².

O software utilizado foi desenvolvido em Oliveira (2021) e apresenta uma interface gráfica com quatro telas de visualização. A tela inicial “*Data Set*” (“Conjunto de dados”) são oito gráficos obtidos diretamente dos dados do satélite sem pré-processamento. No quadro “*MVA Hodograms*” realiza o processamento do método de mínima variância (MVA) sobre os componentes do campo magnético, o modelo livre de força e suas rotações, considerando os conjuntos de correção do MVA.

O botão “*Axes Directions*” (“Direções de eixos”) mostra as coordenadas do campo magnético do evento comparado às duas rotações do modelo. O “*MVA Results*” (“Resultados do MVA”) apresenta uma tabela de resultados quantitativos e qualitativos do processamento. Nesta tela, x^i (*GSE*) são os autovetores e $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ respectivos autovalores, (φ, θ) são os ângulos estimados pelo MVA para o eixo da MC. Além disso, apresenta-se a razão λ_2/λ_3 baseada em Lepping e Behannon (1980), a métrica P $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ baseada em Oliveira *et al.* (2020) e χ o ângulo de rotação do campo magnético que permitem avaliar quantitativamente a qualidade do evento estudado. Ambos, autovetores e ângulos do eixo da MC são modificados de acordo com a decisão registrada nas outras telas. Enquanto, (φ_1, θ_1) e (φ_2, θ_2) são os possíveis ângulos do eixo da MC, *Type* e *Handedness* são o tipo e helicidade, obtidos automaticamente pelo processo.

Resultados

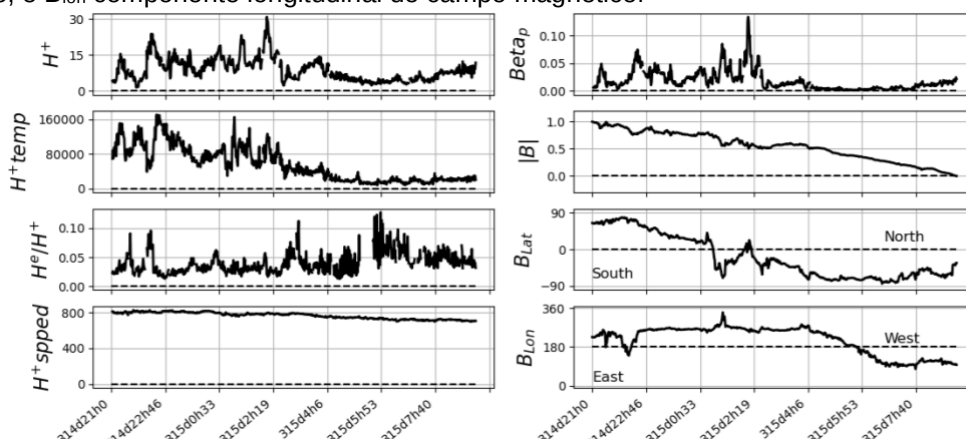
Na aplicação dos dados do satélite ao software do evento retratado na Tabela 2, das 20 h de 09 de novembro de 2004 às 11 h de 10 de novembro de 2004, apura-se com a ferramenta *Data Set* o



estudo sobre os limites dos dois supostos eventos. O componente β de plasma apresenta dois picos durante o intervalo, um no início e outro no final do evento. Por isso, adicionamos uma hora à borda inicial e retiramos duas horas na borda final. Assim, o período de interesse foi das 21 h de 09 de novembro de 2004 às 09 h de 10 de novembro de 2004, apresentado na Figura 1.

No intervalo definido na Figura 1, o componente β de plasma é menor que 0,5. O campo magnético mostra uma rotação suave e um comportamento clássico referente a uma nuvem magnética. Contudo, nos componentes Blat e Blon há uma peculiaridade, pois o componente latitudinal apresenta um comportamento de norte para sul, identificando uma nuvem bipolar, ou seja, o campo magnético muda de sinal ao passar pelo satélite, e o longitudinal compreende uma ação de oeste para leste. Assim, impossibilitando a definição do tipo de tubo de fluxo.

