MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.02.18.43-TDI

DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES E TEMPOS DE CHEGADA DE EJEÇÕES CORONAIS DE MASSA DIRECIONADAS PARA A TERRA UTILIZANDO O MÉTODO CORSET

Amanda Lúcia Mesquita

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Alisson Dal Lago, e Carlos Roberto Braga, aprovada em 30 de outubro de 2017.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PNL7CH>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):
Presidente:
Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Membros:
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)
André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.02.18.43-TDI

DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES E TEMPOS DE CHEGADA DE EJEÇÕES CORONAIS DE MASSA DIRECIONADAS PARA A TERRA UTILIZANDO O MÉTODO CORSET

Amanda Lúcia Mesquita

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Alisson Dal Lago, e Carlos Roberto Braga, aprovada em 30 de outubro de 2017.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PNL7CH>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Mesquita, Amanda Lúcia.

M562d Determinação de velocidades e tempos de chegada de ejeções coronais de massa direcionadas para a Terra utilizando o método CORSET / Amanda Lúcia Mesquita. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxiv + 103 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/10.02.18.43-TDI)

Dissetação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Alisson Dal Lago, e Carlos Roberto Braga.

1. Ejeções coronais de massa. 2. CME halo. 3. Velocidade de expansão lateral. 4. Tempo de chegada. 5. COSERT. I.Título.

CDU 523.947

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): ***Amanda Lúcia Mesquita***

Título: "DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES E TEMPOS DE CHEGADA DE EJEÇÕES CORONAIS DE MASSA DIRECIONADAS PARA A TERRA UTILIZANDO O MÉTODO CORSET"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de ***Mestre*** em

Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre

Dr. Cristiano Max Wrasse

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Alisson Dal Lago

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Carlos Roberto Braga

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Joaquim Eduardo Rezende Costa

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Jean Pierre Raulin

Convidado(a) / CRAAM/Mackenzie / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 30 de outubro de 2017

"Acima de tudo, não tema os momentos difíceis. O melhor vem deles."

Rita Levi-Montalcini
em *"As Cientistas"*, 2017

Para minha família

AGRADECIMENTOS

Obrigada ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

Nessa dissertação as imagens coronais foram obtidas pelo instrumento LASCO (*Large Angle Spectrometric Coronagraph*), construído por um consórcio composto pelo *Naval Research Laboratory* (Washington DC, Estados Unidos), o *Max-Planck Institute for Solar System Research* (Gottingen, Alemanha), o *Laboratoire d'Astronomie Spatiale* (Marseille, França) e o *Space Research Group* na Universidade de Birmingham (Birmingham, Reino Unido). O LASCO é um conjunto de instrumentos a bordo do SOHO (*Solar Heliospheric Observatory satellite*), que é um projeto de cooperação internacional entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e a ESA (*European Space Agency*).

Obrigada à NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) pela disponibilização das imagens do instrumento LASCO-C3 utilizadas neste trabalho e disponível no site `https://seal.nascom.nasa.gov/cgi-bin/gui_plop`.

Obrigada aos desenvolvedores da Lista de ICMEs utilizada nessa dissertação Ian Richardson e Hilary Cane.

Obrigada aos catálogos CDAW (*Coordinated Data Analysis Workshops*) e CACTus (*Computer Aided CME Tracking*) pelos dados utilizados nesta dissertação.

Obrigada aos desenvolvedores do método CORSET (*CORonal SEgmantation Technique*) Norberto Goussies e Guilhermo Stenborg.

RESUMO

Ejeções coronais de massa, do inglês *Coronal Mass Ejections* (CMEs), são grandes estruturas constituídas de plasma e campo magnético que são expelidas pelo Sol na heliosfera. CMEs na direção Sol-Terra, denominadas CMEs do tipo halo, são a principal causa de tempestades geomagnéticas. Prever a chegada de CMEs na Terra é necessário para evitar danos ou falhas em sistemas tecnológicos amplamente utilizados, como as redes de transmissão de energia elétrica. Entretanto, a maneira como observamos as CMEs nos impede de fazer medidas diretas da velocidade de propagação frontal, necessária para descrever cinematicamente esse fenômeno. Schwenn et al. (2001) e Schwenn et al. (2005) propuseram o uso da velocidade de expansão lateral das CMEs como aproximação para a velocidade radial de propagação, obtendo bons resultados para predição do tempo de viagem de CMEs na direção da Terra. Neste trabalho, calculamos as velocidades de expansão lateral para um conjunto de 36 eventos utilizando um algoritmo computacional chamado CORonal SEgmatation Technique (CORSET), que rastreia a CME e calcula parâmetros cinemáticos, como as velocidades radial e de expansão. Os tempos de chegada das CMEs foram obtidos com base em observações de correspondentes interplanetários de CMEs nas vizinhanças da Terra e comparados com os tempos calculados a partir de um modelo empírico. A partir dos resultados dos 36 eventos obtivemos uma relação empírica para determinar tempos de chegada de CMEs, descrita pela expressão $T_{tr} = 174,98 - 16,40 \times \ln(V_{exp})$, onde V_{exp} é a velocidade de expansão.

Palavras-chave: Ejeções coronais de massa. CME halo. Velocidade de expansão lateral. Tempo de chegada. COSERT.

DETERMINATION OF CORONAL MASS EJECTION VELOCITY AND TRAVEL TIME TO EARTH USING CORSET METHOD

ABSTRACT

Coronal Mass Ejections (CMEs) are large structures constituted of plasma and magnetic field that are expelled by the Sun into the heliosphere. CMEs pointing along the Sun-Earth line, called halo CMEs, are the main cause of geomagnetic storms. It is necessary to forecast the arrival of CMEs at Earth to avoid damages or failures in commonly used technological systems, such as power grids system. However, the way that we see the CMEs prevents us from making direct measurements of the frontal propagation speed necessary to kinematically describe this phenomenon. Schwenn et al. (2001) and Schwenn et al. (2005) proposed the use of the lateral expansion speed of the CMEs as a proxy to the radial speed. They obtained good results to predict the travel time of CMEs towards Earth. In this work, we calculate the expansion speed for a set of 36 events using a computational algorithm called CORonal SEgmatation Technique (CORSET), which tracks the CME and calculates kinematic parameters, such as radial and expansion speeds. The arrival times were obtained based on observations of interplanetary counterparts of CMEs in the vicinity of the Earth and compared to the arrival times calculated by using an empirical model. From the results of the 36 events we obtained an empirical model to determine arrival times of CMEs, described by the expression $T_{tr} = 174,98 - 16,40 \times \ln(V_{exp})$, where V_{exp} is the expansion speed.

Keywords: Coronal mass ejections. Halo CME. Expansion speed. Travel time. CORSET.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 Perfis de temperatura e densidade das regiões da atmosfera solar. 1
1.2 Exemplo de uma ejeção coronal de massa observada pelo coronógrafo LASCO-C3. 3
1.3 CMEs do tipo Halo. 8
1.4 Geometria do Espalhamento Thomson. 10
1.5 Esquema de ICME antecedida por um choque. 11
1.6 ICME observada nas vizinhanças da Terra pelo satélite ACE em agosto de 2000. 12

2.1 Definição do plano principal e do plano de fundo no CORSET. 17
2.2 CME halo rastreada pelo CORSET. 18
2.3 Exemplo de uma CME fraca. 21
2.4 Exemplo de uma CME fraca rastreada pelo CORSET. 22
2.5 Exemplo de uma CME rastreada incorretamente pelo CORSET devido a presença de outra CME. 23

4.1 Esboço exemplificando como as distâncias frontal e lateral de uma CME são definidas. 37
4.2 Rastreamento do CORSET para CME observada em 2002/09/17. 41
4.3 Velocidade radial em função do ângulo para 2002/09/17 - CORSET. . . . 42
4.4 Velocidade radial em função do ângulo para 2002/09/17 - CACTus. . . . 43
4.5 Distância em raios solares em função do tempo para 2002/09/17 - CORSET. 44
4.6 Distância em raios solares em função do tempo para 2002/09/17 - CDAW. 45
4.7 Expansão lateral em raios solares em função do tempo para 2002/09/17. 46
4.8 Rastreamento do CORSET para CME observada em 2006/07/06. 47
4.9 Velocidade radial em função do ângulo para 2006/07/06 - CORSET. . . . 48
4.10 Velocidade radial em função do ângulo para 2006/07/06 - CACTus. . . . 49
4.11 Distância em raios solares em função do tempo para 2006/07/06 - CORSET. 50
4.12 Distância em raios solares em função do tempo para 2006/07/06 - CDAW. 51
4.13 Expansão lateral em raios solares em função do tempo para 2006/07/06. 52
4.14 Rastreamento do CORSET para CME observada em 2011/09/06. 53
4.15 Velocidade radial em função do ângulo para 2011/09/06 - CORSET. . . . 54
4.16 Velocidade radial em função do ângulo para 2011/09/06 - CACTus. . . . 55

4.17 Distância em raios solares em função do tempo para 2011/09/06 - CORSET. 56
4.18 Distância em raios solares em função do tempo para 2011/09/06 - CDAW. 57
4.19 Expansão lateral em raios solares em função do tempo para 2011/09/06. 58
4.20 Exemplo de evento em que o ajuste linear não foi considerado correto. Distância em raios solares em função do tempo para 2013/09/29. 60

5.1 Velocidade média do choque para 1 AU em função da velocidade radial. . 67
5.2 Tempo de chegada do choque versus velocidade radial. 68
5.3 Tempo de chegada da ICME em função da velocidade radial. 69
5.4 Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do contorno. 70
5.5 Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'. 71
5.6 Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico. 72
5.7 Tempo de chegada do choque em função da velocidade de expansão lateral do contorno. 74
5.8 Tempo de chegada da ICME em função da velocidade de expansão lateral do contorno. 75
5.9 Tempo de chegada do choque em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'. 76
5.10 Tempo de chegada da ICME em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'. 77
5.11 Tempo de chegada do choque em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico. 78
5.12 Tempo de chegada da ICME em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico. 79
5.13 Velocidade média do choque para 1 AU em função da velocidade radial. . 92
5.14 Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do contorno. 93

LISTA DE TABELAS

Pág.

2.1 Representação de uma imagem 4×4 com níveis de cinza entre 0 e 3. . . . 15
2.2 Combinações possíveis entre pixels vizinhos para os quatro níveis de cinza. 16

3.1 Eventos pré-selecionados da Lista de ICMES de Richardson e rastreados utilizando o método CORSET. 29

5.1 Eventos Rastreados Corretamente pelo CORSET. 63
5.2 Comparação entre tempos de chegada estimados pela lista de ICMEs e tempos calculados pelo modelo empírico de Schwenn et al. (2005). 81
5.3 Comparação entre tempos de chegada estimados pela lista de ICMEs e tempos calculados pela equação $T_{trCS} = 174,98 - 16,40 \ln(V_{expC})$. 85
5.4 Comparação entre as velocidades radial e as incertezas associadas. 89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACE	–	Advanced Composition Explorer
AU	–	Astronomical Unit (Unidade Astronômica)
CME	–	Coronal Mass Ejections (Ejeção Coronal de Massa)
CORSET	–	CORonal SEgmentation Technique
DN	–	números digitais
FITS	–	Flexible Image Transport System
GLCM	–	gray-level co-occurrence matrix (matriz de co-ocorrência de nível de cinza)
GPS	–	Global Positioning System
ICME	–	Interplanetary Coronal Mass Ejection (Ejeção Coronal de Massa Interplanétaria)
IDL	–	Interactive Data Language
IMP-8	–	Interplanetary Monitoring Platform-8
LASCO	–	Large Angle Spectroscopic Coronograph
LOS	–	Line of Sight (Linha de Visada)
MICA	–	Mirror Coronograph for Argentina
MLSO	–	Mauna Loa Solar Observatory
OSO-7	–	Seventh Orbiting Solar Observatory
PA	–	Ângulo de posição central
SMM	–	Solar Maximum Mission
SOHO	–	Solar and Heliospheric Observatory
STEREO	–	Solar Terrestrial Relations Observatory
SWICS	–	Solar Wind Ion Composition Spectrometer
UT	–	Universal Time

LISTA DE SÍMBOLOS

$R_\odot$	–	raio solar
R	–	distância ente o Sol e o observador
r	–	distância entre o Sol e um determinado elétron
d	–	raio de impacto
ϵ	–	elongação
χ	–	ângulo entre a linha de visada e a linha radial através do elétron espalhado
ϕ	–	longitude em relação ao limbo solar
R_a	–	distância de propagação radial de uma CME
E	–	distância da expansão lateral de uma CME
V_{rad}	–	velocidade de propagação radial
V_{exp}	–	velocidade de expansão lateral
T_{tr}	–	tempo de viagem

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Definição de Ejeções Coronais de Massa 4
1.2 Propriedades das CMEs 4
1.3 CMEs Halo 6
1.4 Espalhamento Thomson na Coroa Solar 8
1.5 Ejeção Coronal de Massa Interplanetária 10
1.6 Objetivos 13
1.7 Estrutura da Dissertação 14

2 CORONAL SEGMENTATION TECHNIQUE 15
2.1 Matriz de Co-ocorrência de Nível de Cinza 15
2.2 Rastreamento 16
2.3 Limitações do Algoritmo 19

3 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS EVENTOS 25
3.1 Catálogo de ICMEs de Richardson e Cane 26
3.2 Imagens do LASCO-C3 26
3.3 Eventos Pré-selecionados da Lista de ICMES de Richardson 27

4 VELOCIDADES RADIAL E DE EXPANSÃO 37
4.1 Velocidade Radial 37
4.2 Velocidade de Expansão Lateral 39
4.3 Estudo de Alguns Eventos 40
4.3.1 Evento I - CME observada em 2002/09/17 40
4.3.2 Evento II - CME observada em 2006/07/06 46
4.3.3 Evento III - CME observada em 2011/09/06 52
4.4 Ressalvas na Estimativa das Incertezas 59

5 RESULTADOS 61
5.1 Relação entre a Velocidade Radial e a Velocidade Média do Choque . . . 66
5.2 Relação entre os Tempos de Chegada e a Velocidade Radial 67
5.3 Relação entre as Velocidades Radial e de Expansão Lateral 70
5.4 Relação entre os Tempos de Chegada e as Velocidades de Expansão Lateral 73

5.4.1 Método associado ao contorno 73
5.4.2 Método associado ao 'ajuste suave' 75
5.4.3 Método associado ao ajuste parabólico 77
5.5 Tempos de Chegada 79
5.6 Sobre as Incertezas Associadas a Velocidade Radial 88

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 95

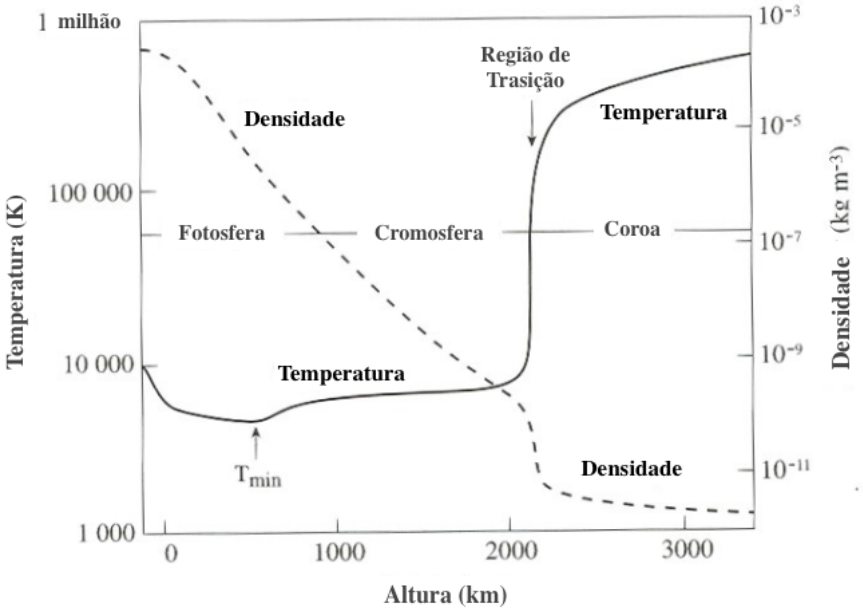
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

1 INTRODUÇÃO

Estruturalmente o Sol pode ser divido em camadas, a partir do interior, ele é constituído pelo núcleo, zona radiativa, zona convectiva e sua atmosfera. A atmosfera solar ainda pode ser subdivida em regiões denominadas: fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa (KIVELSON; RUSSELL, 1995).

A fotosfera é a camada visível do Sol, ela irradia a maior parte da energia solar e seu brilho é intenso, impossibilitando que a cromosfera e a coroa sejam visíveis. Em comparação com as demais regiões da atmosfera solar, a fotosfera é a região mais estreita, com espessura aproximada de $500\,km$, e possui uma densidade elevada de $10^{23}\,m^{-3}$ (KIVELSON; RUSSELL, 1995; CREMADES, 2005). Acima da fotosfera situa-se a cromosfera, rarefeita e mais transparente, possui uma densidade de $10^{17}\,m^{-3}$ e a coroa interna que possui uma densidade de $10^{15}\,m^{-3}$ (KIVELSON; RUSSELL, 1995). Ao contrário da densidade, que diminui com altura, a temperatura possui o comportamento oposto, de modo que a região com maior temperatura é a coroa, como evidenciado pela Figura 1.1.

Figura 1.1 - Perfis de temperatura e densidade das regiões da atmosfera solar.



Perfis de temperatura e densidade em função da altura para as regiões da atmosfera solar.

Fonte: Cremades (2005).

A coroa é a região mais externa que compõe a atmosfera solar. Constituída por um gás ionizado de baixa densidade (CREMADES, 2005), a coroa é observável quando bloqueia-se a luz fotosférica, podendo ser observada em luz branca, ultravioleta, raio-x e radio.

A coroa passou a ser conhecida por meio de eclipses totais, situação em que a Lua fica entre a Terra e o Sol ocultando o disco solar. Antes de 1900, a única maneira de estudar a coroa solar era por meio de eclipses. Entretanto, eclipses são fenômenos que ocorrem com pouca frequência e estudar as características da coroa era uma tarefa árdua.

Bernard Lyot foi quem propôs e efetivamente construiu um instrumento capaz de observar a parte mais externa do Sol, a coroa. O coronógrafo, como é denominado, consiste basicamente de um telescópio capaz de promover eclipses totais artificiais (BRUECKNER et al., 1995; CREMADES, 2005). O coronógrafo captura a luz fotosférica espalhada pelos elétrons livres presentes na coroa solar (CREMADES, 2005).

Das primeiras observações da coroa, acreditava-se que ela era estática ou quase-estática, hoje sabe-se que ela é altamente dinâmica, sendo habitual observar variações que ocorrem na ordem de minutos a horas (CREMADES, 2005). Dos fenômenos que ocorrem na atmosfera solar podemos citar as ejeções coronais de massa (CMEs), flares e proeminências. O foco deste trabalho concentra-se no estudo das CMEs.

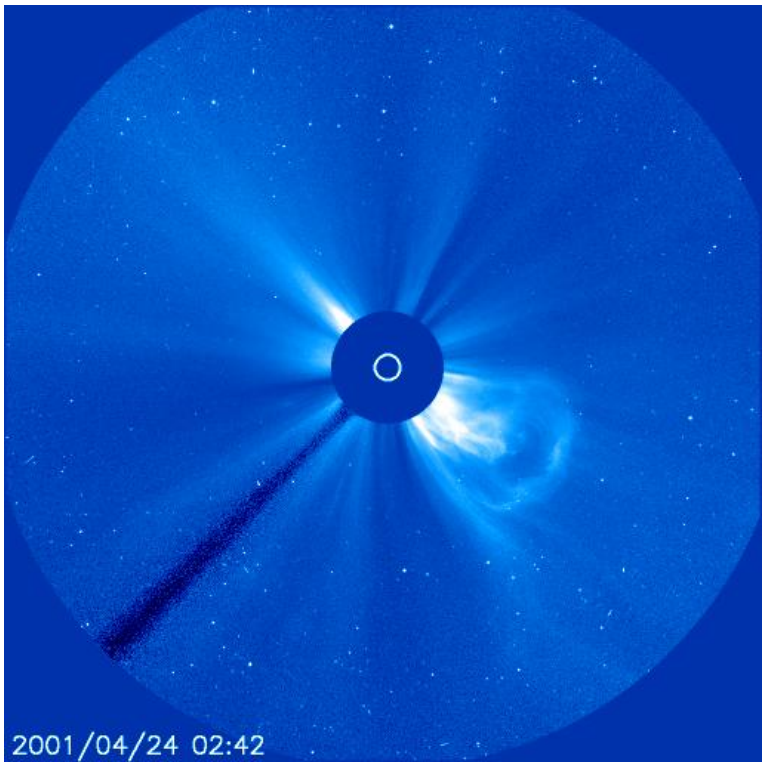
CMEs são fenômenos eruptivos de grande escala, constituídos de plasma e campo magnético, que são expelidas pelo Sol na heliosfera. CMEs na direção da Terra são especialmente importantes pois, além de proporcionar belíssimas auroras, podem desencadear tempestades geomagnéticas, podendo comprometer sistemas tecnológicos, causar danos na rede elétrica e em satélites. Além disso, CMEs com altas velocidades podem acelerar partículas energéticas (CANE; LARIO, 2006) que afetam equipamentos eletrônicos.

A primeira observação de uma CME foi feita pelo coronógrafo a bordo do OSO-7 (*Seventh Orbiting Solar Observatory*) no início dos anos 70 (WEBB; HOWARD, 2012). Após a primeira observação, muitos outros coronógrafos espaciais fizeram observações de CMEs com melhor resolução e por longos períodos de tempo, como Skylab, P78-1 (Solwind) e SMM (*Solar Maximum Mission*) (BRUECKNER et al., 1995; CREMADES, 2005; WEBB; HOWARD, 2012).

No fim do ano de 1995 a missão SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) foi

lançada e está em órbita próxima à Terra no ponto lagrangiano L1, onde a combinação da gravidade da Terra e do Sol mantém o SOHO numa órbita semi-estável, próxima à linha Sol-Terra. Nesse ponto, a visão do Sol é ininterrupta, possibilitando a observação contínua da coroa solar, e consequentemente, a observação de inúmeras CMEs. A bordo do SOHO está situado um conjunto de três coronógrafos C1, C2 e C3, denominado LASCO (*Large Angle Spectroscopic Coronograph*) (BRUECKNER et al., 1995). Os coronógrafos LASCO produzem juntos uma imagem da coroa solar de $1.1\,R_\odot$ até $30\,R_\odot$ (C1: $1.1 - 3\,R_\odot$, C2: $1.5 - 6\,R_\odot$, e C3: $3.7 - 30\,R_\odot$). Apenas os coronógrafos LASCO-C2 e C3 permanecem em funcionamento. A Figura 1.2 mostra uma ejeção coronal de massa observada pelo coronógrafo LASCO-C3 no dia 24 de abril de 2001.

Figura 1.2 - Exemplo de uma ejeção coronal de massa observada pelo coronógrafo LASCO-C3.



O círculo branco indica o disco solar, o disco azul interno corresponde ao ocultador do coronógrafo LASCO-C3 e o disco azul externo corresponde ao campo de visada do LASCO-C3.

Fonte: https://sohowww.nascom.nasa.gov/

Em 2006, outros dois coronógrafos a bordo das STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*) se juntaram ao LASCO e fazem observações da coroa de ângulos distintos (HOWARD et al., 2008).

Coronógrafos terrestres complementam as observações feitas por coronógrafos espaciais, como o coronógrafo MICA (*Mirror Coronograph for Argentina*) (STENBORG, 2000) e o MLSO (*Mauna Loa Solar Observatory*). Contudo, os coronógrafos terrestres são limitados pois sofrem interferência da atmosfera terrestre como dias nublados.

1.1 Definição de Ejeções Coronais de Massa

No início dos anos 70, o coronógrafo a bordo do OSO-7 observou um fenômeno que hoje é conhecido como ejeção coronal de massa (CME). O termo CME foi usado pela primeira vez por Hundhausen et al. (1984), embora, segundo Schwenn (1996), o termo não estivesse vinculado a uma ejeção coronal de massa. Em 1984, o termo ejeção coronal de massa foi cientificamente definido [1], como sendo uma mudança observável na estrutura coronal (1) ocorrendo em uma escala de tempo de alguns minutos a várias horas, (2) envolvendo o aparecimento (e movimento 'para fora') de uma nova, discreta, brilhante, estrutura em luz branca no campo de visada do coronógrafo (HUNDHAUSEN et al., 1984; SCHWENN, 1996).

A definição de CME acima refere-se apenas ao aspecto observacional do fenômeno, sendo desconsideradas as causas, o que desencadeia a CME, assim como sua estrutura. Schwenn (1996) ressalta ainda que a definição acima não específica nada relacionado à massa da CME ser proveniente da coroa, em contraste com o termo *coronal mass ejection* que sugere que massa das CMEs é proveniente da coroa.