Figura 1 - Quadro Data Set da nuvem catalogada no período: 21 h de 09 de novembro de 2004 às 09 h de 10 de novembro de 2004. Observe-se que H^+ é densidade de próton, H^+temp temperatura de prótons; H^e/H^+ razão entre partículas alfas e prótons; H^+speed velocidade de prótons. $Beta_p$ do plasma considerando apenas prótons, $|B|$ magnitude do campo magnético; B_{Lat} componente latitudinal do campo; e B_{Lon} componente longitudinal do campo magnético.

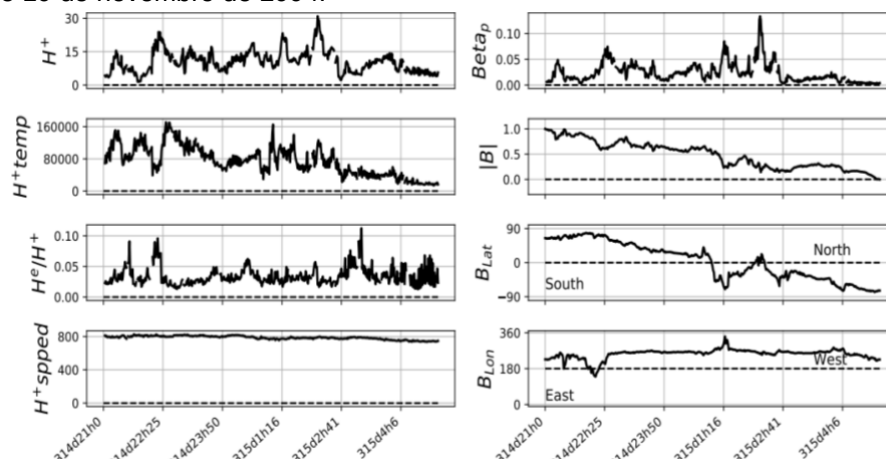


Fonte: Autor.

Dessa forma, ao analisar a componente Blon pode-se observar que a mudança na direção ocorre aproximadamente às 5 h. Então, considerando-se a identificação de Richardson *et al.* (2021) no intervalo, assume que o limite do primeiro evento seja das 21 h de 09 de novembro de 2004 às 05h de 10 de novembro de 2004, conforme a Figura 2.

Ao analisar a Figura 2, verifica-se que há todas as propriedades necessárias para a ocorrência de uma nuvem magnética. O componente Blat apresenta comportamento de norte (N) para sul (S), nuvem bipolar, e o componente Blon predominante ao oeste (W). Assim, por inspeção visual, é um tubo de fluxo do tipo NWS.

Figura 2- Quadro Data Set da nuvem catalogada no período: 21 h de 09 de novembro de 2004 às 05 h de 10 de novembro de 2004.



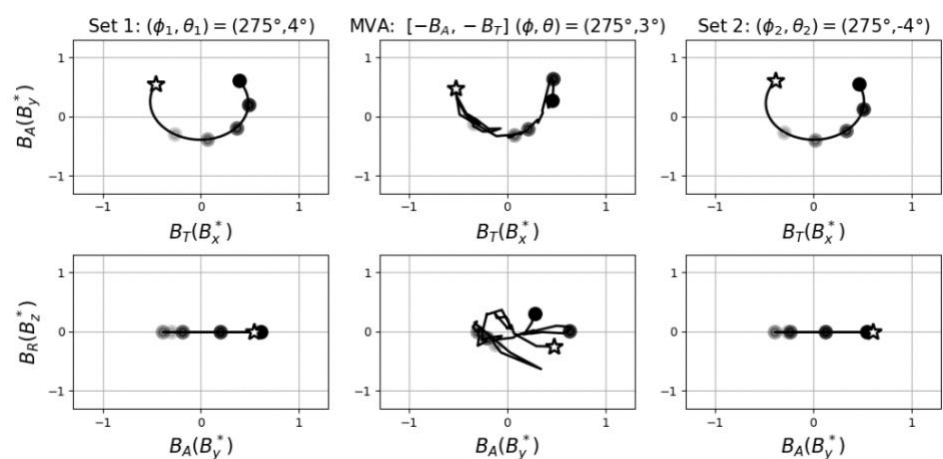
Fonte: Autor.