Cremades (2005) define as ejeções coronais de massa, levando em consideração o processo físico, como sendo enormes erupções de plasma ejetadas pelo Sol no espaço interplanetário, podendo durar da ordem de minutos a várias horas.

1.2 Propriedades das CMEs

As propriedades da CME como massa, energia, abertura angular, localização e velocidade podem ser estimadas por meio das observações coronais em luz branca.

Existem diversos trabalhos estudando propriedades de grandes grupos de CMEs em períodos que se estendem por mais um ciclo solar. Há um grande volume de proprie-

[1] tradução livre feita pelo autor.

dades catalogadas, porém há discrepâncias entre os diversos resultados dependendo da metodologia adotada.

Há diversos catálogos disponíveis com propriedades de CMEs tais como períodos de observação, velocidade, aceleração, posição angular, dentre outros. Um destes catálogos é conhecido como CDAW (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html), um catálogo de CMEs do LASCO produzido manualmente. Outro exemplo de catálogo é o CACTus (http://sidc.oma.be/cactus/), um catálogo de CMEs, do LASCO e recentemente das STEREO, detectadas por meio de softwares sem supervisão que fornecem informações sobre as propriedades das CMEs tais como velocidade, localização e frequência de ocorrência. No CACTus a detecção das CMEs é feita pelo software como cortes brilhantes em mapas de tempo e altura usando a transformada de Hough (ROBBRECHT; BERGHMANS, 2004). Um terceiro exemplo de catálogo é o catálogo de CMEs de Múltiplas Visadas - MVC (do inglês *Multi-View CME Catalog*) (VOURLIDAS et al., 2017) (http://solar.jhuapl.edu/Data-Products/COR-CME-Catalog.php). No catálogo MVC, a detecção de propriedades cinemáticas das CMEs é feita utilizando a técnica CORSET em dados das sondas STEREOs.

Segundo Webb e Howard (2012), a frequência com que as CMEs são observadas em luz branca varia com o ciclo solar tanto em fase quanto em amplitude. Além das causas de origem solar, o número de CMEs observadas durante um mesmo ciclo solar pode variar dependendo do catálogo de CMEs. Por exemplo, analisando as observações feitas pelo CACTus e pelo CDAW, encontra-se que o CACTus detecta diariamente mais CMEs do que o CDAW (WEBB; HOWARD, 2012). Essa diferença ocorre também quando outras propriedades das CMEs são analisadas, e em geral, está associada ao tipo de análise que cada catálogo faz.

A localização das CMEs no disco solar também varia com o ciclo solar, no mínimo solar as CMEs tendem a aparecer mais próximas as latitudes equatoriais, próximas ao centro do disco solar, enquanto no máximo solar elas aparecem em todas as latitudes (CREMADES, 2005).

As aberturas angulares das CMEs podem variar de alguns graus, para CMEs similares a um jato e que são denominadas *narrow jet*, até 360°, para CMEs que circundam todo o disco ocultador do coronógrafo e são denominadas *full halo* (HOWARD et al., 1982; CREMADES, 2005; SCHWENN, 2006; WEBB; HOWARD, 2012). A abertura angular da CME é definida em relação ao campo de visada de um determinado coronógrafo a partir de um determinado ponto de observação. A maioria das CMEs mantém

a abertura angular aproximadamente constante no campo de visada de um determinado coronógrafo, de forma que sua propagação pela heliosfera é auto-semelhante (SCHWENN et al., 2005).

Para estimar a massa de uma CME é necessário fazer uma conversão entre a intensidade observada pelo coronógrafo para a densidade de elétrons, usando a física do Espalhamento Thomson (VOURLIDAS et al., 2002; VOURLIDAS; HOWARD, 2006). A quantidade média de massa das CMEs estimada pelos coronógrafos Skylab, SMM e Solwind é da ordem de $10^{12}\,kg$. O LASCO consegue identificar CMEs com quantidade de massa da ordem $10^{10}\,kg$, sendo a quantidade média de massa estimada pelo LASCO de aproximadamente $1.7\times10^{12}\,kg$ (VOURLIDAS et al., 2002; WEBB; HOWARD, 2012). Uma CME se propaga no campo de visada do coronógrafo transportando uma quantidade média de energia cinética da ordem de $10^{23}\,J$ (VOURLIDAS et al., 2002).

Os dados catalogados indicam que a velocidade frontal de uma CME varia entre $200\,km/s$ e valores maiores que $2000\,km/s$ (SCHWENN et al., 2005; WEBB; HOWARD, 2012). Medir a velocidade radial de propagação de CMEs utilizando observações apenas dos coronógrafos LASCO é uma tarefa difícil devido ao efeito de projeção do espalhamento Thomson. Em geral, essas medidas são bem sucedidas para CMEs no limbo solar. Para outras CMEs, observadas pelo LASCO, a velocidade medida é a velocidade projetada no plano do céu (DAL LAGO et al., 2003; SCHWENN et al., 2005; GOPALSWAMY et al., 2009; DAL LAGO et al., 2013).

1.3 CMEs Halo

CMEs podem exibir uma variedade de estruturas e formas. A estrutura clássica de três partes, conhecida como *light bulb* CME, Figura 1.2, é geralmente interpretada como sendo constituída por um *loop* brilhante exterior, seguido por um vazio escuro e um núcleo brilhante (SCHWENN, 2006). Essa topologia é bastante comum (HUNDHAUSEN, 1987). Outras CMEs podem exibir uma geometria mais complexa e assimétrica (WEBB; HOWARD, 2012). Vourlidas et al. (2012) propuseram uma classificação para as CMEs com base nas observações feitas pelos coronógrafos LASCO que leva em consideração o tipo de morfologia que as CMEs apresentam. A classificação é dividida em:

- *Flux rope*: CMEs que exibem a estrutura clássica de três partes.
- *Loop*: CMEs com um *loop* filamentar brilhante, mas sem o núcleo ou cavidade.

- *Jet*: CMEs estreitas, com abertura angular inferior a 40°.
- *Failed*: Eventos que aparecem no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2 e são suficientemente brilhantes para serem classificadas como CMEs, mas não aparecem no campo de visada do LASCO-C3.
- *Outflow*: Eventos com abertura angular maiores que os *jets*, sem um *loop* frontal ou cavidade bem definidos.
- *Unknown*: Contém os eventos com poucas observações e os que não podem ser classificados nas demais categorias devido à observações precárias, como *gaps* nas imagens ou a presença de raios cósmicos.

Uma classificação morfológica das CMEs com base em observações pode ser ambígua devido ao efeito de projeção da linha de visada do coronógrafo. De modo que uma mesma CME pode apresentar uma estrutura diferente no campo de visada dos coronógrafos LASCO e outra no STEREO/COR2-B, por exemplo.

No que se refere a forma, é frequente o uso dos termos *halo*, *partial halo* e *limb* para classificar uma CME. Uma CME é denominada *full* halo (halo completa) quando, pelo menos, em uma imagem, ela é observada circundando todo o disco ocultador do coronógrafo. A Figura 1.3 mostra uma CME halo observada pelo LASCO-C3 em 28 de outubro de 2003. Para ser denominada *partial* halo (halo parcial) uma CME deve possuir abertura angular de pelo menos 120° (SCHWENN et al., 2005; WEBB; HOWARD, 2012), a Figura 1.3 mostra uma CME *partial* halo observada pelo LASCO-C3 em 5 de novembro de 2004. Entretanto, uma mesma CME pode ser observada como sendo uma halo ou uma *partial* halo, ou ainda uma *limb*, dependendo do ponto de observação.

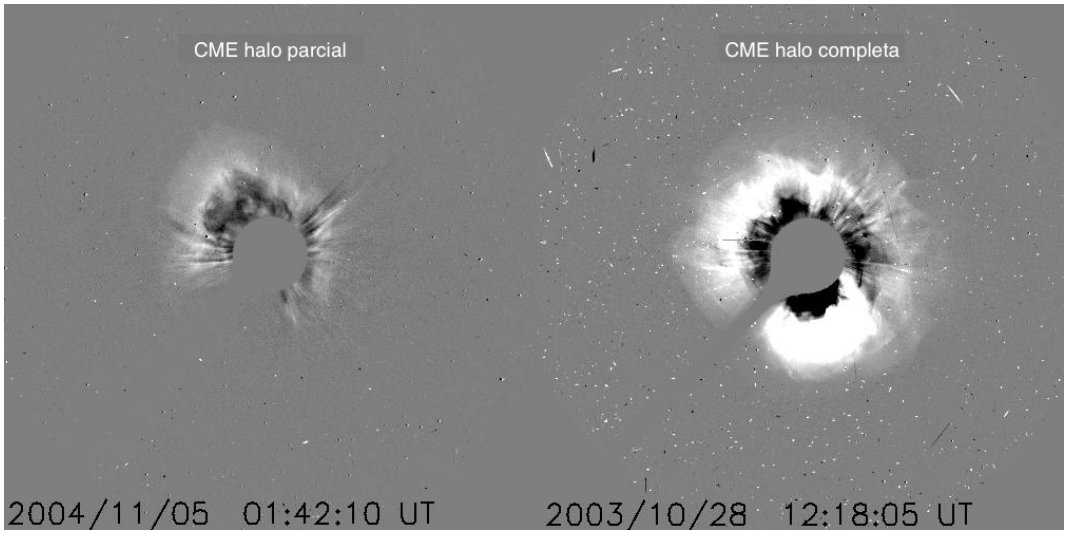
CMEs halo se propagam na heliosfera aproximadamente na direção paralela ou anti-paralela a linha Sol-Observador. Na direção paralela, quando ocorrem no lado do Sol voltado para o observador, são denominadas halos frontais. Já na direção anti-paralela, quando ocorrem no lado do Sol oposto ao observador, são denominadas *backsided* halo. As CMEs halo ocorrem majoritariamente em regiões localizadas a algumas dezenas de graus do centro do Sol, vista da perspectiva do observador (WEBB; HOWARD, 2012).

No caso do coronógrafo LASCO, que está localizado no ponto de equilíbrio de Lagrange L1, e portanto, está próximo a linha Sol-Terra, CMEs observadas como halos são direcionadas para a Terra se forem frontais. Estas estruturas são consideradas

as principais causas tempestades geomagnéticas intensas (SCHWENN, 2006; WEBB; HOWARD, 2012).

Segundo Webb e Howard (2012) CMEs halo, *partial* ou *full*, correspondem a aproximadamente 10 % do total de CMEs observadas. Fazendo a mesma análise apenas para as CMEs *full* halo, com abertura angular de 360 °, encontra-se um valor de 4 % em relação as demais CMEs.

Figura 1.3 - CMEs do tipo Halo.



CMEs do tipo halo observada pelo coronógrafo LASCO-C3. Painel esquerdo: *partial* halo CME com abertura angular superior a 120°. Painel direito: CME *full* halo com abertura angular igual 360°.

Fonte: Produção do autor.

1.4 Espalhamento Thomson na Coroa Solar

CMEs podem ser observadas em luz branca utilizando um coronógrafo apontado na direção do Sol. Como possui um ocultador do disco solar para não observar a luz solar direta, ele captura a luz espalhada da fotosfera devido ao fenômeno denominado Espalhamento Thomson.

A observação da polarização do brilho coronal antecede a formulação do Espalhamento Thomson. A primeira observação bem sucedida foi realizada por François Arago na ocasião do eclipse de 1842 (INHESTER, 2016). Tais observações foram

interpretadas por Schuster (1879) como sendo o resultado do espalhamento da luz solar por partículas localizadas na coroa solar. Na época, ainda não eram conhecidas as partículas responsáveis pelo espalhamento da luz na coroa. Em 1896, Thomson propôs a existência do elétron e apenas em 1907 formulou a teoria do Espalhamento Thomson.

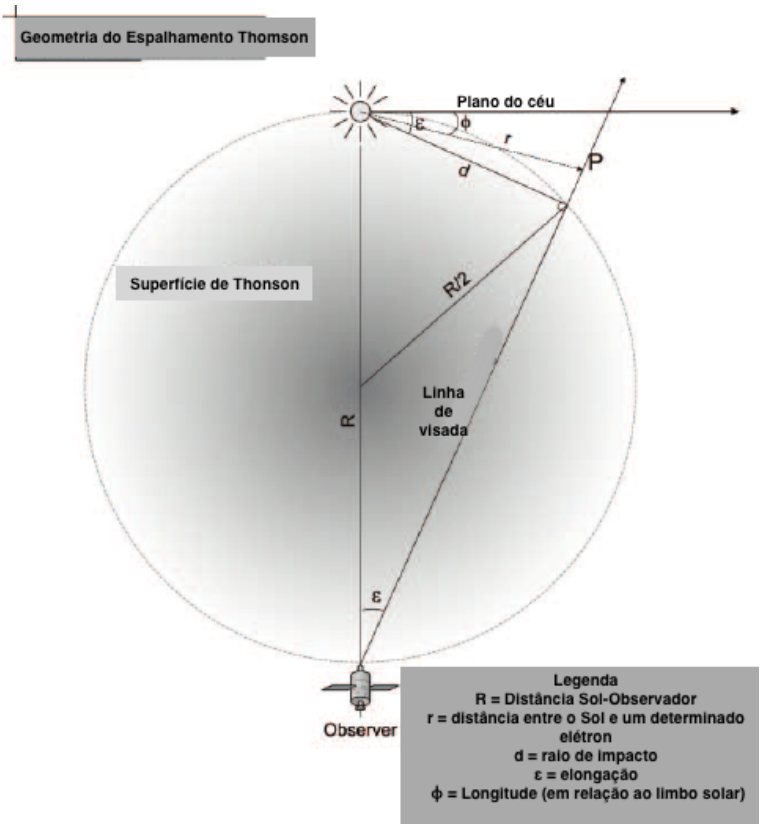
Com o "refinamento" nas observações da polarização da coroa, tornou-se necessário o aprimoramento nos cálculos de Schuster. Além das considerações feitas por Schuster, Minnaert (1930) também levou em consideração o escurecimento do limbo solar.

O espalhamento Thomson consiste basicamente no espalhamento da radiação eletromagnética pelos elétrons livres presentes num plasma (VOURLIDAS; HOWARD, 2006). No caso das observações feitas pelos coronógrafos, a luz proveniente da fotosfera solar é espalhada pelos elétrons livres presentes na coroa.

Fisicamente, a componente elétrica da radiação incidente acelera o elétron, que passa a mover-se na direção de oscilação do campo elétrico. A radiação eletromagnética é então re-emitida pelos elétrons com uma direção de polarização que se encontra num plano perpendicular a radiação incidente, denominado plano de re-emissão. A distância angular entre a linha de visada e o centro do Sol é denominada *elongação*, ϵ (Figura 1.4). A intensidade do espalhamento para um determinado elétron depende do ângulo entre a linha de visada e a linha radial através do elétron espalhado, χ. A emissão espalhada é máxima quando à linha de visada é normal a linha radial através do elétron espalhado, $\chi = 90°$. Em outras palavras, a emissão é máxima quando a linha de visada é paralela ao plano de re-emissão.

O raio é denominado *raio de impacto*, d (Figura 1.4). O plano normal à linha de visada e definido pelo raio de impacto é comumente chamado de plano do céu e corresponde ao plano do limbo solar quando supõe-se todas as linhas de visada paralelas entre si (VOURLIDAS; HOWARD, 2006). Localizando todos os pontos, em função da elongação, onde $\chi = 90°$, obtém-se que o espalhamento máximo situa-se na superfície de uma esfera, denominada esfera ou superfície de Thomson (VOURLIDAS; HOWARD, 2006; INHESTER, 2016). A Figura 1.4 apresenta o esquema geométrico do espalhamento Thomson para um elétron localizado no ponto P.

Figura 1.4 - Geometria do Espalhamento Thomson.



R é a distância entre o Sol e o observador, r é a distância entre o Sol e um determinado elétron, P é a localização do elétron, d é o raio de impacto, ϵ é a elongação e ϕ é a longitude em relação ao limbo solar.

Fonte: Vourlidas e Howard (2006).

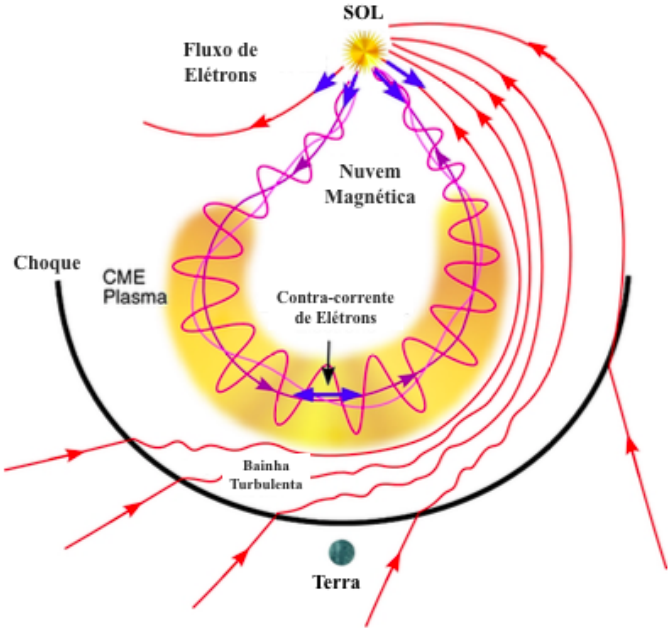
1.5 Ejeção Coronal de Massa Interplanetária

Ejeções coronais de massa interplanetárias, do inglês *Interplanetary coronal mass ejections* (ICMEs), são estruturas correspondentes as ejeções coronais de massa (que ocorrem no Sol e são observadas pelos coronógrafos) que se propagam na heliosfera a distâncias suficientemente afastadas do campo de visada dos coronógrafos, geralmente a centenas de raios solares. A distinção entre CMEs e ICMEs se deve principalmente a própria definição de CME estar relacionada a observação do fenômeno no campo de visada do coronógrafo.

ICMEs são monitoradas por satélites *in-situ*. A passagem das ICMEs podem ser indicadas por várias assinaturas características, algumas observadas na maioria das

ICMEs e outras particulares de cada evento. A Figura 1.5 esquematiza várias assinaturas de ICME, em particular um subconjunto de ICMEs denominadas "nuvens magnéticas", que apresenta uma configuração de campo magnético helicoidal (RICHARDSON; CANE, 2010).

Figura 1.5 - Esquema de ICME antecedida por um choque.



A ICME e o choque são separados por uma bainha comprimida, aquecida e muitas vezes turbulenta, de vento solar.

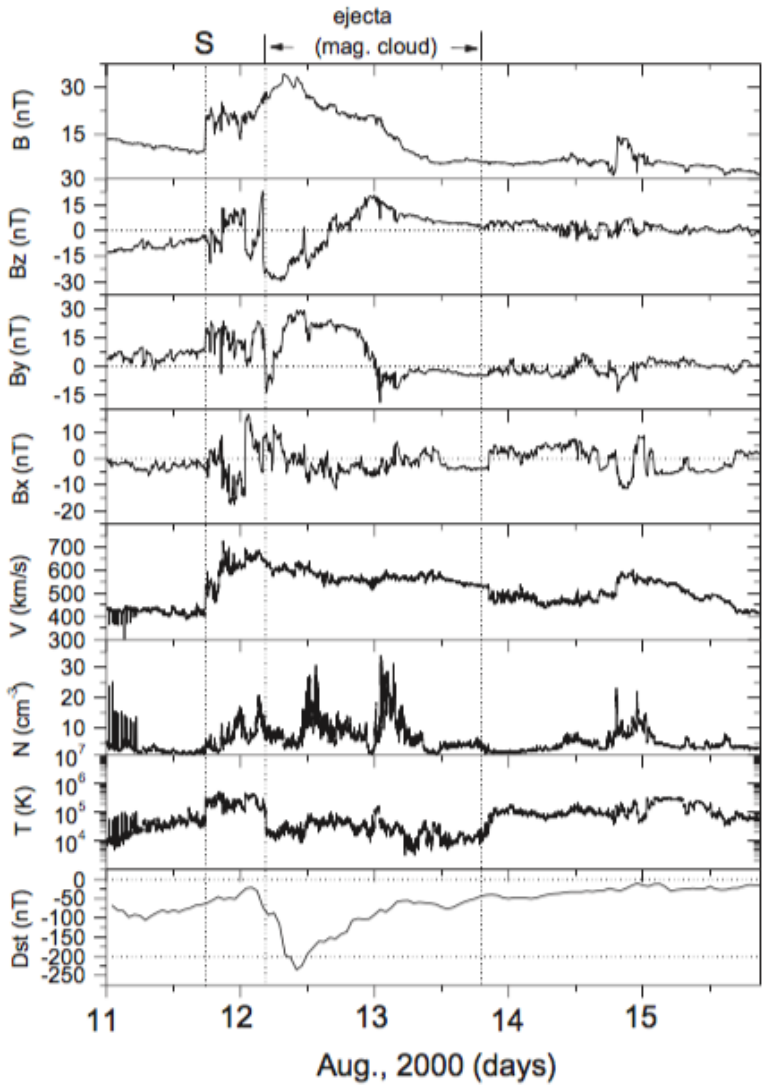
Fonte: Richardson e Cane (2010).

O estudo das ICMEs é relevante principalmente para o clima espacial. Por exemplo, o choque que antecede a ICME pode acelerar partículas energéticas (CANE; LARIO, 2006), as ICMEs são as principais causas de tempestades geomagnéticas intensas (GOSLING et al., 1991; SCHWENN, 2006), ICMEs modulam a intensidade de raios cósmicos galáticos e pode influenciar a propagação de partículas solares energéticas na heliosfera (RICHARDSON; CANE, 2010).

A Figura 1.6 mostra as características de uma ICME observada nas vizinhanças da Terra pelo satélite ACE em agosto de 2000. Do painel superior para o painel inferior, a Figura 1.6 apresenta a intensidade total do campo magnético interplanetário (B) e suas componentes B_x, B_y e B_z, a velocidade do vento solar (V), a densidade (N), a

temperatura (T) e o índice de distúrbio geomagnético Dst. A chegada do choque (S) é identificada pelo aumento rápido de todos os parâmetros no fim do dia 11 de agosto. No início do dia 12 de agosto o campo magnético ficou mais suave e a temperatura caiu, indicando que o satélite estava atravessando uma nuvem magnética (DAL LAGO et al., 2013).

Figura 1.6 - ICME observada nas vizinhanças da Terra pelo satélite ACE em agosto de 2000.



De cima para baixo, a figura apresenta a intensidade total do campo magnético interplanetário (B) e suas componentes B_x, B_y e B_z, a velocidade do vento solar (V), a densidade (N), a temperatura (T) e o índice de distúrbio geomagnético Dst.

Fonte: Dal Lago et al. (2013).

1.6 Objetivos

Ao longo da história o homem busca conhecer e descrever os fenômenos que o cercam, não somente pela simples busca do conhecimento, mas na tentativa de usar esse conhecimento a seu favor. Nesse aspecto, é importante conhecer e descrever fenômenos que possam influenciar de algum modo na sociedade. Estudar o chamado clima espacial é essencial para entender a influência que o ambiente espacial desempenha sobre a Terra. Um dos fenômenos solares que influenciam diretamente o clima espacial são as ejeções coronais de massa.

Prever a chegada de ejeções coronais de massa na Terra é necessário para evitar danos ou falhas em sistemas tecnológicos amplamente utilizados, como as redes de transmissão de energia elétrica e o sistemas de posicionamento global como é o caso do GPS (*Global Positioning System*). Entretanto, a maneira como observamos as CMEs nos impede de fazer medidas diretas da velocidade de propagação frontal, necessária para descrever cinematicamente esse fenômeno.

Em alternativa, Schwenn et al. (2001) propuseram o uso da chamada velocidade de expansão lateral como aproximação para a velocidade radial de propagação, obtendo bons resultados para predição do tempo de chegada de CMEs na direção da Terra. Dal Lago et al. (2003) fizeram um estudo empírico com 57 CMEs limb demonstrando que utilizar a velocidade de expansão lateral é uma boa aproximação para descrever cinematicamente uma CME.

Fundamentando-se nessas ideias, o objetivo desta dissertação é determinar velocidades e tempos de chegada de CMEs direcionadas para a Terra. Os objetivos principais são:

- Obter as velocidades radial e de expansão, utilizando o método CORSET (GOUSSIES et al., 2010; BRAGA et al., 2012), para um conjunto de CMEs do LASCO escolhidas a partir de uma lista de ICMEs (RICHARDSON; CANE, 2010). Comparar os resultados obtidos para alguns eventos com os resultados obtidos pelos catálogos CDAW e CACTUS.
- Obter os tempos de chegada de CMEs utilizando o modelo empírico proposto por Schwenn et al. (2005) e Dal Lago et al. (2013) e comparar com os tempos obtidos na Lista de ICMEs de Richardshon e Cane (RICHARDSON; CANE, 2010).
- Utilizar os dados de velocidade e tempos de chegada estimados para obter

uma relação empírica entre as duas grandezas e comparar com uma análise similar feita por Schwenn et al. (2005) e Dal Lago et al. (2013).

1.7 Estrutura da Dissertação

Os capítulos restantes desta dissertação estão organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Contém a descrição do algoritmo utilizado para fazer a análise das CMEs, o CORSET. Também são abordadas algumas limitações do algoritmo em relação ao rastreamento das CMEs.
- Capítulo 3: São apresentados os critérios de seleção dos eventos utilizados neste trabalho.
- Capítulo 4: São apresentadas as definições das velocidades radial e de expansão e exemplificados os método de obtenção dessas quantidades. Também são feitas análises e comparações de resultados para alguns eventos.
- Capítulo 5: São apresentados os resultados obtidos para o conjunto de eventos selecionados, evidenciando a relação entre os tempos de chegadas e as velocidades.
- Capítulo 6: São apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 CORONAL SEGMENTATION TECHNIQUE

O CORSET (*Coronal Segmentation Technique*) é um algoritmo computacional baseado em análise de textura, elaborado para isolar uma CME do plano de fundo na linha de visada do coronógrafo. A textura é definida pela chamada matriz de co-ocorrência de nível de cinza (*gray-level co-occurrence matrix* - GLCM) (HARALICK et al., 1973). O CORSET não é um método manual como o utilizado no catálogo CDAW. Assim como, também não é um método automático como o utilizado no catálogo CACTus. Nesse sentido, o CORSET é um método supervisionado, ou pseudo-automático para rastrear CMEs (GOUSSIES et al., 2010).

2.1 Matriz de Co-ocorrência de Nível de Cinza

Para descrever as características de uma imagem em termos de um plano de fundo e um plano principal é necessário definir em que plano cada pixel pertence. Descrever a intensidade de nível de cinza de cada pixel individualmente não é suficiente para determinar quais pixels pertencem ao plano de fundo e quais pertencem ao plano principal.

Além do nível de cinza de cada pixel é necessário levar em consideração a distribuição espacial desses pixels, descrito pela textura da imagem. A textura contém informações sobre a distribuição espacial das variações de tom dentro de um intervalo. Haralick et al. (1973) propuseram o uso da chamada matriz de co-ocorrência de nível de cinza (GLCM) como um modo de caracterizar a textura de diferentes regiões de uma imagem.

A GLCM associada a uma determinada região de uma imagem é uma matriz cujos elementos são formados pela frequência de ocorrência de pares de pixels separados por um distância d e um ângulo θ.

Suponhamos que a Tabela 2.1 seja a representação matricial de uma imagem, onde os níveis de cinza variam entre 0 e 3. A Tabela 2.2 apresenta todas as possíveis combinações entre os pares de níveis de cinza.

Tabela 2.1 - Representação de uma imagem 4×4 com níveis de cinza entre 0 e 3.

0	0	1	1
0	0	1	1
0	2	2	3
2	2	3	3

Tabela 2.2 - Combinações possíveis entre pixels vizinhos para os quatro níveis de cinza.

	0	1	2	3
0	(0, 0)	(0, 1)	(0, 2)	(0, 3)
1	(1, 0)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)
2	(2, 0)	(2, 1)	(2, 2)	(2, 3)
3	(3, 0)	(3, 1)	(3, 2)	(3, 3)

Suponhamos a situação onde $d = 1$ e $\theta = 0°$, o ângulo zero é definido da esquerda para a direita como sendo positivo, então a GLCM correspondente será:

$$GLCM\,(0°) = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

Os números da matriz $GLCM\,(0°)$ representam a frequência com que os pares de pixels vizinhos com níveis de cinza dado pelas possíveis combinações da Tabela 2.2 apareceram na imagem, para $d = 1$ e $\theta = 0°$. Por exemplo, o par com nível de cinza $(0, 0)$ separados pela distância 1 e na direção com ângulo zero repete-se 4 vezes na imagem representada pela Tabela 2.1.

Do mesmo modo, mudando o ângulo para $\theta = 45°$, a GLCM será descrita por:

$$GLCM\,(45°) = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

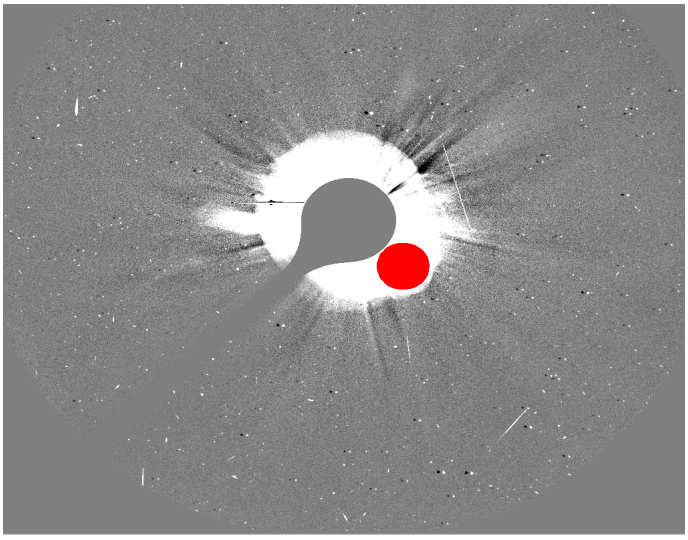
Assim como utilizado nos trabalhos anteriores por Goussies et al. (2010), no CORSET a distância e o ângulo são definidos como $d = 1$ e $\theta = 45°$ e utiliza-se 4 níveis de cinza, como ilustrado no exemplo da Tabela 2.2, porém utilizando uma imagem com tamanho de 256×256 pixels.

2.2 Rastreamento

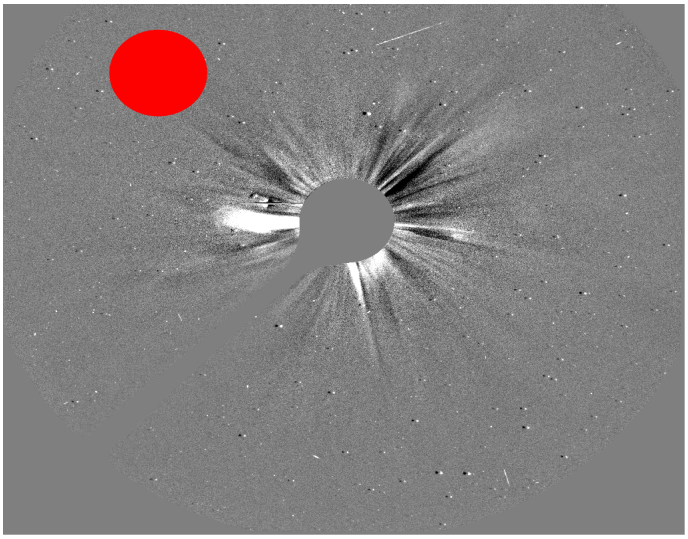
Para rastrear um evento é necessário definir uma sequência de imagens onde a CME está aparente na linha de visada do coronógrafo. Além disso, o usuário precisa definir

um exemplo do plano principal, nesse caso a CME. É importante selecionar uma área que represente a textura da CME, a Figura 2.1 (a) mostra o exemplo de uma seleção do plano principal para uma CME observada em 28 de outubro de 2010. Também é necessário definir um exemplo do plano de fundo, como mostrado na Figura 2.1(b).

Figura 2.1 - Definição do plano principal e do plano de fundo no CORSET.



(a) Exemplo do plano principal escolhido (em vermelho) para a CME observada no dia 28 de outubro de 2010 pelo LASCO-C3.



(b) Exemplo do plano de fundo escolhido (em vermelho) para a CME observada no dia 28 de outubro de 2010 pelo LASCO-C3.

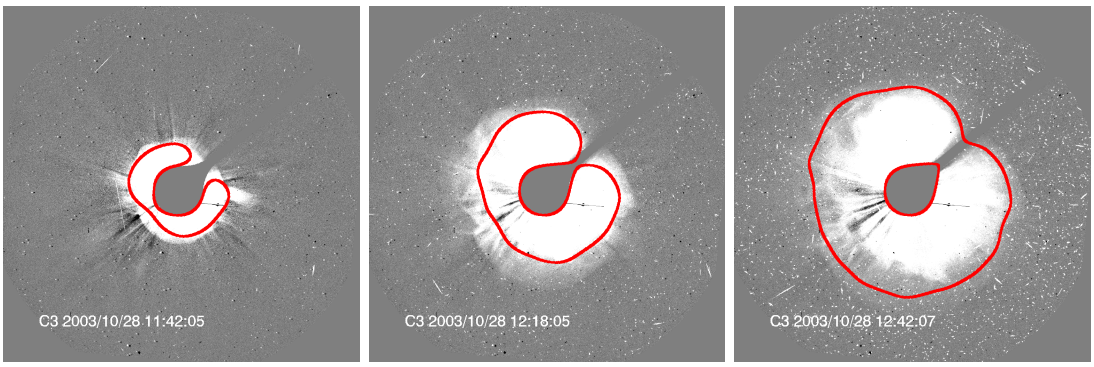
Fonte: Produção do autor.

Ainda é necessário definir parâmetros como o quadro inicial e final onde o evento está aparente. Definido todos os parâmetros necessários, o algoritmo rastreia o desenvolvimento da CME, analisando a textura dos pixels vizinhos para avaliar se eles pertencem a CME ou ao plano de fundo (BRAGA, 2015).

O primeiro quadro é rastreado levando em consideração o plano principal escolhido inicialmente. Os quadros seguintes são rastreados levando em consideração a GLCM do plano principal associada ao quadro $i-1$ e são expandidos em todas as direções pela razão Z/Q, onde Z é o número de pixels contido na região definida pelo quadro $i-1$ e Q é o fator de expansão, onde $Q = 0$ indica que não há expansão do contorno do evento de um quadro para outro.

A Figura 2.2 é um exemplo de uma sequência de imagens rastreada pelo CORSET, a CME rastreada foi observada pelo LASCO-C3 no dia 28 de outubro de 2010.

Figura 2.2 - CME halo rastreada pelo CORSET.



CME halo observada em 28 de outubro de 2003 pelo LASCO-C3. A linha vermelha indica a delimitação feita pelo CORSET ao rastrear o evento.

Fonte: Produção do autor.

Para aumentar o contraste das imagens o algoritmo utiliza as técnicas combinadas de diferença base e diferença corrida nas imagens. A técnica consiste na utilização da diferença base no plano principal, para preservar a estrutura morfológica interna do evento e a diferença corrida no plano de fundo para suprimir os streamers (GOUSSIES et al., 2010).

Para este trabalho, as imagens utilizadas para fazer a diferença base foram escolhidas com um intervalo entre uma e três horas antes do evento, sendo levado em conside-

ração a presença de estruturas que pudessem comprometer o rastreamento correto do evento. Usar imagens muito anteriores, em geral, resultava em rastreamentos inconsistente com o evento observado.

2.3 Limitações do Algoritmo

A principal vantagem em usar o CORSET para rastrear as CMEs é a objetividade que o algoritmo oferece. Dados os parâmetros necessários, o rastreamento do evento será feito sem influência do usuário e de modo similar para todos os eventos. Entretanto, o algoritmo possui algumas limitações em relação ao rastreamento das CMEs. Essas limitações estão essencialmente relacionadas a textura, mas existem outras limitações que não envolvem problemas com a textura.

Situações que, em geral, o CORSET não consegue rastrear corretamente as CMEs:

- Eventos que ocorrem na haste do instrumento (chamada *Pylon*), ou seja, eventos que são parcialmente bloqueados pela haste. Geralmente, o CORSET rastreia somente uma parte do evento que se estende desde uma das extremidades do evento até o ocultador.

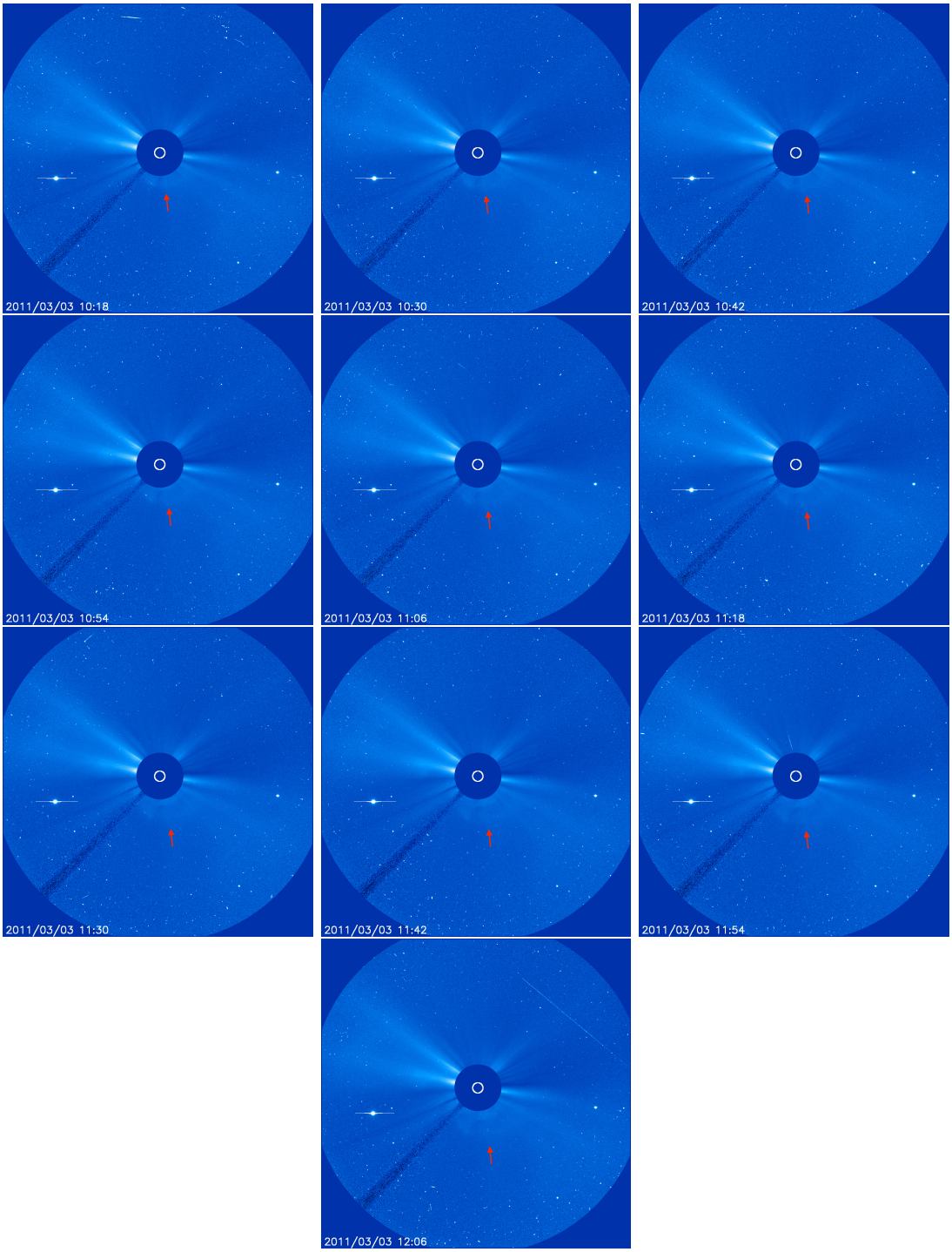
- Casos onde a CME é fraca, ou seja, a textura do evento e do plano de fundo são similares. Como consequência o CORSET não consegue fazer a distinção correta entre evento e plano de fundo. A Figura 2.3 mostra uma CME fraca observada pelo LASCO-C3 no dia 03 de março de 2011 e a Figura 2.4 apresenta o rastreamento feito pelo CORSET do mesmo evento. O rastreamento foi considerado incorreto, pois nos últimos quadros o streamer ao lado da CME é incluído no rastreamento e em todos os quadros uma pequena parte da CME que se estende no outro lado da haste do instrumento não é levada em consideração no rastreamento.

- Streamers e CMEs próximas ao evento analisado. Muitas vezes o CORSET inclui essas estruturas no rastreamento. A Figura 2.5 é um exemplo de uma CME que não foi rastreada corretamente, de acordo com o evento observado visualmente, pelo CORSET devido à presença de outra CME. Segundo o CDAW, a primeira CME apareceu no campo de visada do LASCO-C2 às 21:36 UT do dia 14 de março de 2015 e a segunda CME apareceu no LASCO-C2 às 01:48 UT do dia 15 de março de 2015, o que é possível confirmar por inspeção visual. A CME que deveria ser rastreada é o evento ocorrido no dia 15 de março de 2015, esse evento é uma

CME do tipo halo e o rastreamento foi considerado incorreto, pois apenas uma pequena parte do evento foi incluída no rastreamento. Vale ressaltar que o rastreamento não foi considerado incorreto apenas pela presença de um evento anterior mas também porque parte do evento que estava sendo analisado foi desconsiderado no rastreamento.

- O horário e a presença de estruturas, como por exemplo partículas, nas imagens utilizadas para fazer a diferença base influenciam no resultado final do rastreamento.

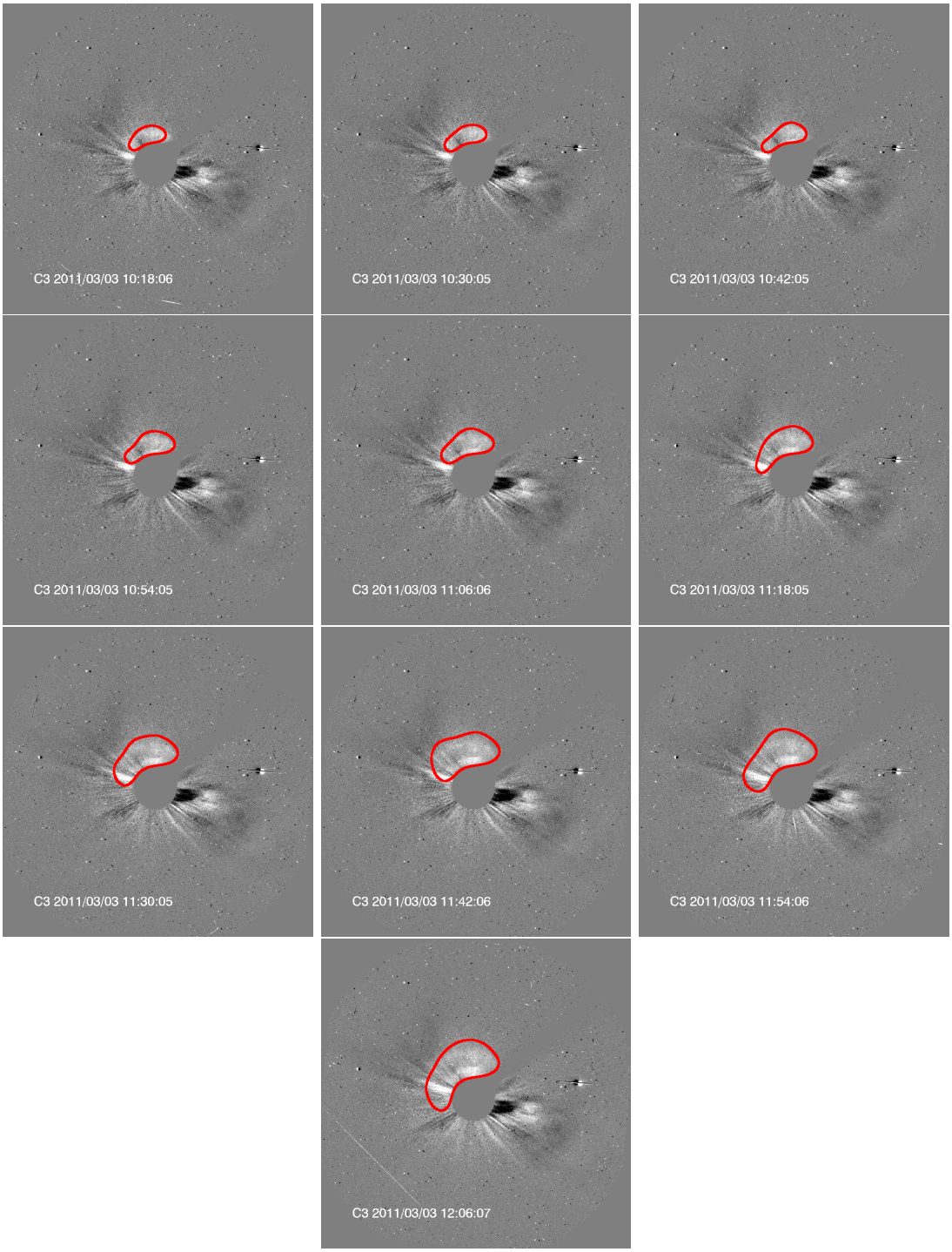
Figura 2.3 - Exemplo de uma CME fraca.



CME observada em 03 de março de 2011 pelo LASCO-C3. As setas indicam a localização do evento.

Fonte: https://sohodata.nascom.nasa.gov/

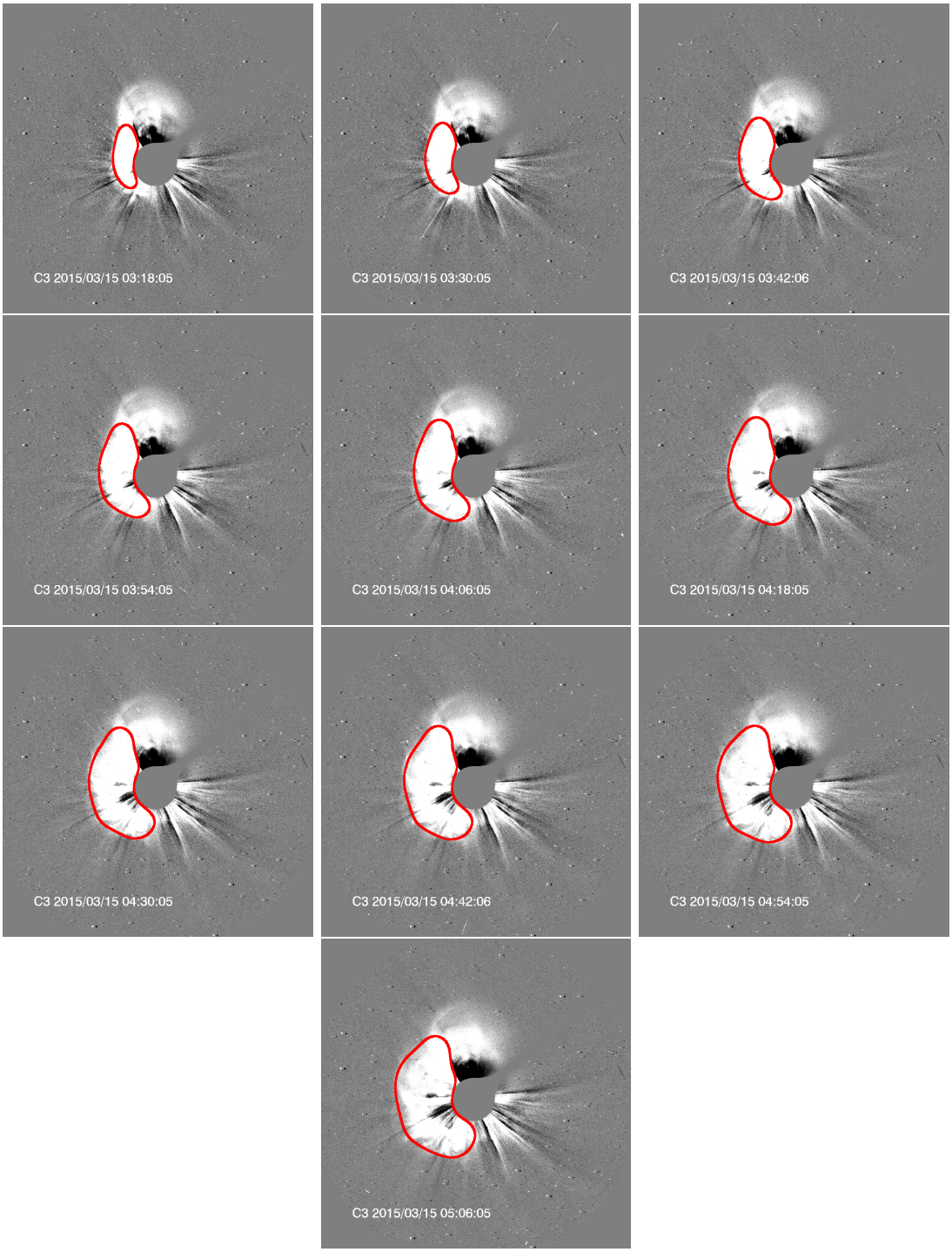
Figura 2.4 - Exemplo de uma CME fraca rastreada pelo CORSET.