A Figura 3 apresenta o quadro obtido pelo botão *MVA Hodograms*. A função é encontrar a proposta ideal que melhor se ajusta ao caso real. Nesse evento, observa-se que houve necessidade de alterar o sinal dos componentes $B_A \times B_T$ para o *matching* entre os cenários. Ao modificar esses componentes para $-B_A \times -B_T$, ocorre o *matching* com o cenário 1 (esquerdo na Figura 3).

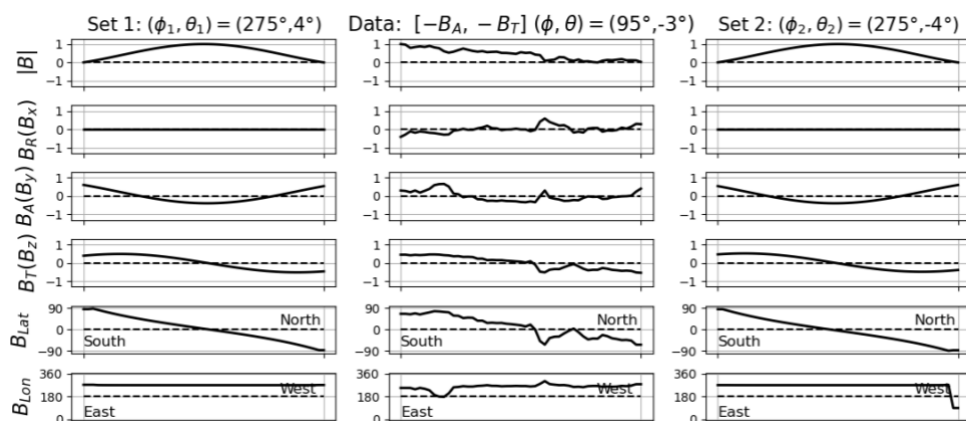
Observa-se na Figura 4, a tela *Axes Directions*, sua função confirma a decisão de melhor ajuste entre as rotações do modelo e o MVA para o *matching* entre os cenários ideal e real. Nesse caso, o *matching* ocorre com o cenário 1 (esquerdo na Figura 4).

Figura 3 - Quadro *MVA Hodograms* da nuvem catalogada no período: 21 h de 9 de novembro de 2004 às 05 h de 10 de novembro de 2004.



Fonte: Autor.

Figura 4 - Quadro *Axes Directions* da nuvem catalogada no período: 21 h de 9 de novembro de 2004 às 05 h de 10 de novembro de 2004.



Fonte: Autor.

Assim, ao analisar novamente a Figura 1, observa-se que no componente β de plasma há um aumento aproximadamente as 2 h do dia 10 de novembro de 2004, em seguida, ocorre um declínio nesse componente, como também uma interferência no componente B_{lat} nesse período. Dessa forma, pode-se considerar o limite para segunda nuvem das 3 h de 10 de novembro de 2004 às 09 h de 10 de novembro de 2004. Verifica-se que no quadro *Data Set*, o β de plasma é menor que 0,5, há uma rotação suave no campo magnético e os componentes B_{lat} e B_{lon} , mostram uma nuvem predominante ao sul (S) com o comportamento de oeste (W) a leste (E), indicando um tubo WSE, conforme a Figura 5.

Na tela *MVA Hodograms*, é necessário alterar os componentes $B_A \times B_T$. Ao modificar esses componentes, visto na Figura 6, para $-B_A \times B_T$ compreende que não ocorre o *matching* absoluto com as propostas, mas o cenário 1 apresenta aproximação mais adequada para o real. Além disso, no quadro obtido pelo botão *Axes Directions* (Figura 7), verifica-se o *matching* com o cenário 1 (esquerdo na Figura 7).