CME observada em 03 de março de 2011 pelo LASCO-C3. A linha vermelha indica a delimitação feita pelo CORSET ao rastrear o evento. Nas imagens o norte do sol está localizando na parte inferior da figura.

Fonte: Produção do autor.

Figura 2.5 - Exemplo de uma CME rastreada incorretamente pelo CORSET devido a presença de outra CME.



CME observada em 15 de março de 2015 pelo LASCO-C3. A linha vermelha indica a delimitação feita pelo CORSET ao rastrear o evento. Nas imagens o norte do sol está localizando na parte inferior da figura.

Fonte: Produção do autor.

3 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DOS EVENTOS

Para determinar as velocidades e os tempos de chegadas de CMEs na direção da Terra foram executadas etapas, apresentadas a seguir.

O primeiro passo foi a seleção dos eventos. Os eventos foram eleitos com base no catálogo de ICMEs de Richardson e Cane (RICHARDSON; CANE, 2010). Os eventos selecionados correspondem aqueles cuja associação entre uma CME e uma ICME foi estabelecida de forma unívoca, isto é, foram selecionados somente as ICMEs para as quais há uma, e somente uma, CME observada no período que a antecede.

Neste trabalho serão analisados eventos observados a partir de 26 de maio de 2001 até 2015, já que estudos anteriores utilizando o método CORSET analisaram apenas períodos anteriores a esta data (BRAGA et al., 2012) e não há nenhum estudo com o mesmo método com período posterior utilizando dados do satélite SOHO.

Na primeira etapa foi selecionado um conjunto de 128 eventos cuja associação entre CME e ICME foi estabelecida univocamente. A Tabela 3.1 contém a descrição desses 128 eventos.

O segundo passo consistiu em utilizar o algoritmo computacional, denominado CORSET (GOUSSIES et al., 2010), para rastrear as CMEs e também para calcular as velocidades radial e de expansão.

No que se refere ao rastreamento das CMEs, apenas 41 eventos foram rastreados de forma condizente com o fenômeno observado e foram denotados como 'rastreamento correto' na Tabela 3.1. Os demais eventos não foram bem rastreados e as razões pelas quais esse fato ocorreu estão descritas na Tabela 3.1. Desse ponto em diante, apenas os 41 eventos rastreados corretamente tiveram seus parâmetros cinemáticos calculados.

No que se refere ao cálculo das velocidades, foi possível calculá-las para todos os 41 eventos. Entretanto, para cinco eventos especificados na Tabela 5.1 os valores das velocidades eram incoerentes com a observação e não foram utilizados nos resultados finais.

Com a velocidade de expansão calculada para um conjunto de 36 eventos, o terceiro passo foi utilizar esses valores para determinar os tempos de chegada de CMEs a partir do modelo empírico proposto por Schwenn et al. (2005) e comparar os resultados com os tempos estimados pelo catálogo de ICMEs de Richardson e Cane

(RICHARDSON; CANE, 2010). Esses resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Por fim, a partir das velocidades de expansão calculadas e dos tempos estimados pela lista de ICMEs foram estabelecidas relações empíricas para determinar tempos de chegada de CMEs.

3.1 Catálogo de ICMEs de Richardson e Cane

O catálogo de ICMEs de Richardson e Cane é uma lista de ICMEs com dados de 1996 até 2016. O catálogo completo está disponível no site `http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm` e é atualizado periodicamente.

O catálogo contém a lista de ICMEs e suas características, como a data da chegada do distúrbio ou choque que antecede a ICME, a data de início e fim da ICME, indicação de anormalidade na composição do vento solar, indicação de ocorrência de nuvem magnética, variação da velocidade do vento solar, velocidade média do choque, identificação da CME associada e outros parâmetros.

Para este trabalho serão importantes os dados da chegada do choque, data de início e fim da ICME, velocidade média do choque, assim como as identificações das CMEs associadas.

Para identificar as ICMEs os autores da lista de ICMEs examinam dados do vento solar e do campo magnético utilizando os instrumentos presentes nos satélites IMP 8, WIND, ACE e OMNI com resolução de aproximadamente 1 minuto até 1 hora. Também são utilizados dados da composição de íon do vento solar e observações de carga estática feita pelo instrumento SWICS (RICHARDSON; CANE, 2010).

3.2 Imagens do LASCO-C3

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes do coronógrafo LASCO-C3, cujas imagens estão disponível no site `https://seal.nascom.nasa.gov/cgi-bin/gui_plop` e possuem o formato FITS (*Flexible Image Transport System*) com nível de processamento 0,5 e resolução de 1024×1024. O formato FITS, usado nos dados do SOHO, é um formato de arquivo digital utilizado para armazenar, manipular e transmitir imagens científicos. Nesse formato, dados da imagem como autor, data, instrumento, coordenadas e outras informações são armazenados num cabeçalho. As imagens com nível de processamento 0,5 são obtidas após os dados brutos serem separados do fluxo de telemetria e orientados de forma que o Norte do Sol esteja no topo da imagem.

3.3 Eventos Pré-selecionados da Lista de ICMES de Richardson

A Tabela 3.1 apresenta os eventos pré-selecionados da lista de ICMEs de Richardson, com eventos iniciando em 2001 até 2015. Os 128 eventos pré-selecionados correspondem àqueles cuja associação entre uma CME e uma ICME foi estabelecida de forma unívoca, isto é, foram selecionadas somente as ICMEs para as quais há uma, e somente uma, CME observada no período que a antecede.

Eventos para os quais a relação não é unívoca, isto é, quando há mais de uma CME para cada ICME observada numa janela de tempo de dezenas de horas, demandam análise detalhada para identificar se houve interação entre as duas estruturas. Esta análise costuma ser realizada apenas quando há observação simultânea de pelo menos dois coronógrafos (veja, por exemplo, Lugaz et al. (2012)) e não faz parte dos objetivos do presente trabalho.

A coluna 1 da Tabela 3.1 contém a associação numérica dos 128 eventos analisados. A coluna 2 contém a data de chegada do choque que antecede a ICME expresso em Ano/Mês/Dia Horário (UT). Quando a chegada do choque não é identificada por nenhum dos instrumentos, por exemplo, em casos onde a ICME tem velocidade similar a do vento solar, então a data indicada é equivalente a data da chegada da ICME.

A coluna 3 contém a data de chegada da ICME expresso nas mesmas unidades da coluna 2. Na coluna 4 são apresentados a data e horário da primeira observação dos eventos correspondentes no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2. E na última coluna estão expressos os critérios de seleção dos eventos em relação ao rastreamento do CORSET.

Os eventos destacados em negrito correspondem àqueles cujo resultado do rastreamento pelo CORSET foi satisfatório e condizente com o fenômeno observado, totalizando 41 eventos bem rastreados pelo CORSET.

Nos demais eventos são apresentados os argumentos pelos quais o rastreamento do CORSET não foi bem sucedido. Abreviações como 'CME fraca' indica que a textura da CME é muito similar a textura do plano de fundo, impossibilitando o rastreamento correto. '*Pylon*' indica que o evento foi parcialmente bloqueado pela haste do coronógrafo, o que faz com que parte da CME não seja rastreada. 'CME adjacente' indica a ocorrência de eventos localizados lado a lado, e em alguns casos eles sobrepõem-se parcialmente, de modo que as texturas se misturam e o rastreamento

não condiz com a observação. 'CME anterior' indica que o acontecimento de um evento anterior, aproximadamente na mesma localização, comprometeu as imagens para fazer a diferença base. Todas as indicações relacionadas à 'Base' indicam a falta de imagens para fazer a diferença base ou imagens ruins. 'Streamers' indica a presença de estruturas chamadas streamers próximas à localização da CME, que acabam sendo incluídas no rastreamento porque possuem uma textura similar a da CME. 'Rastreamento incorreto' indica os eventos que não foram rastreados corretamente pelo CORSET porque uma parte da CME tinha textura similar à textura do plano de fundo ou porque as imagens estavam contaminadas com partículas, ou ainda, devido à assimetria da CME.

Vale ressaltar que as CMEs halo possuem um brilho tênue no campo de visada do coronógrafo em relação as demais CMEs, especialmente na região mais externa do coronógrafo quando a contribuição da componente F da coroa passa a ser mais significativa.

Além dos fatores indicados, constatou-se ainda que havia ausência de dados durante o período de observação de determinadas CMEs. Como por exemplo, ausência de eventos no banco de dados utilizados para fazer o download das imagens, *gap* nos dados no horário em que o evento ocorreu. Ainda, houveram situações em que na lista de ICMEs estava indicado um determinado dia/horário para a ocorrência da CME e não havia nenhum evento no dia/horário mencionado.

A taxa de sucesso do CORSET ao rastrear os eventos selecionados para este trabalho foi de 32%. No trabalho feito por Braga et al. (2012) utilizando o CORSET, de 57 eventos foram rastreados 51 eventos de acordo com o fenômeno observado. Vale ressaltar que o trabalho feito por Braga et al. (2012) utilizou apenas CMEs *limb*, enquanto que para este trabalho foram rastreados somente eventos direcionados para a Terra. O catálogo de CMEs CACTus também tem problemas ao rastrear CMEs halo, muitas vezes, dividindo um único evento em vários.

Tabela 3.1 - Eventos pré-selecionados da Lista de ICMES de Richardson e rastreados utilizando o método CORSET.

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
1	2001/04/28 0501	2001/04/28 1400	2001/04/26 1230	CME adjacente.
2	**2001/07/08 1200**	**2001/07/09 0200**	**2001/07/05 0354**	**Rastreamento correto.**
3	2001/08/17 1103	2001/08/17 2000	2001/08/14 1601	Sem imagens para base.
4	2001/09/23 2000	2001/09/24 0000	2001/09/20 1931	CME fraca e CME adjacente.
5	**2001/09/29 0940**	**2001/09/29 1100**	**2001/09/27 0454**	**Rastreamento correto.**
6	2001/09/30 1924	2001/10/01 0800	2001/09/28 0854	*Pylon.*
7	2001/10/01 2115	2001/10/02 0400	2001/09/29 1154	CME fraca e CME anterior.
8	2001/10/11 1701	2001/10/12 0400	2001/10/09 1130	CME anterior.
9	2001/10/21 1648	2001/10/21 2000	2001/10/19 1650	CME anterior.
10	2001/10/26 2200	2001/10/27 0300	2001/10/22 1826	CME adjacente.
11	2001/10/28 0319	2001/10/29 2200	2001/10/25 1526	Rastreamento incompleto.
12	2001/11/06 0152	2001/11/06 1200	2001/11/04 1635	Rastreamento incompleto.
13	2001/11/19 1815	2001/11/19 2200	2001/11/17 0530	*Pylon.*
14	**2001/11/24 0656**	**2001/11/24 1400**	**2001/11/22 2330**	**Rastreamento correto.**
15	**2001/12/29 0538**	**2001/12/30 0000**	**2001/12/26 0530**	**Rastreamento correto.**
16	**2002/03/18 1322**	**2002/03/19 0500**	**2002/03/15 2306**	**Rastreamento correto.**
17	2002/03/23 1137	2002/03/24 1200	2002/03/20 1706	CME fraca.
18	2002/04/17 1107	2002/04/17 1600	2002/04/15 0350	CMEs adjacente.

(Continua)

Tabela 3.1 - Continuação

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
19	2002/04/19 0835	2002/04/20 0000	2002/04/17 0826	Rastreamento incompleto.
20	2002/05/11 1014	2002/05/11 1500	2002/05/08 1350	CME fraca.
21	2002/05/20 0340	2002/05/20 1000	2002/05/16 0050	CME fraca.
22	2002/05/23 1050	2002/05/23 2000	2002/05/22 0326	CME anterior.
23	**2002/07/17 1603**	**2002/07/18 1200**	**2002/07/15 2030**	**Rastreamento correto.**
24	2002/08/01 2309	2002/08/02 0600	2002/07/29 1207	Rastreamento incompleto.
25	**2002/08/18 1846**	**2002/08/19 1200**	**2002/08/16 1230**	**Rastreamento correto.**
26	2002/09/07 1636	2002/09/08 0400	2002/09/05 1654	CME fraca.
27	**2002/09/19 0600**	**2002/09/19 2000**	**2002/09/17 0806**	**Rastreamento correto.**
28	2003/02/01 1305	2003/02/01 1900	2003/01/30 1006	CME fraca.
29	**2003/05/29 1825**	**2003/05/30 0200**	**2003/05/28 0050**	**Rastreamento correto.**
30	2003/05/30 1600	2003/05/30 2200	2003/05/29 0127	CME fraca.
31	2003/06/16 1800	2003/06/17 1000	2003/06/14 0154	*Pylon.*
32	2003/08/17 1421	2003/08/18 0100	2003/08/14 2006	CME fraca e streamers.
33	**2003/10/24 1524**	**2003/10/24 2100**	**2003/10/22 0830**	**Rastreamento correto.**
34	**2003/10/28 0206**	**2003/10/28 0230**	**2003/10/26 1754**	**Rastreamento correto.**
35	**2003/10/29 0611**	**2003/10/29 1100**	**2003/10/28 1130**	**Rastreamento correto.**
36	**2003/10/30 1619**	**2003/10/31 0200**	**2003/10/29 2054**	**Rastreamento correto.**
37	2003/11/20 0803	2003/11/20 1000	2003/11/18 0850	*Pylon.*

(Continua)

Tabela 3.1 - Continuação

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
38	**2004/01/22 0137**	**2004/01/22 0800**	**2004/01/20 0006**	**Rastreamento correto.**
39	**2004/01/23 1425**	**2004/01/23 2300**	**2004/01/21 0454**	**Rastreamento correto.**
40	2004/07/22 1036	2004/07/22 1800	2004/07/20 1331	CME fraca.
41	2004/07/24 0613	2004/07/24 1400	2004/07/22 0731	CME fraca e CME anterior.
42	2004/07/25 1500	2004/07/25 2000	2004/07/23 1606	CME fraca.
43	2004/07/26 2249	2004/07/27 0200	2004/07/25 1454	Rastreamento incompleto.
44	**2004/09/13 2003**	**2004/09/14 1500**	**2004/09/12 0036**	**Rastreamento correto.**
45	2004/09/17 2100	2004/09/18 1200	2004/09/14 1010	*Gap* nos dados.
46	**2004/11/07 1827**	**2004/11/07 2200**	**2004/11/04 2330**	**Rastreamento correto.**
47	**2004/11/09 1825**	**2004/11/09 2000**	**2004/11/07 1654**	**Rastreamento correto.**
48	**2004/11/11 1710**	**2004/11/12 0800**	**2004/11/10 0226**	**Rastreamento correto.**
49	2005/01/07 0922	2005/01/07 1500	2005/01/04 0906	*Pylon.*
50	2005/01/08 1700	2005/01/08 2100	2005/01/05 1530	Rastreamento incompleto.
51	2005/01/16 1100	2005/01/16 1400	2005/01/13 1754	Sem evento no dia.
52	**2005/01/18 2100**	**2005/01/18 2300**	**2005/01/17 0930**	**Rastreamento correto.**
53	2005/01/21 1711	2005/01/21 1900	2005/01/20 0654	Rastreamento incompleto.
54	2005/02/20 1200	2005/02/20 1200	2005/02/17 0006	CME fraca.
55	2005/05/15 0238	2005/05/15 0600	2005/05/13 1712	Duas imagens do evento.
56	2005/05/20 0300	2005/05/20 0300	2005/05/16 1350	CME fraca e CME adjacente.

(Continua)

Tabela 3.1 - Continuação

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
57	2005/05/29 0952	2005/05/30 0100	2005/05/26 1506	CME fraca.
58	2005/05/30 2300	2005/05/31 0400	2005/05/26 2126	Evento sem identificação.
59	2005/06/12 0745	2005/06/12 1500	2005/06/09 1436	*Gap* nos dados.
60	2005/07/10 0337	2005/07/10 1000	2005/07/07 1706	CME anterior.
61	2005/08/09 0000	2005/08/09 0000	2005/08/05 0854	Rastreamento correto.
62	2005/08/24 0613	2005/08/24 1400	2005/08/22 0131	CME adjacente.
63	2005/09/02 1419	2005/09/02 1800	2005/08/31 1130	CME fraca.
64	**2005/09/11 0114**	**2005/09/11 0500**	**2005/09/09 1948**	**Rastreamento correto.**
65	2006/04/13 1141	2006/04/13 1500	2006/04/10 0606	CME fraca.
66	**2006/07/09 2136**	**2006/07/10 2100**	**2006/07/06 0854**	**Rastreamento correto.**
67	**2006/08/19 1131**	**2006/08/20 1300**	**2006/08/16 1630**	**Rastreamento correto.**
68	**2006/08/30 2000**	**2006/08/30 2000**	**2006/08/26 2057**	**Rastreamento correto.**
69	2006/12/14 1414	2006/12/14 2200	2006/12/13 0254	Rastreamento incompleto.
70	**2006/12/16 1755**	**2006/12/17 0000**	**2006/12/14 2230**	**Rastreamento correto.**
71	2007/11/19 1811	2007/11/19 2300	2007/11/15 1806	Sem evento no dia.
72	2008/12/16 1159	2008/12/17 0300	2008/12/12 0854	CME fraca.
73	2009/12/19 1000	2009/12/19 1300	2009/12/16 0430	CME fraca.
74	2010/02/11 0000	2010/02/11 0800	2010/02/07 0354	*Pylon.*
75	2010/04/05 0826	2010/04/05 1200	2010/04/03 1033	CME fraca.

(Continua)

Tabela 3.1 - Continuação

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
76	**2010/04/11 1304**	**2010/04/12 0100**	**2010/04/08 0454**	**Rastreamento correto.**
77	2010/05/28 0258	2010/05/28 1900	2010/05/24 1406	CME fraca.
78	2010/08/03 1741	2010/08/04 1000	2010/08/01 ~09	Sem imagens para base.
79	**2011/02/18 0130**	**2011/02/18 1900**	**2011/02/15 0236**	**Rastreamento correto.**
80	2011/03/06 0331	2011/03/06 0900	2011/03/03 0548	CME fraca.
81	**2011/08/04 2153**	**2011/08/05 0500**	**2011/08/02 0636**	**Rastreamento correto.**
82	2011/08/05 1751	2011/08/06 2200	2011/08/04 0412	Rastreamento incompleto.
83	**2011/09/08 1000**	**2011/09/08 1000**	**2011/09/06 0524**	**Rastreamento correto.**
84	**2011/09/09 1242**	**2011/09/10 0300**	**2011/09/06 2305**	**Rastreamento correto.**
85	2011/09/17 0343	2011/09/17 1400	2011/09/14 0000	CME fraca e CME anterior.
86	2011/09/22 0300	2011/09/22 1500	2011/09/19	CME anterior.
87	2011/09/26 1234	2011/09/26 2000	2011/09/24 1248	Rastreamento incompleto.
88	**2011/10/05 0736**	**2011/10/05 1000**	**2011/10/01 1017**	**Rastreamento correto.**
89	2011/11/12 0559	2011/11/13 1000	2011/11/09 1330	CME adjacente.
90	2011/11/28 2150	2011/11/29 0000	2011/11/26 0700	Rastreamento incompleto.
91	2011/12/29 2200	2011/12/29 2200	2011/12/26	CME anterior.
92	2012/01/21 0501	2012/01/21 0600	2012/01/18 1224	Streamers.
93	**2012/01/22 0611**	**2012/01/22 2300**	**2012/01/19 1512**	**Rastreamento correto.**
94	**2012/03/08 1103**	**2012/03/09 0300**	**2012/03/07 0024**	**Rastreamento correto.**

(Continua)

Tabela 3.1 - Continuação

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
95	**2012/03/15 1306**	**2012/03/15 1700**	**2012/03/13 1736**	**Rastreamento correto.**
96	2012/05/16 1600	2012/05/16 1600	2012/05/12 0000	CME fraca.
97	2012/06/16 2019	2012/06/16 2300	2012/06/14 1412	Rastreamento incompleto.
98	2012/07/04 1900	2012/07/05 0000	2012/07/02 0836	Rastreamento incompleto.
99	2012/07/08 0800	2012/07/09 0000	2012/07/04 1724	CME fraca.
100	2012/07/14 1809	2012/07/15 0600	2012/07/12 1648	*Gap* nos dados.
101	**2012/09/30 2305**	**2012/10/01 0000**	**2012/09/28 0000**	**Rastreamento correto.**
102	2012/10/08 0516	2012/10/08 1800	2012/10/05 2012	Streamers.
103	2012/10/31 1538	2012/11/01 0000	2012/10/27 1624	*Pylon.*
104	2012/11/12 2311	2012/11/13 0800	2012/11/09 1512	CME adjacente.
105	2012/11/23 2152	2012/11/24 1200	2012/11/20 1212	*Pylon.*
106	2012/11/26 0512	2012/11/26 1200	2012/11/23 1336	CME anterior.
107	2013/03/17 0559	2013/03/17 1500	2013/03/15 0712	*Gap* no banco de dados.
108	2013/04/13 2254	2013/04/14 1700	2013/04/11 0724	Rastreamento incompleto.
109	2013/07/12 1714	2013/07/13 0500	2013/07/09 1512	*Gap* no banco de dados.
110	**2013/10/02 0154**	**2013/10/02 2300**	**2013/09/29 2145**	**Rastreamento correto.**
111	2013/10/08 2020	2013/10/09 0900	2013/10/06 1443	CME fraca.
112	**2013/12/15 1300**	**2013/12/15 1600**	**2013/12/12 0336**	**Rastreamento correto.**
113	2014/02/07 1705	2014/02/08 0100	2014/02/04 0036	CME fraca e CME anterior.

(Continua)

Tabela 3.1 - Continuação

#	Data de Chegada do Choque (A/M/D UT)	Data de Chegada da ICME (A/M/D UT)	Visualização no LASCO-C2 (A/M/D UT)	Classificação Qualitativa do Rastreamento
114	2014/02/15 1316	2014/02/16 0500	2014/02/12 0612	Rastreamento incompleto.
115	2014/04/05 1000	2014/04/05 2200	2014/04/02 1348	Rastreamento incompleto.
116	2014/04/20 1056	2014/04/21 0700	2014/04/18 1325	Rastreamento incompleto.
117	2014/06/07 1652	2014/06/08 2000	2014/06/04 1524	Rastreamento incompleto.
118	2014/08/19 0657	2014/08/19 1600	2014/08/15 1812	Rastreamento incompleto.
119	**2014/09/12 1553**	**2014/09/12 2200**	**2014/09/10 1800**	**Rastreamento correto.**
120	**2014/09/17 0200**	**2014/09/17 0200**	**2014/09/12 1924**	**Rastreamento correto.**
121	2015/03/17 0445	2015/03/17 1300	2015/03/15 0236	CME adjacente.
122	2015/06/24 1329	2015/06/25 1000	2015/06/22 1836	*Gap* no banco de dados.
123	2015/08/15 0829	2015/08/15 2100	2015/08/12 1512	Base ruim.
124	2015/09/07 1400	2015/09/08 0000	2015/09/04 1924	Base ruim e streamers.
125	**2015/09/20 0604**	**2015/09/21 0800**	**2015/09/18 0500**	**Rastreamento correto.**
126	2015/11/06 1818	2015/11/07 0600	2015/11/04 1448	CME fraca.
127	2015/12/19 1616	2015/12/20 0300	2015/12/16 0924	CME fraca e streamers.
128	2015/12/31 0050	2015/12/31 1700	2015/12/28 1212	*Pylon*.

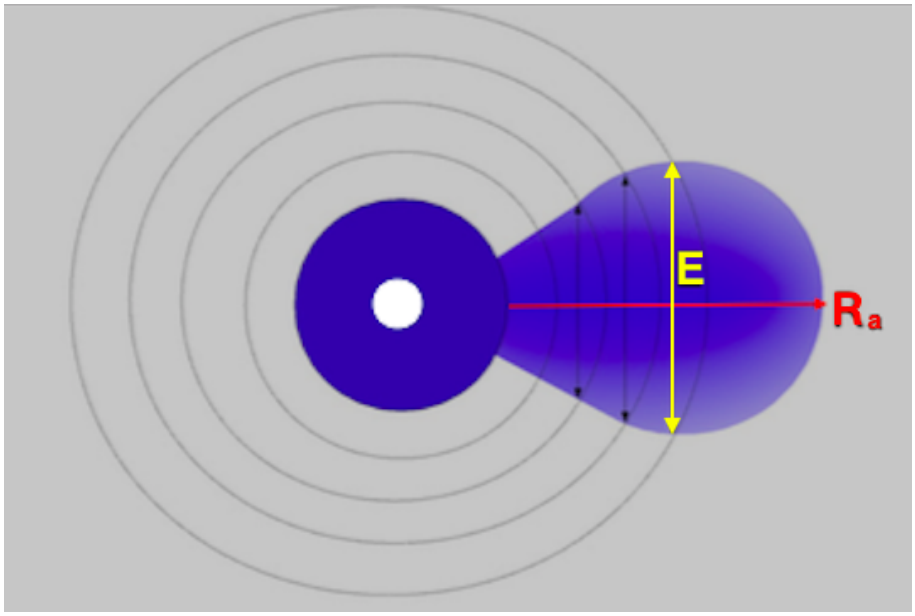
Fonte: Produção do autor.

4 VELOCIDADES RADIAL E DE EXPANSÃO

4.1 Velocidade Radial

A velocidade radial, V_{rad}, de uma CME é definida como sendo a taxa com que a CME cresce na direção frontal ou direção de propagação (SCHWENN et al., 2005). Estimar V_{rad} para CMEs *limb* é geralmente mais fácil do que fazê-lo para CMEs do tipo *halo*, devido principalmente à geometria desfavorável do problema. A Figura 4.1 apresenta um esquema representativo de como a distância radial, R_a, é definida e, por consequência, como a velocidade radial é calculada.

Figura 4.1 - Esboço exemplificando como as distâncias frontal e lateral de uma CME são definidas.



E representa a distância da expansão lateral e R_a representa a distância de propagação radial de uma CME. E é aproximadamente perpendicular a R_a. O círculo branco representa o disco solar e o círculo azul representa o ocultador do coronógrafo.

Fonte: Adaptada de Braga et al. (2012).

A rotina que calcula V_{rad}, no CORSET, calcula inicialmente a distância do centro do disco solar até os pontos ao longo do limite do evento para cada ângulo e em cada quadro individualmente (BRAGA et al., 2012). Após esse passo, determina-se a velocidade da CME para cada ângulo para o qual há pontos do contorno da CME a partir de um melhor ajuste para uma reta linear, isto é, considerando-se

que a velocidade mantenha-se constante em função do tempo no campo de visada do coronógrafo em questão (LASCO-C3). Após obtido o perfil da velocidade como função da posição angular, toma-se o maior valor como sendo a velocidade radial da CME.

Nos trabalhos anteriores utilizando-se o método CORSET (BRAGA et al., 2012; VOURLIDAS et al., 2012) e também em outros trabalhos (DAL LAGO et al., 2003; SCHWENN et al., 2005) utilizando métodos diferentes para analisar a velocidade de propagação de CMEs não há nenhuma estimativa de incerteza para as velocidades. De modo que decidiu-se implementar uma maneira de estimar não somente a velocidade radial, mas também uma incerteza associado a essa estimativa.

Para calcular as barras de incerteza de cada ponto nos gráficos de distância em função do tempo, a rotina calcula a distância do centro do disco solar até o limite do evento para ângulos equidistantes em 10° (pontos vizinhos), acima e abaixo, do ângulo associado à velocidade radial máxima, para cada quadro individualmente. Foi possível calcular as incertezas associadas aos ângulos vizinhos ao assumir que a frente da CME se propaga de forma auto-semelhante, conforme a definição adotada em Schwenn et al. (2005).

O tamanho de cada barra de incerteza é obtido através do desvio padrão das três distâncias, distância associada a velocidade máxima e as distâncias associadas aos ângulos vizinhos, calculadas para cada quadro. A incerteza associada ao valor da velocidade radial é calculada a partir das incertezas associadas ao coeficiente angular do ajuste de primeira ordem, por meio da função LINFIT na linguagem de programação IDL. A função LINFIT ajusta linearmente um conjunto de pontos minimizando a estatística de erro do qui-quadrado, baseando-se no livro *Numerical Recipes in C* (PRESS et al., 1992). A velocidade radial de cada CME é caracterizada como sendo o valor correspondente a velocidade máxima.

As incertezas associadas aos gráficos da velocidade radial em função do ângulo são obtidos a partir de cada incerteza individual da velocidade radial associado a cada ângulo. Além disso, foi adicionado ao código uma tolerância ao fazer os gráficos da velocidade radial em função do ângulo, de tal forma que, apenas as velocidades radiais com valores entre 30 % da velocidade radial máxima, limite inferior e superior, são inseridas no gráfico. A tolerância foi adicionada para eliminar os pontos espúrios que apareciam nos gráficos da velocidade radial em função do ângulo.

As incertezas das velocidades radiais tendem a aumentar a medida que se afastam da

parte central da CME. Isso se deve principalmente ao formato da CME e a maneira como o erro é calculado, em termos da diferença entre distâncias associadas aos ângulos vizinhos.

4.2 Velocidade de Expansão Lateral

A velocidade de expansão lateral, V_{exp}, de uma CME é definida como sendo a taxa com que a CME cresce lateralmente (SCHWENN et al., 2005; DAL LAGO et al., 2003). A Figura 4.1 apresenta um esquema representativo de como a distância de expansão lateral, E, é definida e, por consequência, como a velocidade de expansão lateral é calculada. As distâncias R_a e E são aproximadamente perpendiculares.

A rotina que calcula V_{exp}, no CORSET, determina primeiro a distância radial entre o centro do disco solar até os pontos ao longo do limite do evento para cada ângulo e em cada quadro individualmente. Depois faz uma busca de todos os pares de pontos situados no contorno da CME e nos lados opostos de R_a, aproximadamente perpendicular, de modo que o par de pontos estejam localizados no mesmo quadro, mantendo uma tolerância na distância radial de 1,5 pixel. O par de pontos separados pela distância máxima entre si, em cada quadro, é escolhido como o local onde a taxa de expansão deve ser medida (BRAGA et al., 2012).

Neste trabalho a velocidade de expansão lateral foi calculada de três maneiras diferentes, a primeira associada ao contorno dos eventos, a segunda fazendo um ajuste suave dos pontos do contorno e a terceira ajustando os pontos da frente da CME a uma parábola.

Estimar a velocidade de expansão lateral é mais fácil do que estimar a velocidade de propagação frontal de uma CME. De acordo com Schwenn et al. (2005), a velocidade de expansão lateral é o único parâmetro que pode ser unicamente medido para qualquer CME, independentemente da forma ou da localização da CME, desde que se assuma uma simetria cilíndrica. E portanto, V_{exp} deveria ser utilizado como aproximação para V_{rad}.

Dal Lago et al. (2003) fizeram um estudo com 57 CMEs *limb* comparando as velocidades V_{exp} e V_{rad} desses eventos e obteve a relação

$$V_{rad} = 0,88\, V_{exp} \tag{4.1}$$

com coeficiente de correlação igual a 0,85, demonstrando que utilizar V_{exp} é uma

boa aproximação para descrever cinematicamente uma CME. Desse modo, o uso da velocidade de expansão lateral permite estimar a velocidade real de propagação das CMEs livre dos efeitos de projeção do plano do céu.

Utilizando a velocidade de expansão lateral das CMEs halo como uma aproximação para a velocidade radial, Schwenn et al. (2005) obtiveram uma relação empírica para determinar os tempos de chegadas de CMEs direcionadas para a Terra expressa por,

$$T_{tr} = 203 - 20,77\, ln(V_{exp}) \tag{4.2}$$

Onde T_{tr} é o tempo de viagem das CMEs para uma distância equivalente a uma unidade astronômica. T_{tr} é expresso em horas e a V_{exp} em quilômetros por segundo.

4.3 Estudo de Alguns Eventos

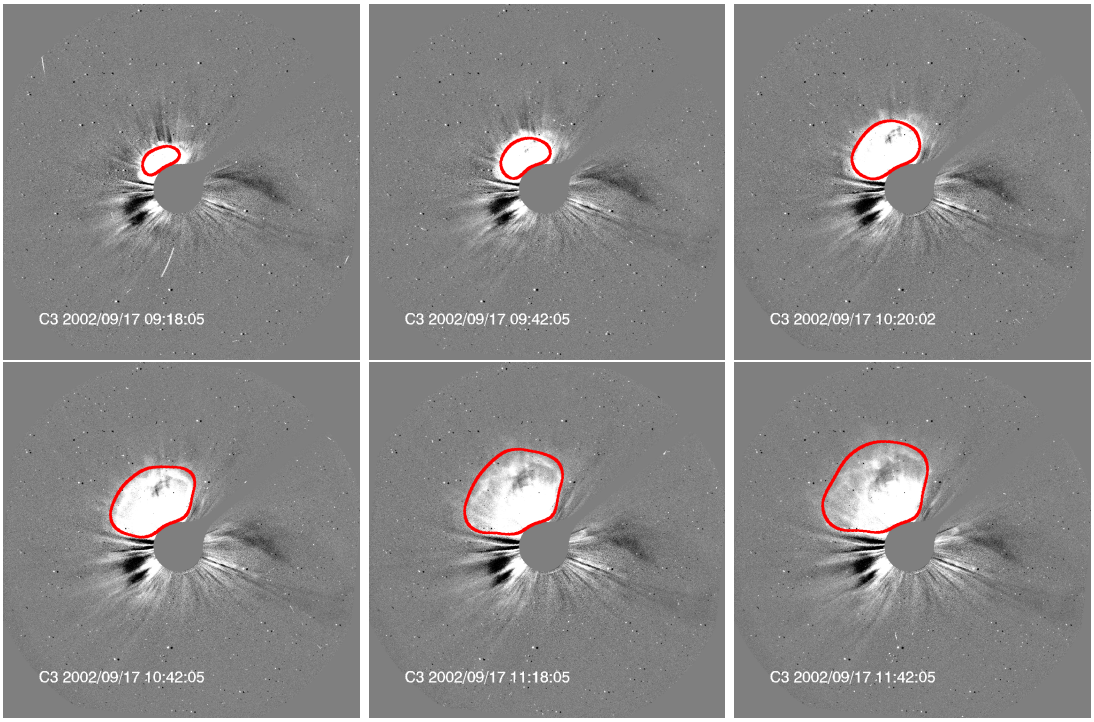
Nesta seção são apresentados os resultados das velocidades obtidos utilizando o método CORSET para três eventos. Também é apresentado os resultados do CDAW e do CACTus para os mesmo eventos, sendo possível comparar os resultados obtidos por cada método.

4.3.1 Evento I - CME observada em 2002/09/17

A Figura 4.2 apresenta o rastreamento feito pelo CORSET da CME observada pelo coronógrafo LASCO-C3 no dia 17 de setembro de 2002.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os gráficos da velocidade radial em função do ângulo para o evento observado em 17 de setembro de 2002, para o CORSET e o CACTus, respectivamente. O sistema de unidades é o mesmo para ambos os gráficos. Os asteriscos representam os dados e na Figura 4.3 são apresentadas as barras de incertezas associadas a velocidade radial. A parte sombreada na Figura 4.4 indicam os ângulos extremos encontrados pelo CORSET.

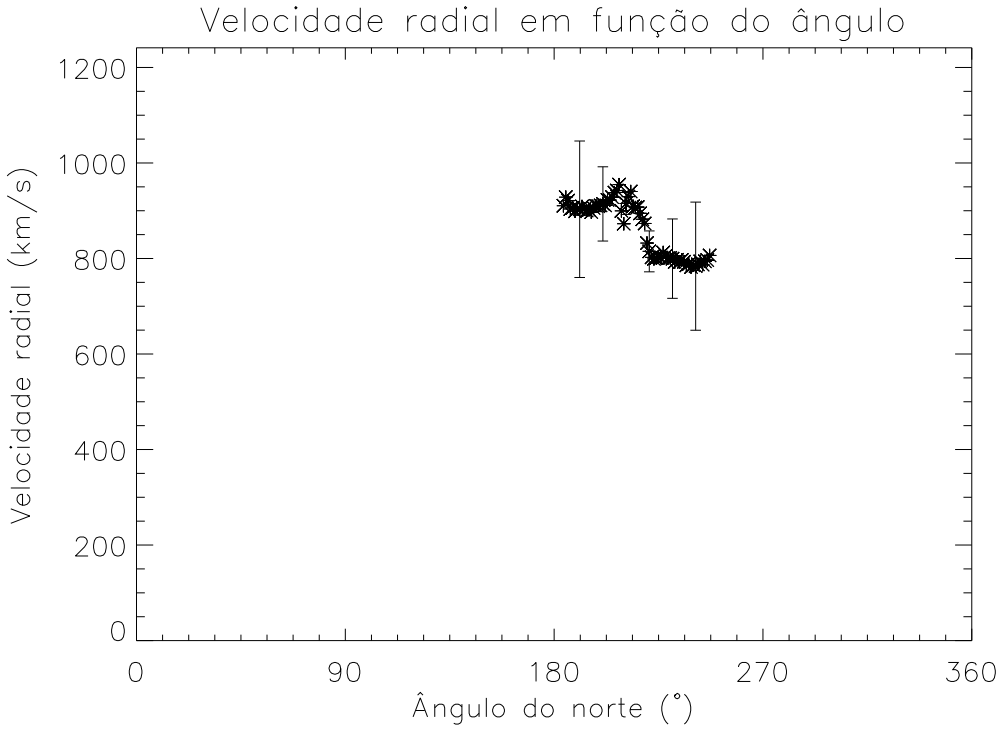
Figura 4.2 - Rastreamento do CORSET para CME observada em 2002/09/17.



CME observada em 17 de setembro de 2002 pelo LASCO-C3. Nas imagens o norte do sol está localizando na parte inferior da figura.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - Velocidade radial em função do ângulo para 2002/09/17 - CORSET.

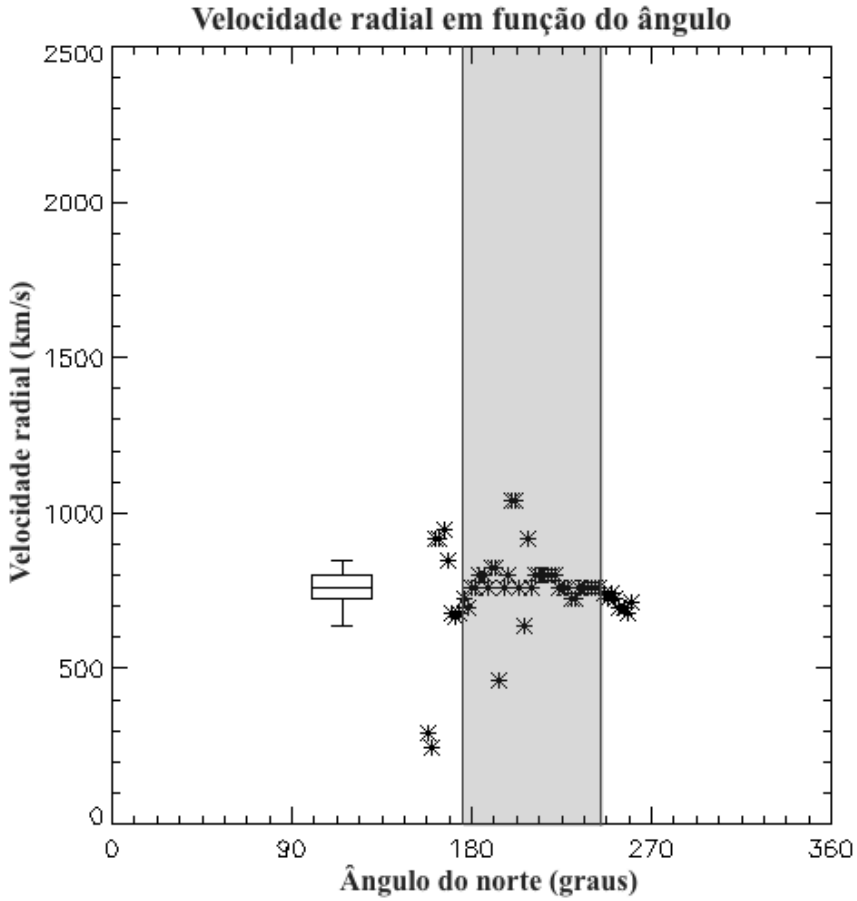


Os asteriscos correspondem aos dados e as barras são as incertezas associadas a velocidade radial.

Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os gráficos da distância radial em raios solares em função do tempo para o evento observado em 17 de setembro de 2002, para o CORSET e o CDAW, respectivamente. O sistema de unidades é o mesmo para ambos os gráficos. Na Figura 4.5 os quadrados representam os dados, as barras verticais são as incertezas associadas às distâncias e a curva sólida é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados. Na Figura 4.6 os losangos vermelhos correspondem aos mesmos instantes de tempo dos quadrados mostrados no gráfico da Figura 4.5. Os pontos indicados com losangos são aqueles obtidos no mesmo coronógrafo utilizado no presente estudo, LASCO-C3. Os demais pontos correspondem as observações do campo de visada do coronógrafo LASCO-C2. A linha contínua é o ajuste de primeira ordem para dados dos dois coronógrafos.

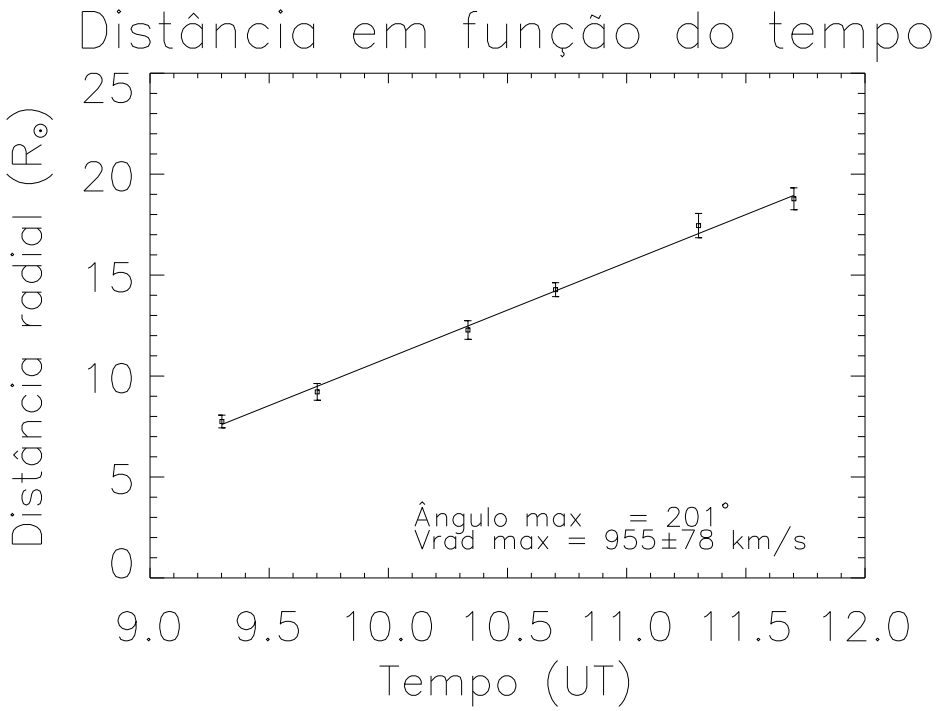
Figura 4.4 - Velocidade radial em função do ângulo para 2002/09/17 - CACTus.



Os asteriscos correspondem aos dados e a parte sombreada indica os limites angulares encontrados pelo CORSET.

Fonte: http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php.

Figura 4.5 - Distância em raios solares em função do tempo para 2002/09/17 - CORSET.



Os quadrados são os dados associados, a curva contínua é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados e as barras são as incertezas associadas a distância. O tempo está em horas UT e a distância em raios solares.

Fonte: Produção do autor.

Iremos utilizar os subíndices COR para o CORSET, CD para o CDAW e CAC para o CACTus. Em relação a velocidade radial, os seguintes resultados foram obtidos para o evento em questão:

- $V_{COR} = 955 \pm 78\, km/s$.
- $V_{CAC} = 762\, km/s$, com mínimo igual a $664\, km/s$ e máximo igual a $844\, km/s$.
- $V_{CD} = 959,6\, km/s$.

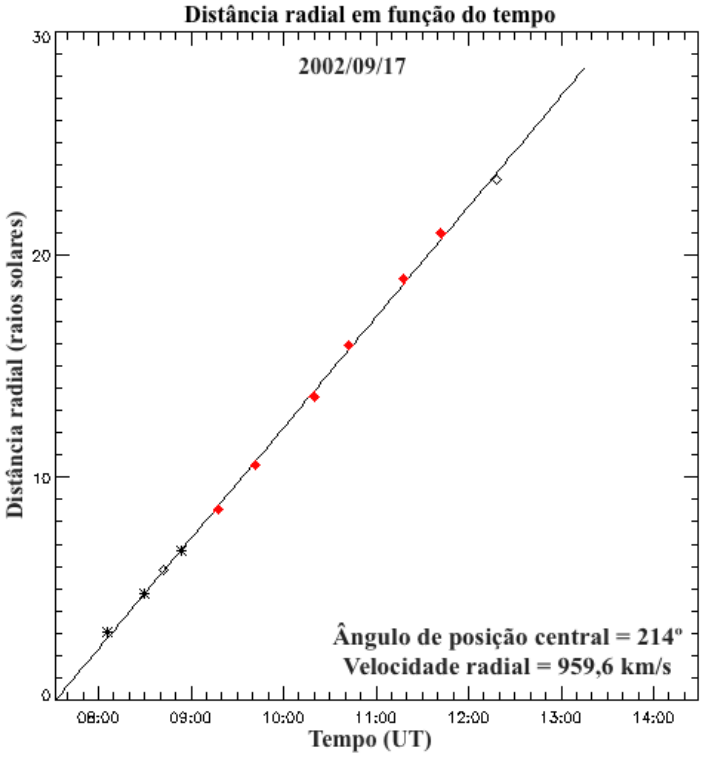
Em relação ao ângulo de posição central, PA, os seguintes resultados foram obtidos para o evento em questão:

- $PA_{COR} = 201°$.

- PA_{CAC} = 210°.

- PA_{CD} = 214°.

Figura 4.6 - Distância em raios solares em função do tempo para 2002/09/17 - CDAW.



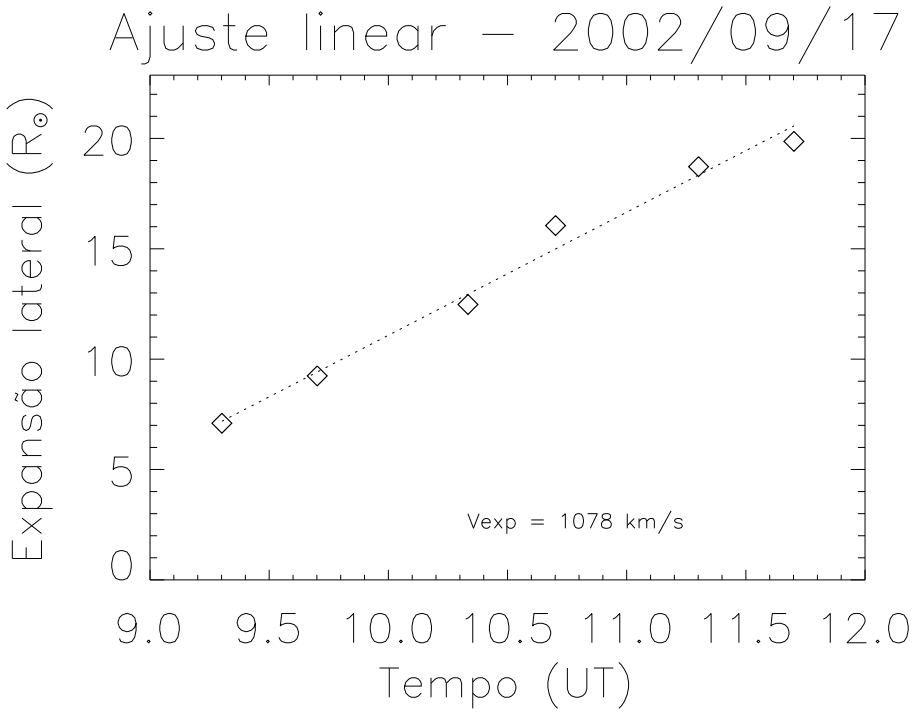
Os losangos vermelhos correspondem aos pontos do gráfico 4.5. O tempo está em horas UT e a distância em raios solares.

Fonte: `https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html`.

Neste evento, as velocidades radial do CORSET e do CDAW parecem concordarem entre si, ao passo que a do CACTus é bem inferior as demais, até mesmo quando são considerados os intervalos. Os ângulos de posição central são relativamente semelhantes para os três métodos.

A Figura 4.7 apresenta o gráfico da distância de expansão lateral em raios solares em função do tempo para a CME observada em 17 de setembro de 2002. Os losangos são os dados e a curva pontilhada é o ajuste de primeira ordem para esse conjunto de dados. A velocidade de expansão lateral estimada foi V_{exp} = 1078 km/s.

Figura 4.7 - Expansão lateral em raios solares em função do tempo para 2002/09/17.