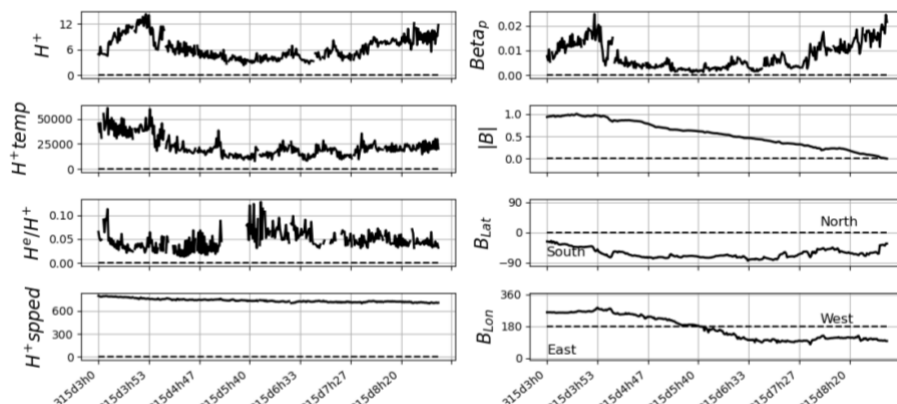


Site:
inicepg.univap.br
20 A 22 DE OUTUBRO

CIÊNCIA, SAÚDE E TECNOLOGIA:
AGENTES DE TRANSFORMAÇÃO E
CONSCIENTIZAÇÃO DA SOCIEDADE

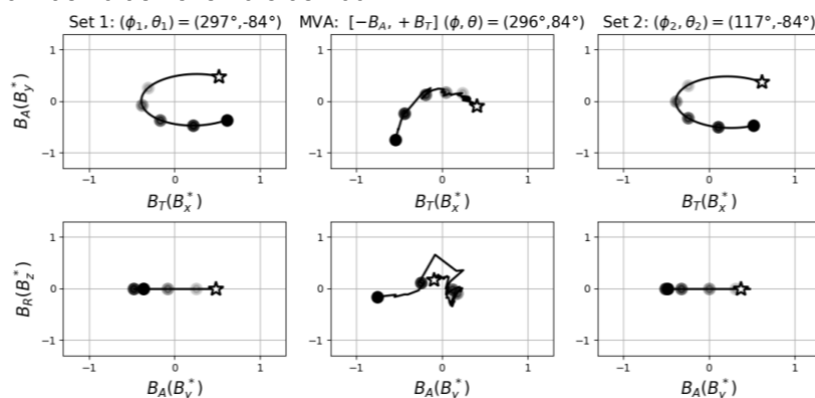
Observa-se ainda que, os planos de máxima e de mínima variância real não apresentam *matching* com os respectivos modelos. Este é um caso que entra na porcentagem deficitária do programa, conforme Oliveira (2021). No entanto, com o quadro *Data Set* e *Axes Directions*, assim como os resultados quantitativos obtidos, conclui-se a existência da nuvem magnética neste período.

Figura 5 - Quadro *Data Set* da nuvem catalogada no período: 03 h de 10 de novembro de 2004 às 09 h de 10 de novembro de 2004.



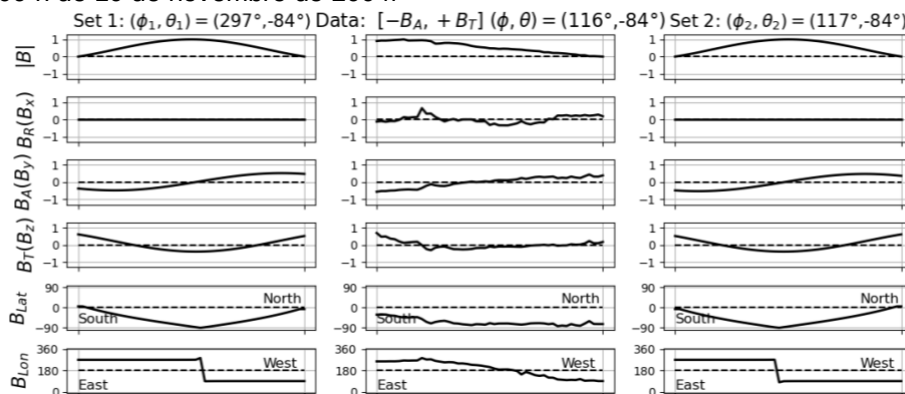
Fonte: Autor.

Figura 6 – Quadro *MVA Hodograms* da nuvem catalogada no período: 03 h de 10 de novembro de 2004 às 09 h de 10 de novembro de 2004.



Fonte: Autor.

Figura 7 – Quadro *Axes Directions* da nuvem catalogada no período: 03 h de 10 de novembro de 2004 às 09 h de 10 de novembro de 2004.



Fonte: Autor.