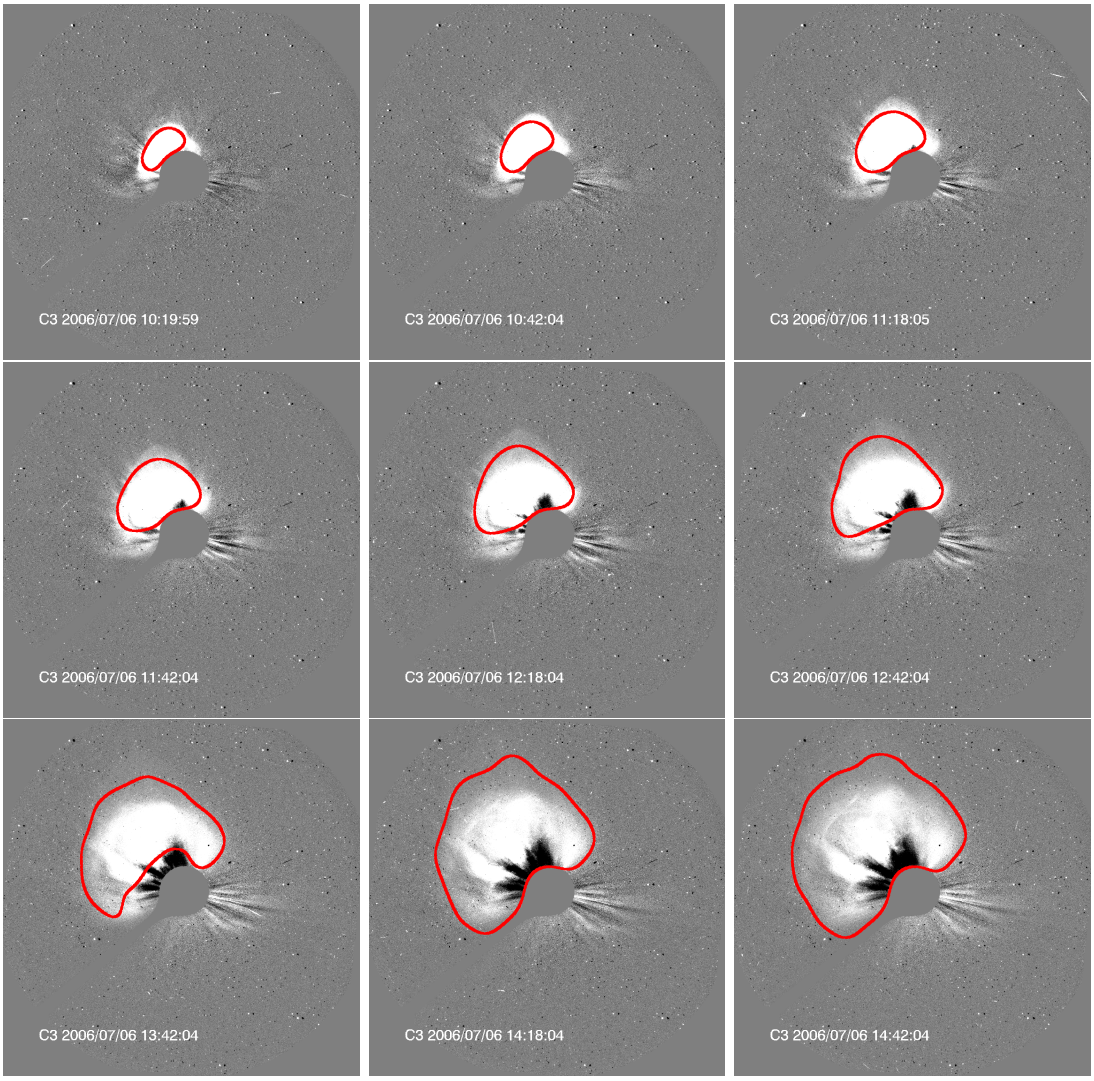
Os losangos correspondem aos dados e a curva pontilhada é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados.

Fonte: Produção do autor.

4.3.2 Evento II - CME observada em 2006/07/06

A Figura 4.8 apresenta o rastreamento feito pelo CORSET da CME observada pelo coronógrafo LASCO-C3 no dia 06 de julho de 2006.

Figura 4.8 - Rastreamento do CORSET para CME observada em 2006/07/06.

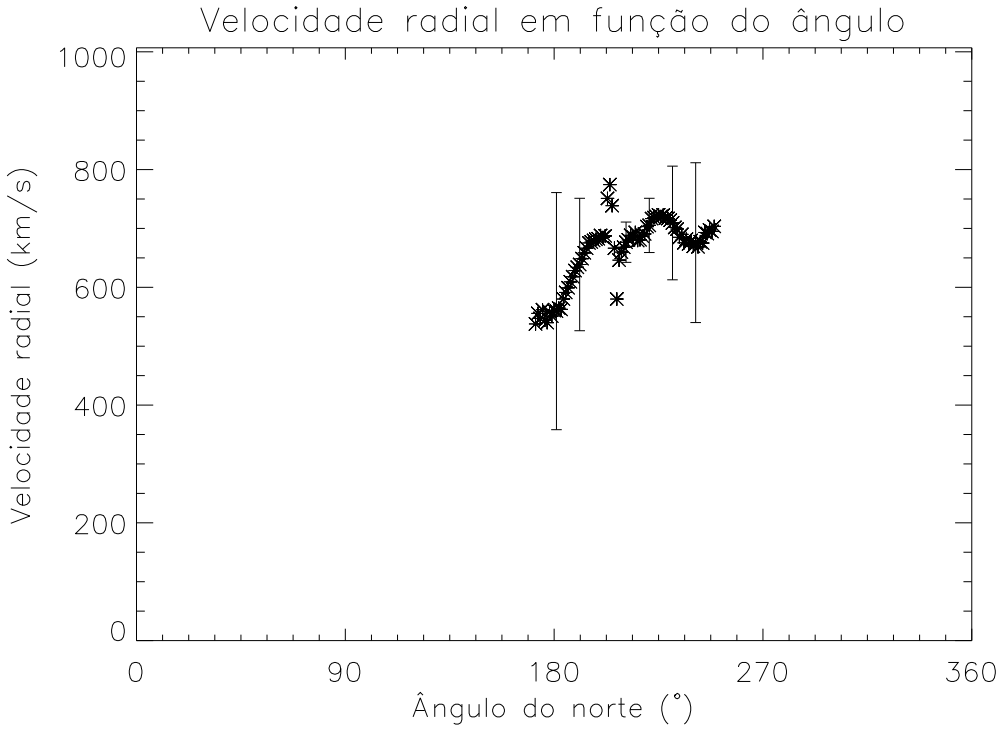


CME observada em 06 de julho de 2006 pelo LASCO-C3. Nas imagens o norte do sol está localizando na parte inferior da figura.

Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os gráficos da velocidade radial em função do ângulo para o evento observado em 06 de julho de 2006, para o CORSET e o CACTus, respectivamente. O sistema de unidades é o mesmo para ambos os gráficos. Os asteriscos representam os dados e na Figura 4.9 são apresentadas as barras de incertezas associadas a velocidade radial. A parte sombreada na Figura 4.10 indica os ângulos extremos encontrados pelo CORSET.

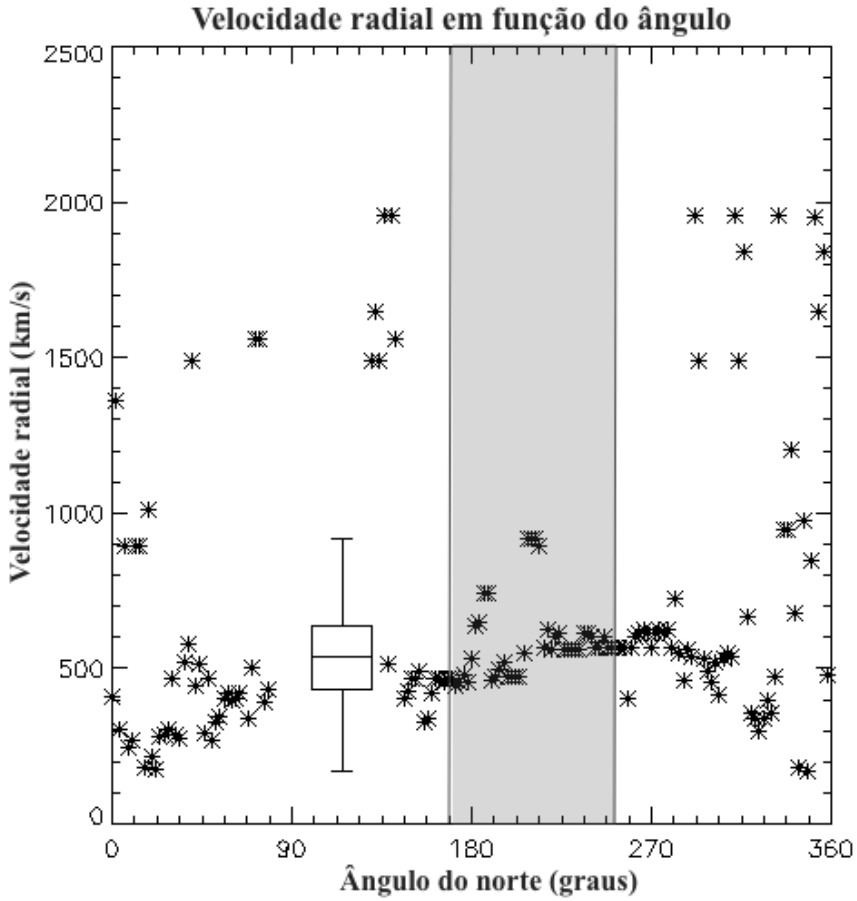
Figura 4.9 - Velocidade radial em função do ângulo para 2006/07/06 - CORSET.



Os asteriscos correspondem aos dados e as barras são as incertezas associadas a velocidade radial.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.10 - Velocidade radial em função do ângulo para 2006/07/06 - CACTus.

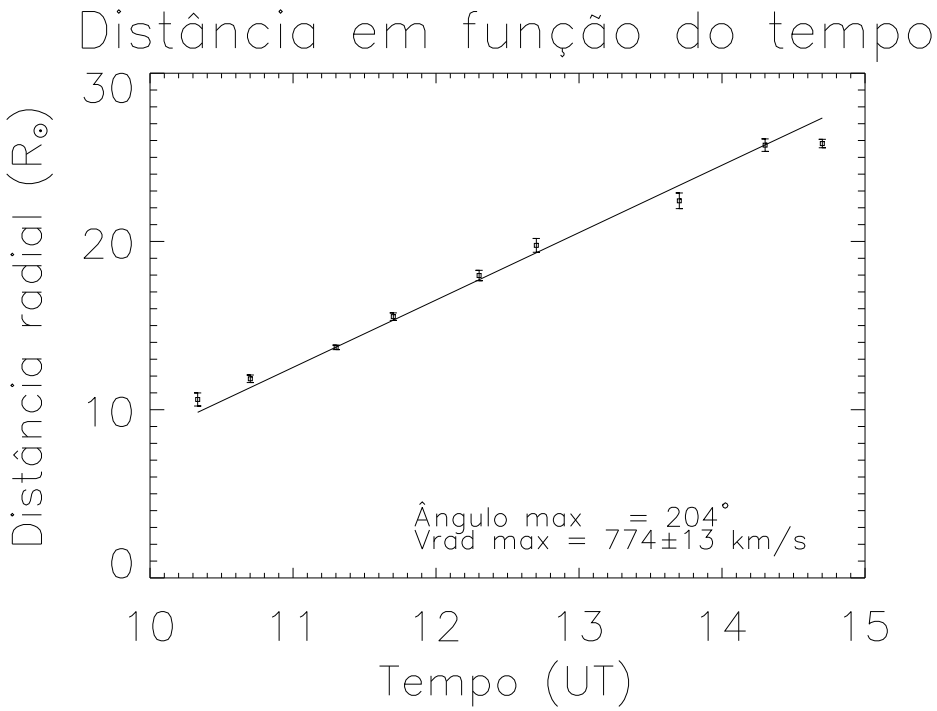


Os asteriscos correspondem aos dados e a parte sombreada indica os limites angulares encontrados pelo CORSET.

Fonte: http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os gráficos da distância radial em raios solares em função do tempo para o evento observado em 06 de julho de 2006, para o CORSET e o CDAW, respectivamente. O sistema de unidades é o mesmo para ambos os gráficos. Na Figura 4.11 os quadrados representam os dados, as barras verticais são as incertezas associadas às distâncias e a curva sólida é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados. Na Figura 4.12 os losangos vermelhos correspondem aos mesmos instantes de tempo dos quadrados mostrados no gráfico da Figura 4.11. Os pontos indicados com losangos são aqueles obtidos no mesmo coronógrafo utilizado no presente estudo, LASCO-C3. Os demais pontos correspondem as observações do campo de visada do coronógrafo LASCO-C2. A linha contínua é o ajuste de primeira ordem para dados dos dois coronógrafos.

Figura 4.11 - Distância em raios solares em função do tempo para 2006/07/06 - CORSET.



Os quadrados são os dados associados, a curva contínua é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados e as barras são as incertezas associadas a distância. O tempo está em horas UT e a distância em raios solares.

Fonte: Produção do autor.

Em relação a velocidade radial, os seguintes resultados foram obtidos para o evento em questão:

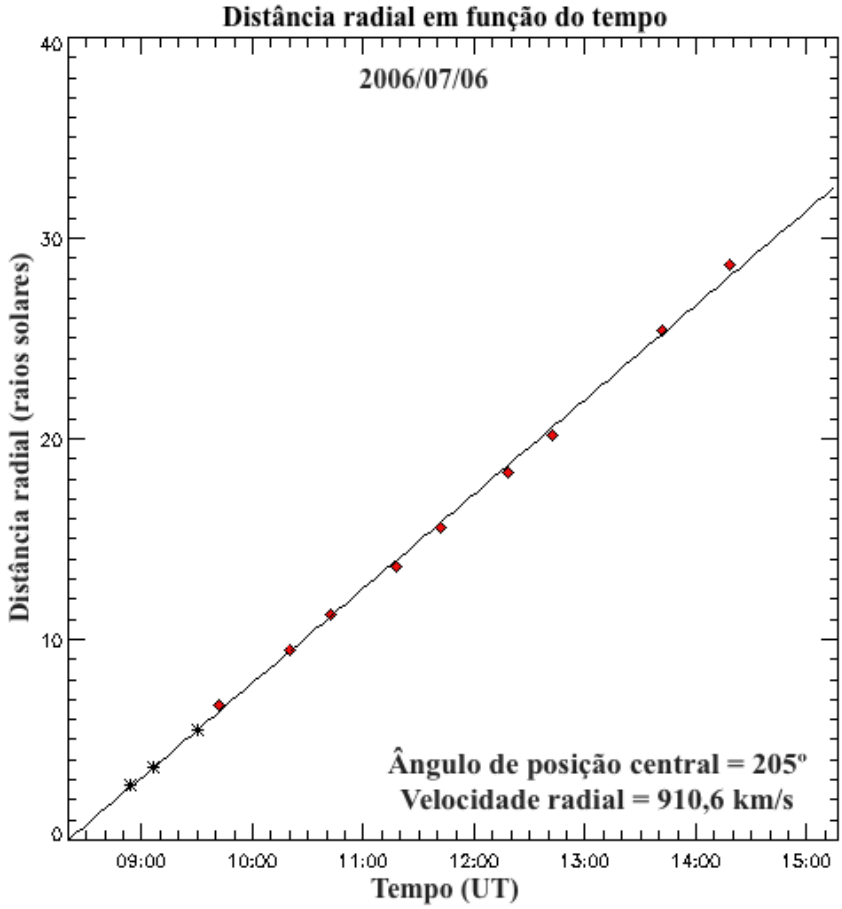
- $V_{COR} = 774 \pm 13\, km/s$.
- $V_{CAC} = 488\, km/s$, com mínimo igual a $168\, km/s$ e máximo igual a $919\, km/s$.
- $V_{CD} = 910,6\, km/s$.

Em relação ao ângulo de posição central, PA, os seguintes resultados foram obtidos para o evento em questão:

- $PA_{COR} = 204°$.

- PA_{CAC} = 285°.
- PA_{CD} = 205°.

Figura 4.12 - Distância em raios solares em função do tempo para 2006/07/06 - CDAW.



Os losangos vermelhos correspondem aos pontos do gráfico 4.11. O tempo está em horas UT e a distância em raios solares.

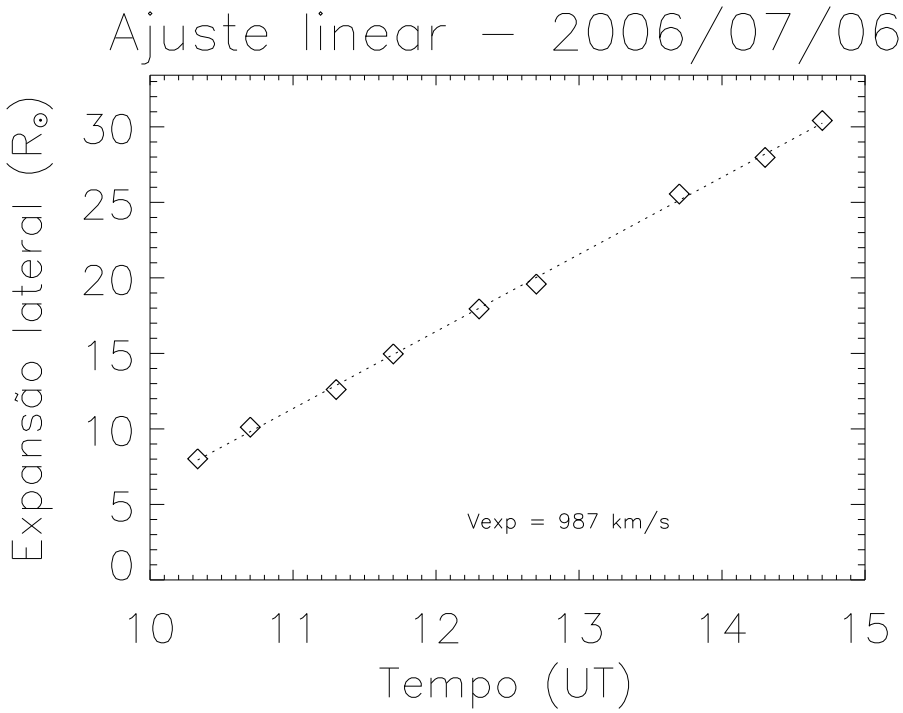
Fonte: `https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html`.

Neste evento, as velocidades radial resultam em valores bem diferentes para os três métodos, sendo a estimativa do CACTus muito inferior aos demais métodos. Os ângulos de posição central são similares para o CORSET e o CDAW, já o CACTus apresenta um valor superior aos demais.

A Figura 4.13 apresenta o gráfico da distância de expansão lateral em raios solares em função do tempo para a CME observada em 06 de julho de 2006. Os losangos

são os dados e a curva pontilhada é o ajuste de primeira ordem para esse conjunto de dados. A velocidade de expansão lateral estimada foi $V_{exp} = 987\,km/s$.

Figura 4.13 - Expansão lateral em raios solares em função do tempo para 2006/07/06.



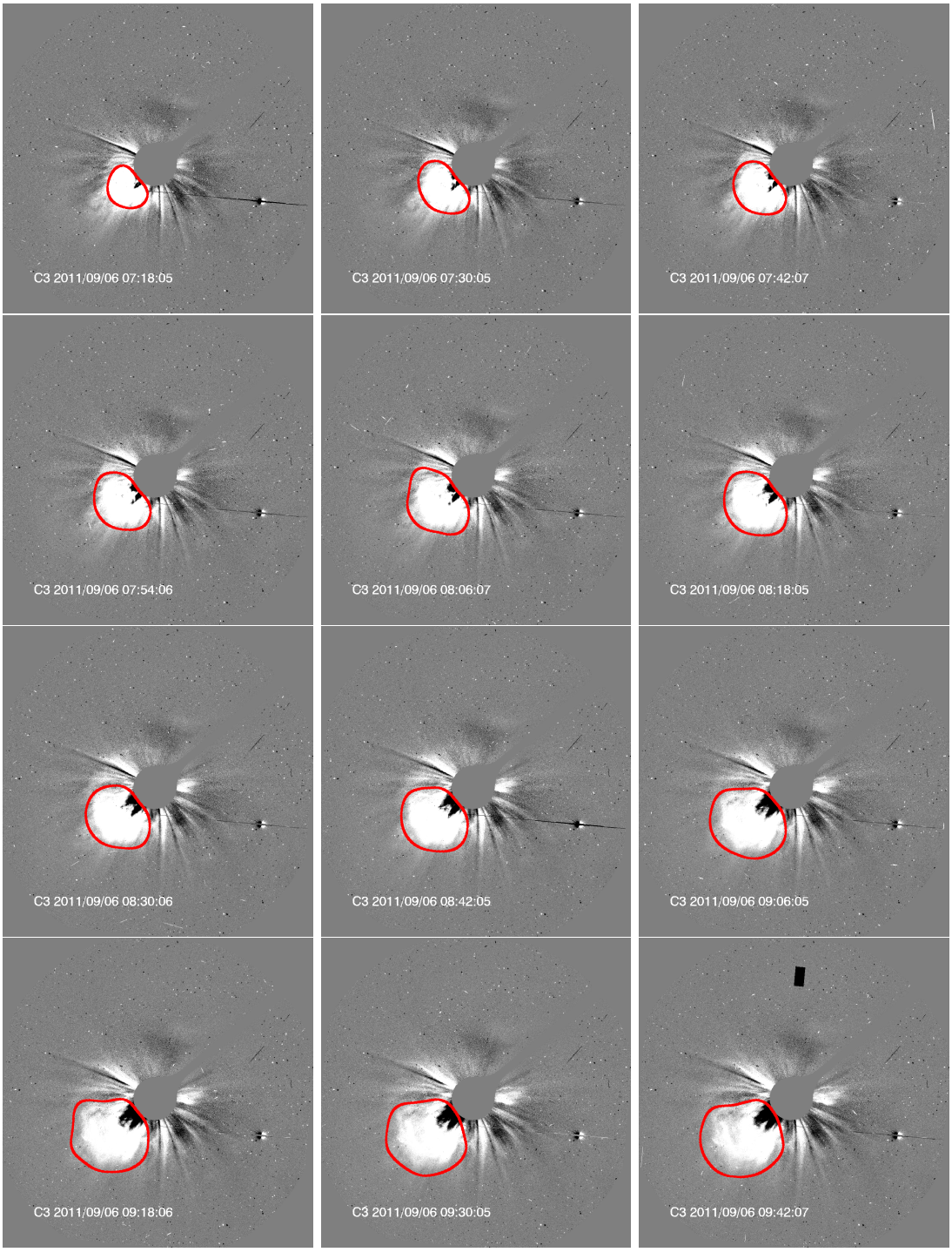
Os losangos correspondem aos dados e a curva pontilhada é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados.

Fonte: Produção do autor.

4.3.3 Evento III - CME observada em 2011/09/06

A Figura 4.14 apresenta o rastreamento feito pelo CORSET da CME observada pelo coronógrafo LASCO-C3 no dia 06 de setembro de 2011.

Figura 4.14 - Rastreamento do CORSET para CME observada em 2011/09/06.

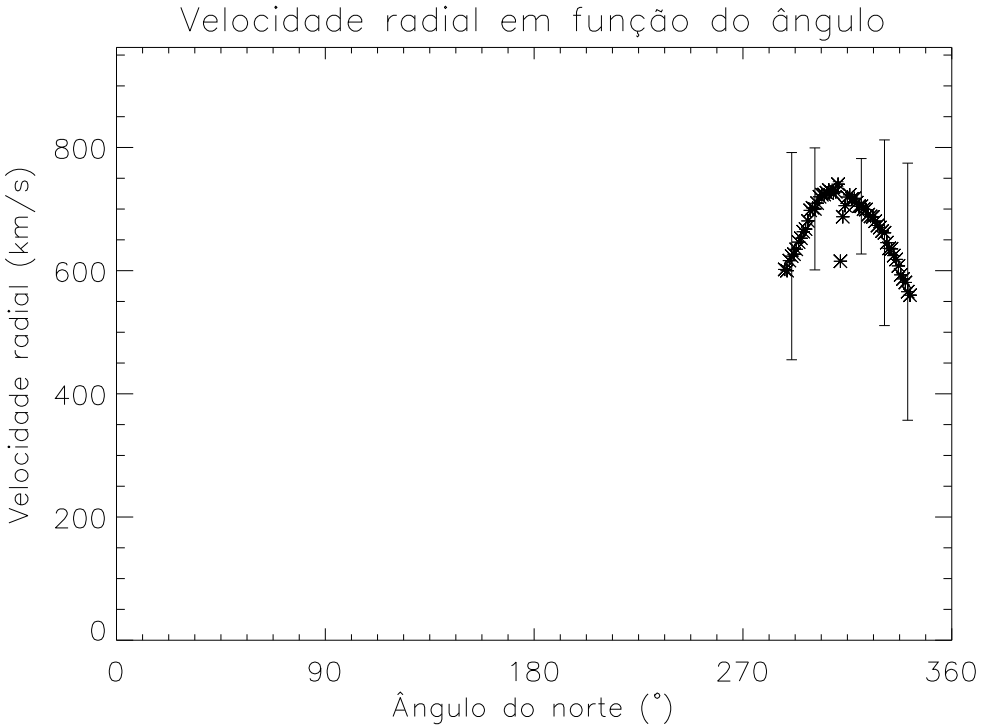


CME observada em 06 de setembro de 2011 pelo LASCO-C3. Nas imagens o norte do sol está localizando na parte inferior da figura.