Discussão

Com base na análise na tela *Data Set*, *MVA Hodograms* e *Axes Directions*, é possível apontar os dois eventos no período de interesse da lista de Richardson *et al.* (2021), com seus inícios e finais dentro das propriedades necessárias para que sejam consideradas nuvens magnéticas, como também



os dados obtidos pela tela *MVA Results*, visto na Tabela 3, verifica-se os ângulos do eixo do tubo de fluxo, a consistência do MVA na razão de Lepping e Behannon (1980), na métrica de Oliveira *et al.* (2020) e no ângulo de rotação do campo magnético.

Tabela 3 – Resultados da análise dos eventos identificados:

Evento	Tipo	Início MC (Y/M/D, h)	Fim MC (Y/M/D, h)	(φ, θ)	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$	χ
1	NWS	2004/11/09, 21	2004/11/10, 09	275°, 4°	10,1	14,4	138.32°
2	WSE	2004/11/10, 03	2004/11/10, 09	297°, -84°	2,0	5,1	120.76°

Fonte: Autor.

Primeiramente, houve uma nuvem com um comportamento de Norte para Sul mantendo-se ao Oeste, com o componente β de plasma em torno de 0,10. Ao aproximar-se das 3 h do dia 10 de novembro de 2004, a perturbação do campo magnético está se normalizando quando há ocorrência de outra nuvem predominantemente ao Sul com o comportamento de Oeste a Leste, de forma que houve uma diminuição do β de plasma que estava em ambiente de cerca de 0,10 para 0,02, de modo que, confirma a sobreposição da segunda à anterior.

Conclusão

O trabalho afirmou-se na caracterização das duas nuvens magnéticas sobrepostas, identificadas no período de 9 de novembro de 2004 às 21 horas e 10 de novembro de 2004 às 09 horas. De forma, conforme foi expresso na lista de Richardson *et al.* (2021) que indica a possibilidade da ocorrência de dois eventos, mas não define seus limites. Por fim, observou-se a importância da utilização do software AMCD (OLIVEIRA, 2021) para o estudo e análise das nuvens magnéticas.

Referências

- BURLAGA, L. et al. **Magnetic loop behind an interplanetary shock - Voyager, Helios, and IMP 8 observations.** J. Geophys. Res., v. 86, p. 6673–6684, aug 1981.
- BURLAGA, L. F. **Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha.** J. Geophys. Res., v. 93, p. 7217–7224, Jul 1988.
- CID, C. et al. **Plasma and Magnetic Field Inside Magnetic Clouds: a Global Study.** Solar Phys., v. 207, n. 1, p. 187–198, May 2002.
- CHINCHILLA, T. et al. **Elliptic-cylindrical Analytical Flux Rope Model for Magnetic Clouds.** Astrophys. J., v. 861, n. 2, p. 139, jul. 2018.
- CHINCHILLA, T., Jian, L.K., Balmaceda, L. et al. **Unraveling the Internal Magnetic Field Structure of the Earth-directed Interplanetary Coronal Mass Ejections During 1995 – 2015.** Sol Phys 294, 89 (2019).
- FARRUGIA, C. J.; Osherovich, V. A.; Burlaga, L. F. **Magnetic flux rope versus the spheromak as models for interplanetary magnetic clouds.** J. Geophys. Res., v. 100, n. A7, p. 12293–12306, Jul 1995.
- HUTTUNEN, K. E. J. et al. **Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23.** Ann. Geophys., v. 23, p. 625–641, fev. 2005.
- MARUBASHI, K. **Structure of the interplanetary magnetic clouds and their solar origins.** Adv. Space. Res., v. 6, p. 335–338, Jan 1986.
- MARUBASHI, K.; Lepping, R. P. **Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylinder-shaped flux rope models.** Ann. Geophys., v. 25, p. 2453–2477, nov 2007.
- OLIVEIRA, R. A. R. et al. **New Metric for Minimum Variance Analysis Validation in the Study of Interplanetary Magnetic Clouds.** Solar Phys. 295, n. 3, p. 45, mar. 2020.
- OLIVEIRA, R. A. R. **Caracterização geométrica de nuvens magnéticas interplanetárias por meio de experimentos computacionais.** 134 p. Tese (Doutorado) – Curso de Física e Astronomia. Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2021.
- RICHARDSON, I. G., & Cane, H. V. **Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 – 2009): Catalog and Summary of Properties.** Solar Physics, 264(1), 189–237. 2010.