Fonte: Produção do autor.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os gráficos da velocidade radial em função do ângulo para o evento observado em 06 de setembro de 2011, para o CORSET e o CACTus, respectivamente. O sistema de unidades é o mesmo para ambos os gráficos. Os asteriscos representam os dados e na Figura 4.15 são apresentadas as barras de incertezas associadas a velocidade radial. A parte sombreada na Figura 4.16 indica os ângulos extremos encontrados pelo CORSET.

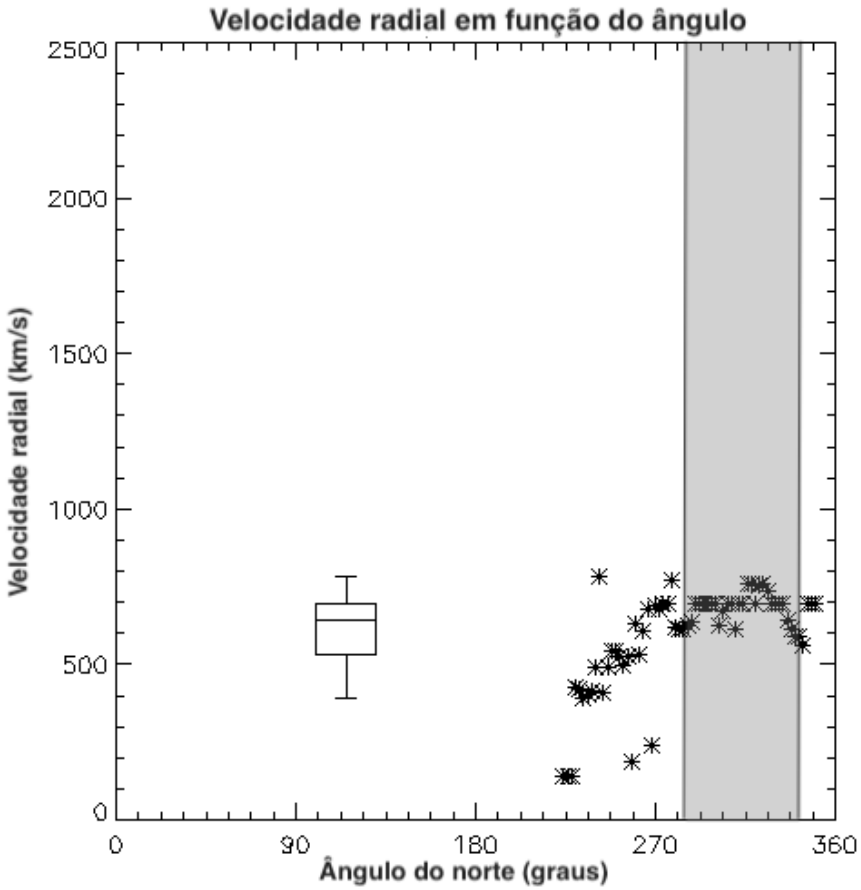
Figura 4.15 - Velocidade radial em função do ângulo para 2011/09/06 - CORSET.



Os asteriscos correspondem aos dados e as barras são as incertezas associadas a velocidade radial.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.16 - Velocidade radial em função do ângulo para 2011/09/06 - CACTus.

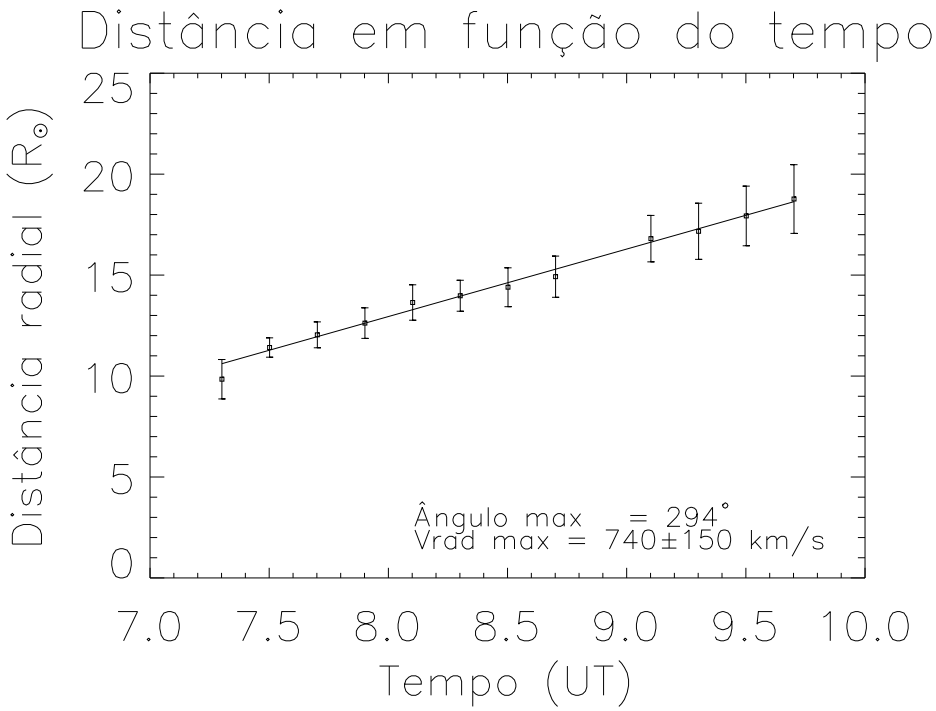


Os asteriscos correspondem aos dados e a parte sombreada indica os limites angulares encontrados pelo CORSET.

Fonte: http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os gráficos da distância radial em raios solares em função do tempo para o evento observado em 06 de setembro de 2011, para o CORSET e o CDAW, respectivamente. O sistema de unidades é o mesmo para ambos os gráficos. Na Figura 4.17 os quadrados representam os dados, as barras verticais são as incertezas associadas às distâncias e a curva sólida é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados. Na Figura 4.18 os losangos vermelhos correspondem aos mesmos instantes de tempo dos quadrados mostrados no gráfico da Figura 4.17. Os pontos indicados com losangos são aqueles obtidos no mesmo coronógrafo utilizado no presente estudo, LASCO-C3. Os demais pontos correspondem as observações do campo de visada do coronógrafo LASCO-C2. A linha contínua é o ajuste de primeira ordem para dados dos dois coronógrafos.

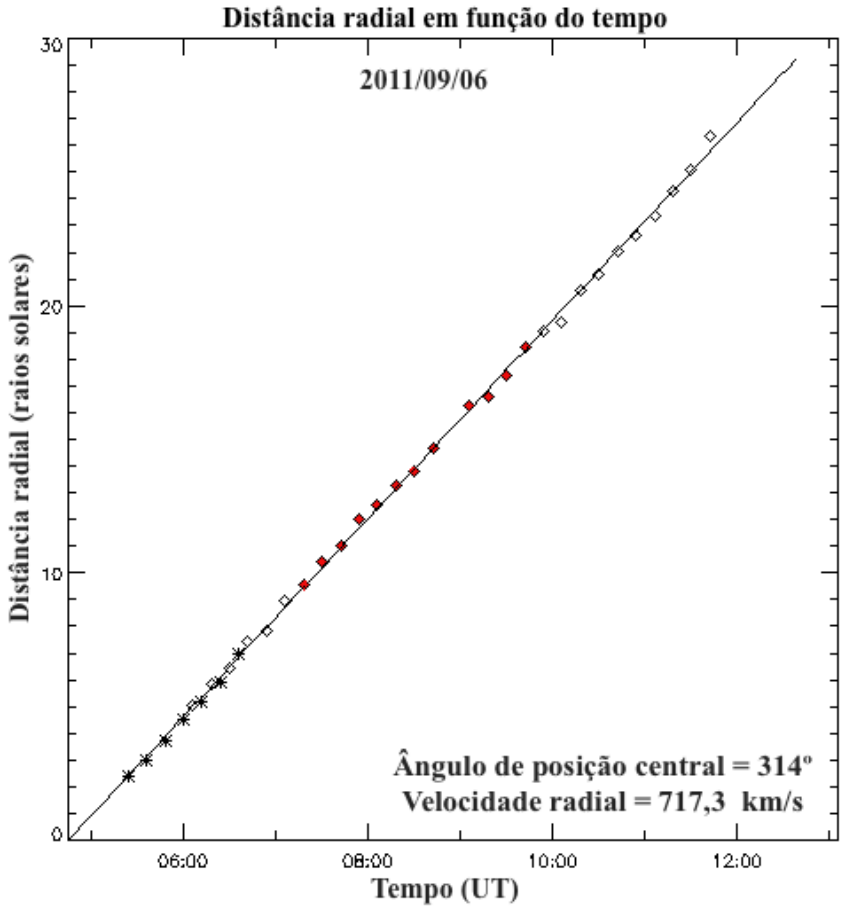
Figura 4.17 - Distância em raios solares em função do tempo para 2011/09/06 - CORSET.



Os quadrados são os dados associados, a curva contínua é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados e as barras são as incertezas associadas a distância. O tempo está em horas UT e a distância em raios solares.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.18 - Distância em raios solares em função do tempo para 2011/09/06 - CDAW.



Os losangos vermelhos correspondem aos pontos do gráfico 4.17. O tempo está em horas UT e a distância em raios solares.

Fonte: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html.

Em relação a velocidade radial, os seguintes resultados foram obtidos para o evento em questão:

- $V_{COR} = 740 \pm 150\, km/s$.
- $V_{CAC} = 679\, km/s$, com mínimo igual a $411\, km/s$ e máximo igual a $832\, km/s$.
- $V_{CD} = 717,3\, km/s$.

Em relação ao ângulo de posição central, PA, os seguintes resultados foram obtidos para o evento em questão:

- PA_{COR} = 294°.

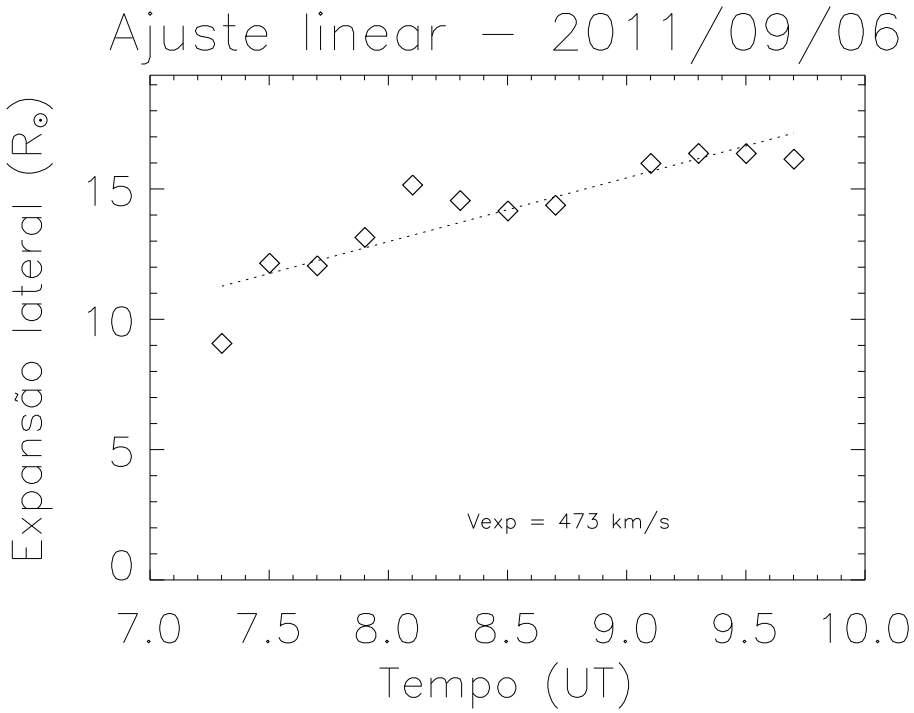
- PA_{CAC} = 286°.

- PA_{CD} = 314°.

Neste evento, tanto as velocidades quanto os ângulos resultaram em valores similares para os três métodos.

A Figura 4.19 apresenta o gráfico da distância de expansão lateral em raios solares em função do tempo para a CME observada em 06 de setembro de 2011. Os losangos são os dados e a curva pontilhada é o ajuste de primeira ordem para esse conjunto de dados. A velocidade de expansão lateral estimada foi V_{exp} = 473 km/s.

Figura 4.19 - Expansão lateral em raios solares em função do tempo para 2011/09/06.



Os losangos correspondem aos dados e a curva pontilhada é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados.

Fonte: Produção do autor.

4.4 Ressalvas na Estimativa das Incertezas

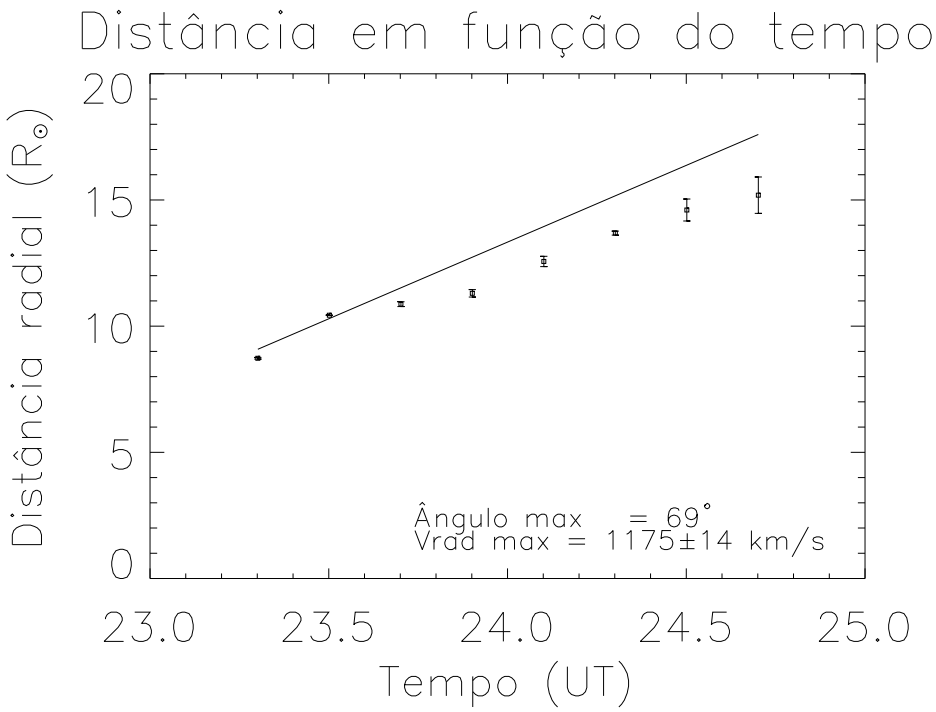
Nesta Dissertação, a velocidade radial é determinada a partir do coeficiente angular da reta que melhor se ajusta ao conjunto de pontos do gráfico de distância em função do tempo. Ao inserir uma estimativa de incerteza para cada ponto no gráfico de distância versus tempo, também atribui-se um peso relativo a cada ponto utilizado no melhor ajuste linear. Pontos com incerteza grande possuem uma incerteza relativa maior e aqueles com incerteza menor tem um peso menor. Ou seja, o ajuste linear passou a se ajustar não somente aos pontos, mas também as incertezas associadas a esses pontos.

Em alguns casos, notou-se que as incertezas de alguns pontos no gráfico de distância versus tempo apresentam valores até duas ordens de grandeza menores que o maior valor da incerteza para a CME em questão. Como consequência a função LINFIT força o ajuste linear a passar por esses pontos cujas incertezas são próximas de zero, o que pode comprometer a inclinação da reta e consequentemente a estimativa da velocidade radial.

A Figura 4.20 apresenta um exemplo de um evento onde as incertezas associadas aos dois primeiros pontos tendem a zero e o ajuste linear é forçado a passar por esses pontos. Nesse caso, é possível perceber que a curva encontrada não representa o melhor ajuste linear para esse conjunto de pontos, e portanto, essa estimativa da velocidade radial é incorreta.

Nos eventos # 11, 28, 36, 37 e 38, apresentados na Tabela 5.1, considerou-se que as estimativas das velocidades radiais foram comprometidas pelo problema mencionado acima. Como consequência esses cinco eventos foram desconsiderados nas análises feitas no Capítulo 5. Nos demais 31 eventos não se observou problema similar.

Figura 4.20 - Exemplo de evento em que o ajuste linear não foi considerado correto. Distância em raios solares em função do tempo para 2013/09/29.



Os quadrados são os dados, a curva contínua é o ajuste de primeira ordem para o conjunto de dados e as barras são as incertezas associadas a distância.

Fonte: Produção do autor.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos para os 41 eventos corretamente rastreados pelo CORSET, assim como as relações empíricas obtidas para esse conjunto de eventos.

A Tabela 5.1 contém a data da CME observada pelo LASCO, os tempos de chegada estimados pela lista de ICMEs de Richardson e Cane, a velocidade média do choque também estimada pela lista de ICMEs e as velocidades radial e de expansão calculadas usando o CORSET.

Na coluna 2 são apresentados a data e horário da primeira observação dos eventos correspondentes no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2.

A coluna 3 contém o tempo de chegada estimado do choque no ponto L1, expresso em horas. Esse valor é obtido ao calcular a diferença entre a data de chegada do choque e a data da primeira aparição da CME no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2 (RICHARDSON; CANE, 2010). Essas datas estão descritas na Tabela 3.1.

A coluna 4 contém o tempo de chegada estimado da ICME no ponto L1, expresso em horas. Esse valor é obtido ao calcular a diferença entre a data de chegada da ICME e a data da primeira aparição da CME no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2 (RICHARDSON; CANE, 2010).

Na quinta coluna estão incluídos os valores estimados da velocidade média do choque, expresso em quilômetros por segundo. A velocidade média do choque é a velocidade média calculada em relação a distância de 1 AU dividida pelo tempo de deslocamento que é obtido comparando-se o instante de observação na coroa (LASCO-C2) com o instante em que o choque é observado em L1 (RICHARDSON; CANE, 2010). O evento # 30 é o único nesse conjunto de dados que não possui um valor estimado para a velocidade média do choque, possivelmente porque não foi detectado o choque para esse evento.

Na sexta coluna estão os valores calculados para a velocidade radial acompanhados das respectivas incertezas associadas. Nas colunas 7, 8 e 9 são apresentados os valores calculados para a velocidade de expansão lateral. 'V_{exp} dat' é a velocidade de expansão lateral calculada a partir dos pontos rastreados pelo CORSET, 'V_{exp} sm' é um ajuste suave dos pontos rastreados e 'V_{exp} par' é uma ajuste dos pontos da frente da CME obtidos em cada instante de tempo por uma parábola. Todas as velocidades estão descritas em quilômetros por segundo.

Os eventos # 7, 11, 12, 20 e 22 não possuem valores calculados para as velocidades radial e de expansão devido à uma ambiguidade no rastreamento, que utiliza os pontos incados para calcular as velocidades. Ao rastrear esses cinco eventos, em pelo menos um quadro, as linhas que delimitam o evento se fecharam duplamente, como na terceira imagem da Figura 2.2. O problema ao calcular as velocidades ocorreu quando o algoritmo calculou as distâncias radial e de expansão utilizando a delimitação interna. Como resultado final, as velocidades eram constantes e inconsistentes com a observação. Para esses eventos específicos, não foi possível apenas eliminar os quadros com esse problema, porque não restariam quadros suficientes para fazer as análises. Vale ressaltar que para a maioria dos eventos essa particularidade não ocorreu e em alguns outros casos, foi possível apenas eliminar o(s) quadro(s) com problema sem comprometer os resultados finais. Esse tipo de problema não foi relatado em nenhum trabalho em que o CORSET foi utilizado para rastrear CMEs.

Tabela 5.1 - Eventos Rastreados Corretamente pelo CORSET.

#	LASCO-C2 CME (Y/M/D)	Tempo de viagem do choque (h)	Tempo de viagem da ICME (h)	Velocidade média do choque (km/s)	Vrad ± inc (km/s)	Vexp dat (km/s)	Vexp sm (km/s)	Vexp par (km/s)
1	2001/07/05 03:54	80,10	94,10	520	491 ± 97	426	424	429
2	2001/09/27 04:54	52,77	54,10	790	903 ± 210	1080	1074	974
3	2001/11/22 23:30	31,43	38,50	1320	1610 ± 134	1975	2255	1952
4	2001/12/26 05:30	72,13	90,50	580	889 ± 62	928	925	931
5	2002/03/15 23:06	62,27	77,90	667	1081 ± 23	1932	1780	1609
6	2002/07/15 20:30	43,55	63,50	955	969 ± 117	1320	1322	1314
7	2002/08/16 12:30	54,27	71,50	766	-	-	-	-
8	2002/09/17 08:06	45,90	59,90	910	955 ± 53	1078	1074	1117
9	2003/05/28 00:50	41,58	49,17	999	1214 ± 186	1198	1155	1174
10	2003/10/22 08:30	54,90	60,50	760	752 ± 214	1674	1625	1428
11	2003/10/26 17:54	32,20	32,60	1331	2106 ± 145	2372	2344	2187
12	2003/10/28 11:30	18,68	23,50	2185	-	-	-	-
13	2003/10/29 20:54	19,42	29,10	2138	-	-	-	-
14	2004/01/20 00:06	49,52	55,90	850	758 ± 212	1024	1031	943
15	2004/01/21 04:54	57,52	66,10	720	631 ± 173	835	818	699
16	2004/09/12 00:36	43,45	62,40	960	1410 ± 543	2076	2083	1541
17	2004/11/04 23:30	66,95	70,50	720	1110 ± 25	1413	1387	1095
18	2004/11/07 16:54	49,52	51,10	830	1768 ± 310	2697	2685	2030
19	2004/11/10 02:26	38,73	53,57	1080	2470 ± 882	3683	3689	3002

(Continua)

Tabela 5.1 - Continuação

#	LASCO-C2 CME (Y/M/D)	Tempo de viagem do choque (h)	Tempo de viagem da ICME (h)	Velocidade média do choque (km/s)	Vrad ± inc (km/s)	Vexp dat (km/s)	Vexp sm (km/s)	Vexp par (km/s)
20	2005/01/17 09:30	35,50	37,50	1170	-	-	-	-
21	2005/08/05 08:54	87,10	87,10	477	470 ± 23	509	504	537
22	2005/09/09 19:48	29,43	33,20	1423	-	-	-	-
23	2006/07/06 08:54	84,70	108,10	488	774 ± 13	987	980	994
24	2006/08/16 16:30	67,02	92,50	620	544 ± 119	734	749	759
25	2006/08/26 20:57	95,05	95,05	440	681 ± 45	861	861	876
26	2006/12/14 22:30	43,42	49,50	980	1021 ± 80	893	878	934
27	2010/04/08 04:54	80,17	92,10	520	377 ± 237	205	199	202
28	2011/02/15 02:36	70,90	88,40	590	1572 ± 82	1978	2229	3154
29	2011/08/02 06:36	63,28	70,40	670	928 ± 51	1468	1471	1482
30	2011/09/06 05:24	52,60	52,60	-	740 ± 150	473	465	405
31	2011/09/06 23:05	61,62	75,92	680	519 ± 470	848	814	745
32	2011/10/01 10:17	93,32	95,72	450	326 ± 3	204	206	202
33	2012/01/19 15:12	62,98	79,80	670	1322 ± 47	506	519	633
34	2012/03/07 00:24	34,65	50,60	1220	2279 ± 350	2292	2259	2340
35	2012/03/13 17:36	43,50	47,40	960	1962 ± 20	2076	2060	1878
36	2012/09/28 00:00	71,08	72,00	590	1233 ± 13	1579	1579	1238
37	2013/09/29 21:45	52,15	73,25	800	1175 ± 14	1652	1656	1083
38	2013/12/12 03:36	81,40	84,40	510	835 ± 19	1393	1393	1383

(Continua)

Tabela 5.1 - Continuação

#	LASCO-C2 CME (Y/M/D)	Tempo de viagem do choque (h)	Tempo de viagem da ICME (h)	Velocidade média do choque (km/s)	Vrad ± inc (km/s)	Vexp dat (km/s)	Vexp sm (km/s)	Vexp par (km/s)
39	2014/09/10 18:00	45,88	52,00	920	1364 ± 49	1163	1110	932
40	2014/09/12 19:24	102,60	102,60	410	865 ± 17	947	942	803
41	2015/09/18 05:00	49,00	75,00	850	714 ± 100	854	860	859

Fonte: Produção do autor.

5.1 Relação entre a Velocidade Radial e a Velocidade Média do Choque

A Figura 5.1 apresenta o gráfico da velocidade média do choque em função da velocidade radial para um conjunto de 30 eventos, obtidos após a remoção de 5 eventos sem os valores da velocidade radial, 1 evento sem o valor da velocidade média do choque e 5 eventos cuja estimativa da velocidade radial não estava correta do total de 41 eventos rastreados corretamente. Os círculos vermelhos são os dados associados a esse conjunto de eventos, as barras horizontais são as incertezas relacionadas as medidas da velocidade radial e a curva pontilhada é o ajuste linear que melhor descreve a relação entre as variáveis.

Seja a velocidade média do choque descrita por V_{tr} e a velocidade radial descrita por V_{rad}. A partir do conjunto de eventos estudado e considerando-se que há um relação linear entre V_{rad} e V_{tr}, obtém-se a seguinte relação empírica:

$$V_{tr} = 0,3\,V_{rad} + 434,3 \tag{5.1}$$

Com coeficiente de correlação $R_v = 0,74$.

O coeficiente de correlação entre duas variáveis (x,y) é definido por (CASELLA; BERGER, 2001):

$$R(x,y) = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{x_i-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y_i-\mu_y}{\sigma_y}\right)$$

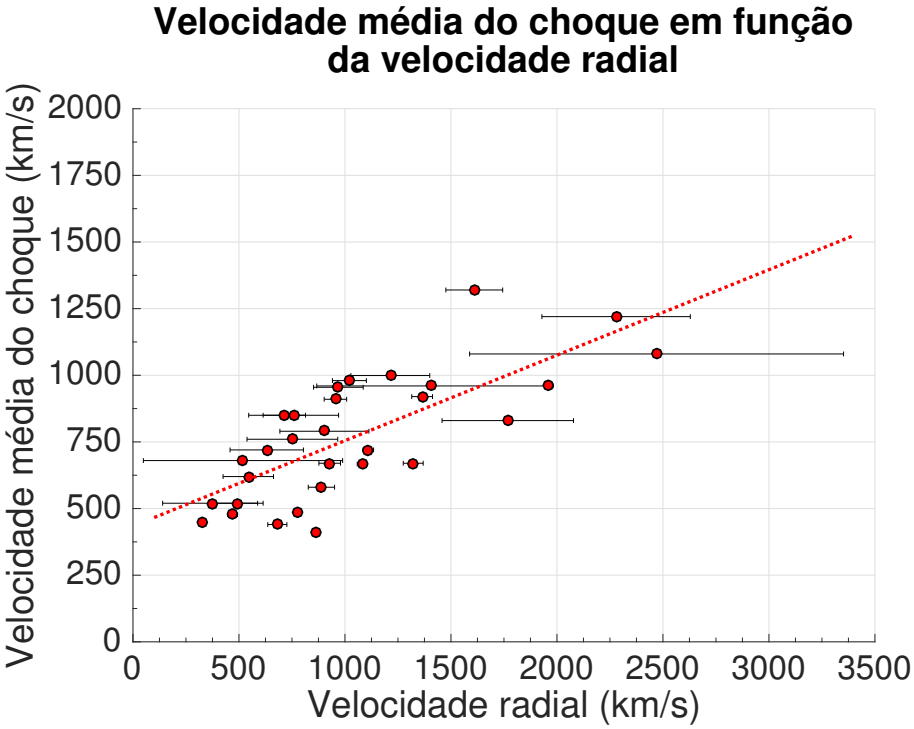
Onde N é o número de elementos de (x,y), x_i e y_i são i-ésimo elemento de x e y, μ_x e μ_y são a média de x e y, e σ_x e σ_y são o desvio padrão de x e y, respectivamente.

A partir da Figura 5.1 é possível perceber que as CMEs com velocidades altas próximas do Sol tem um decréscimo na velocidade ao se propagar pela heliosfera. Por outro lado, os eventos # 1, 14, 15, 24, 27, 31, 32 e 41 apresentam o comportamento contrário, de modo que a velocidade é maior em 1 AU em relação a velocidade calculada próxima ao Sol. Outro aspecto que pode ser notado é que o valor absoluto da diferença entre a velocidade radial medida na coroa solar, V_{rad}, e a velocidade média do choque V_{tr} é maior nos casos em que V_{tr} é menor que V_{rad}, nos casos em que as CMEs apresentam desaceleração, do que nos casos onde V_{rad} é maior que V_{tr}, nos casos em que as CMEs apresentam tendência de aceleração.

Gopalswamy et al. (2000) fizeram um estudo mostrando que o vento solar influência na propagação das CMEs na heliosfera. Eles encontraram que as CMEs rápidas eram desaceleradas enquanto as CMEs lentas eram aceleradas ao se propagarem pela heliosfera. As CMEs foram denotadas como rápidas ou lentas de acordo com uma determinada velocidade crítica, que no caso do estudo de Gopalswamy et al. (2000) foi de $405\,km/s$.

Para o conjunto de eventos estudados também encontrou-se CMEs que foram aceleradas e desaceleradas ao se propagarem pela heliosfera.

Figura 5.1 - Velocidade média do choque para 1 AU em função da velocidade radial.



Os círculos vermelhos são os dados, as barras horizontais representam as incertezas associadas as medidas da velocidade radial e a linha pontilhada vermelha é a curva ajustada para os dados.

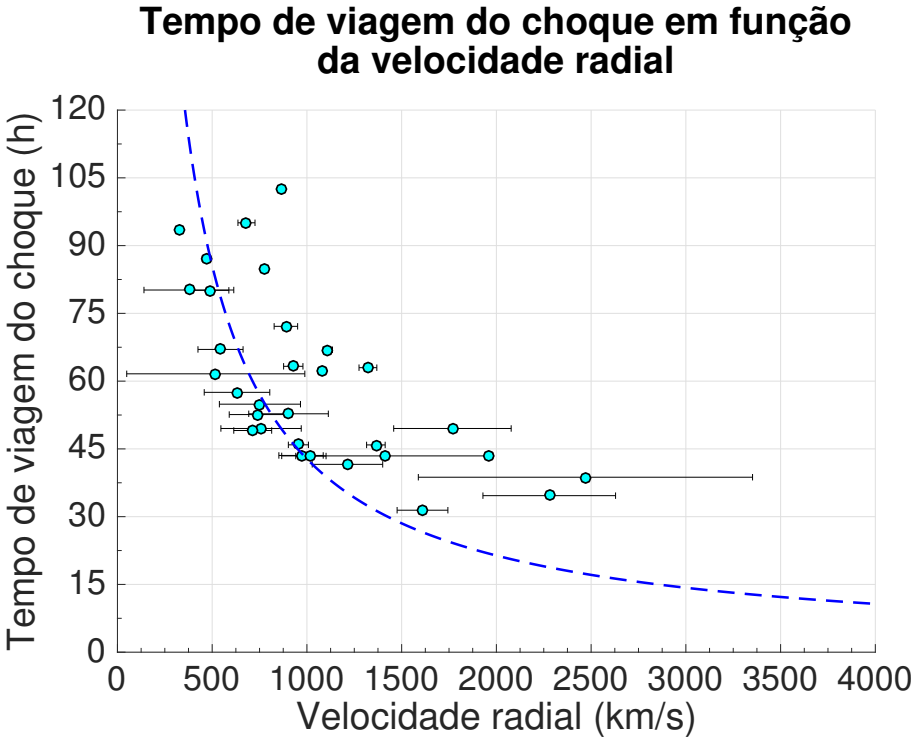
Fonte: Produção do autor.

5.2 Relação entre os Tempos de Chegada e a Velocidade Radial

As Figuras 5.2 e 5.3 mostram os gráficos da velocidade radial em função do tempo de viagem do choque e da ICME, respectivamente, para um conjunto de 31 eventos,

obtidos após a remoção de 5 eventos sem os valores das velocidades e 5 eventos cuja estimativa da velocidade radial não estava correta do total de 41 eventos rastreados corretamente. Os círculos/losangos são os dados, as barras horizontais são as incertezas relacionadas as medidas da velocidade radial. Os coeficientes de correlação são $R_{Sh} = -0,64$ e $R_{ICME} = -0,62$, respectivamente.

Figura 5.2 - Tempo de chegada do choque versus velocidade radial.



Os círculos ciano são os dados e as barras horizontais representam as incertezas associadas as medidas da velocidade radial. A linha tracejada corresponde à situação ideal em que a velocidade é considerada constante até 1 AU, levando em consideração o conjunto de dados.

Fonte: Produção do autor.

Assumindo que o choque e a ICME se propagam pela heliosfera com velocidade constante até 1 AU, de modo que pode ser descrita pela equação

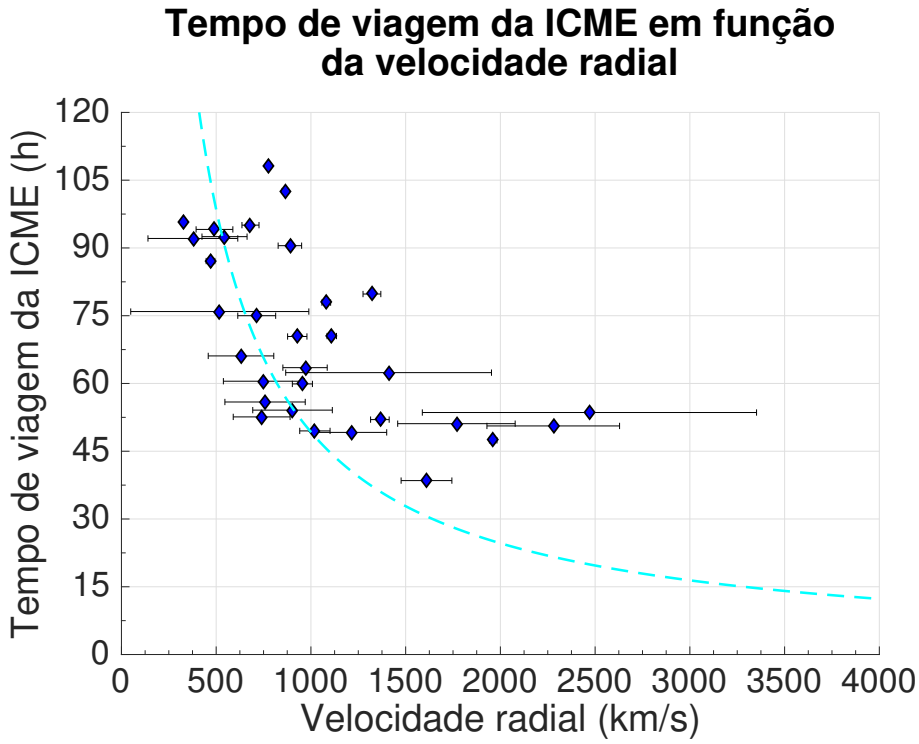
$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

e $\Delta S = 1\,AU$ nessa situação, então

$$\Delta t = \frac{1\,AU}{V} \tag{5.2}$$

As curvas tracejadas nas Figuras 5.2 e 5.3 podem ser descritas pela Equação 5.2, de modo que correspondem a situação ideal em que a CME viaja com velocidade constante e aceleração nula até 1 AU.

Figura 5.3 - Tempo de chegada da ICME em função da velocidade radial.



Os losangos azuis são os dados e as barras horizontais representam as incertezas associadas as medidas da velocidade radial. A linha tracejada corresponde à situação ideal em que a velocidade é considerada constante até 1 AU, levando em consideração o conjunto de dados.

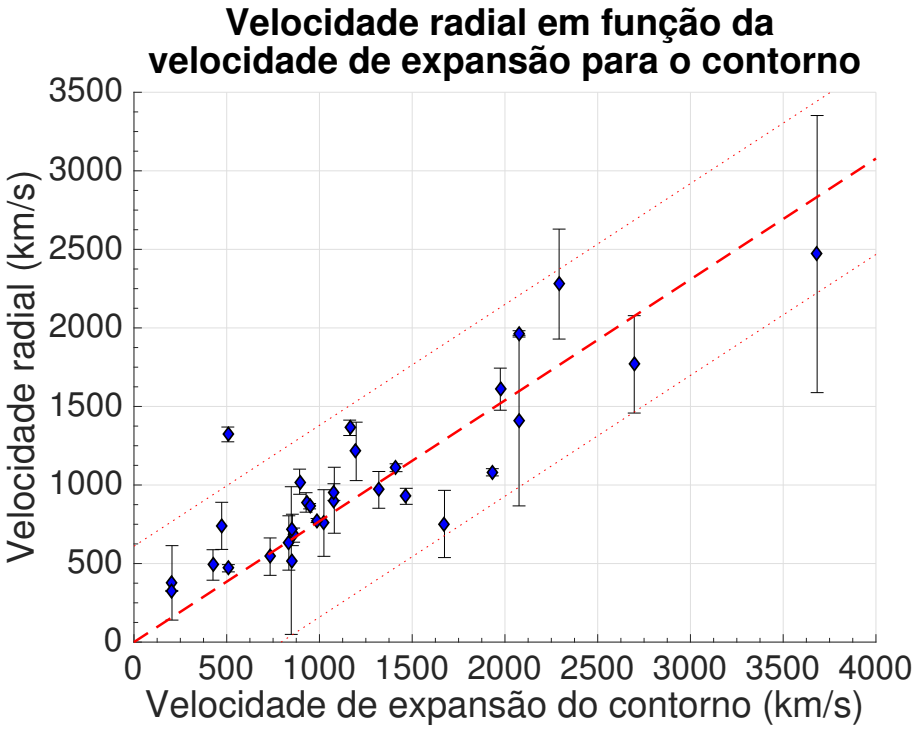
Fonte: Produção do autor.

A curva 'ideal' indica que quanto mais alta a velocidade da CME menor é o tempo de viagem pela heliosfera. Entretanto, é visível o espalhamento dos dados em torno da curva 'ideal', de modo que, considerar a velocidade constante possa não ser a melhor abordagem nessa situação, ou ainda, a velocidade radial não descreva completamente o movimento da CME.

5.3 Relação entre as Velocidades Radial e de Expansão Lateral

Na tentativa de aprimorar a descrição cinemática das CMEs e tentar prever a chegada de eventos na Tinca, estamos usando a velocidade de expansão lateral como aproximação para a velocidade radial. Assim, é necessário encontrar a relação entre essas duas quantidades. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam os gráficos da velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral, para um conjunto de 31 eventos. A principal diferença entre os três gráficos é o método utilizado para calcular a velocidade de expansão lateral.

Figura 5.4 - Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do contorno.



Os losangos azuis são os dados associados as duas grandezas, as barras verticais são as incertezas associadas as medidas da velocidade radial, a linha vermelha tracejada é o ajuste linear associado ao conjunto de dados e as linhas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95 %.

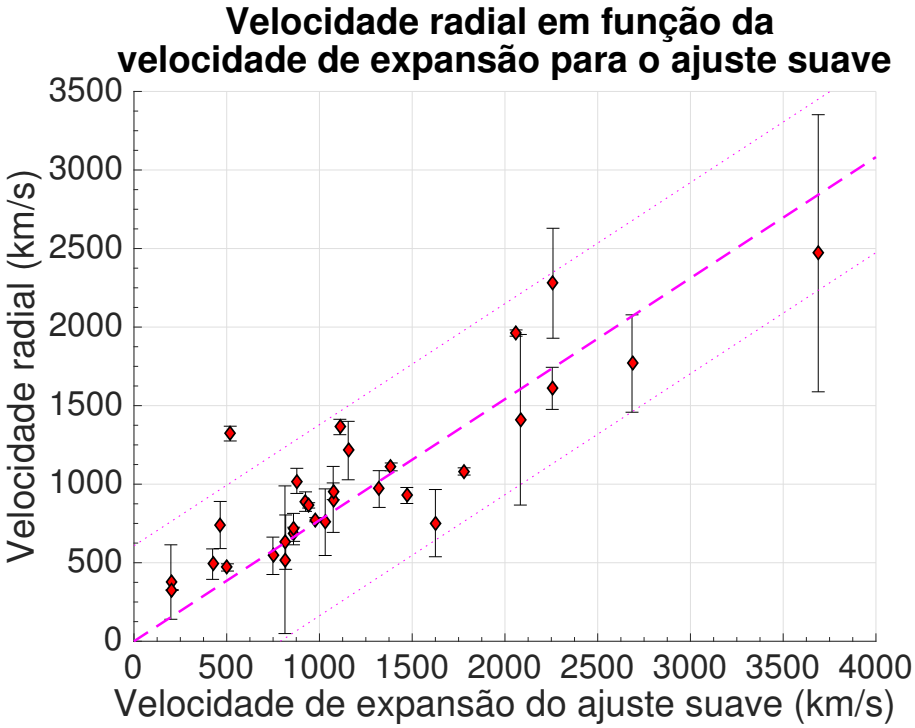
Fonte: Produção do autor.

Os losangos são os dados observacionais, as barras verticais são as incertezas associadas as medidas da velocidade radial, as curvas tracejadas são os ajuste de primeira ordem e as curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95 %, equiva-

lente a duas vezes o desvio padrão.

Os ajustes lineares dos gráficos passam obrigatoriamente pelo ponto (0,0) porque fisicamente, quando a velocidade frontal da CME se anula é razoável assumir que a velocidade de expansão lateral também se anule.

Figura 5.5 - Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'.



Os losangos vermelhos são os dados associados as duas grandezas, as barras verticais são as incertezas associadas as medidas da velocidade radial, a linha rosa tracejada é o ajuste linear associado ao conjunto de dados e as linhas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95 %.

Fonte: Produção do autor.

As equações matemáticas associadas aos ajuste de cada gráfico são:

i. Para os dados do contorno, onde V_{expC} é a velocidade de expansão lateral do contorno.

$$V_{rad} = 0,77\, V_{expC} \tag{5.3}$$

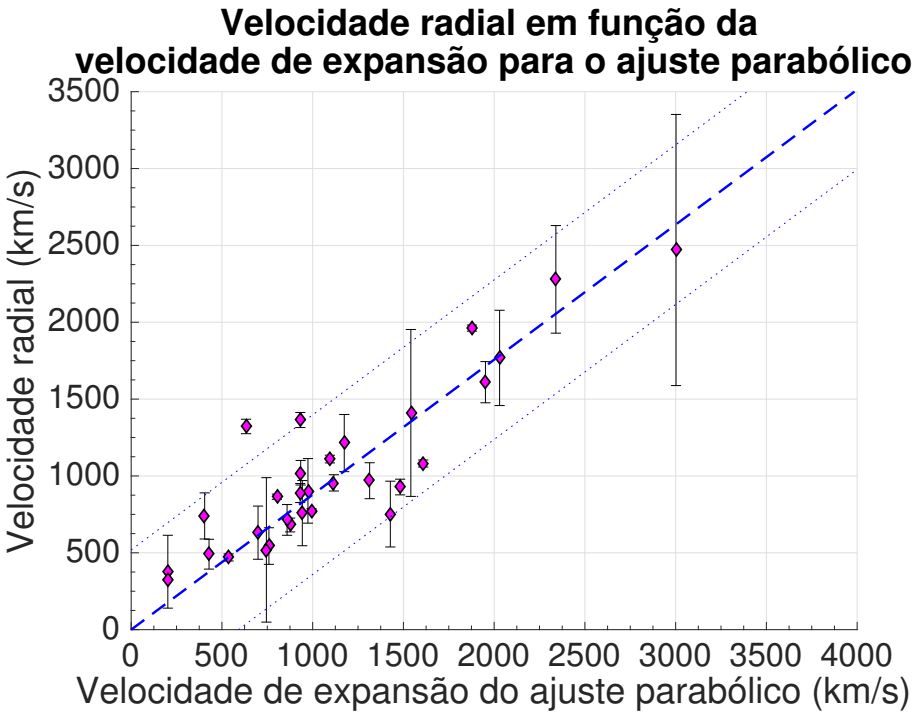
ii. Para os dados do 'ajuste suave', onde $V_{exp\,S}$ é a velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'.

$$V_{rad} = 0,77\,V_{exp\,S} \tag{5.4}$$

iii. Para os dados do ajuste parabólico, onde $V_{exp\,P}$ é a velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico.

$$V_{rad} = 0,88\,V_{exp\,P} \tag{5.5}$$

Figura 5.6 - Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico.



Os losangos rosas são os dados associados as duas grandezas, as barras verticais são as incertezas associadas as medidas da velocidade radial, a linha azul tracejada é o ajuste linear associado ao conjunto de dados e as linhas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95 %.

Fonte: Produção do autor.

As relações empíricas expressas pelas Equações 5.3 e 5.4 são diferentes da relação 4.1, também empírica, obtida por Dal Lago et al. (2003). Já a Equação 5.5 é similar

a 4.1. Vale ressaltar que a relação 4.1 foi obtida para um conjunto de dados anterior aos estudados neste trabalho, de janeiro de 1997 até abril de 2001. Esse mesmo período foi estudado por Braga et al. (2012) utilizando o método CORSET, obtendo a relação $V_{rad} = (0,87 \pm 0,08)\, V_{exp}$.

Os coeficientes de correlação são, respectivamente, $R_{contour} = 0,87$, $R_{smooth} = 0,87$ e $R_{parabolic} = 0,89$. Os coeficientes de correlação mostram que a velocidade radial e as velocidades de expansão lateral são fortemente correlacionadas, o que possibilita utilizar a velocidade de expansão lateral como uma aproximação para determinar tempos de chegada de CMEs.

5.4 Relação entre os Tempos de Chegada e as Velocidades de Expansão Lateral

Nessa seção serão apresentadas as relações empíricas obtidas entre tempos de chegada de CMEs e velocidades de expansão lateral. A seção está subdividida em três partes de acordo com o método utilizado para calcular a velocidade de expansão lateral.

5.4.1 Método associado ao contorno

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os gráficos do tempo de chegada do choque e da ICME em função da velocidade de expansão lateral do contorno, para um conjunto de 36 eventos. Os círculos são os dados associados a esse conjunto de eventos. A curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico e as curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%, equivalente a duas vezes o desvio padrão.

Matematicamente, as curvas contínuas podem ser expressas como:

i. Para o tempo de chegada do choque, Figura 5.7.

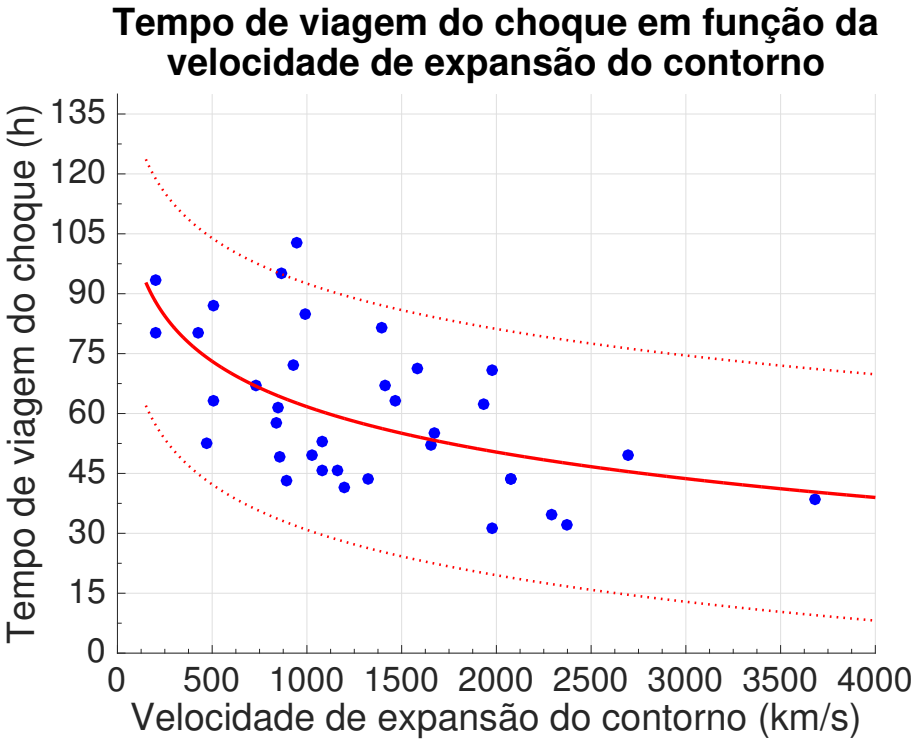
$$T_{trCS} = 174,98 - 16,40 \ln(V_{expC}) \tag{5.6}$$

ii. Para o tempo de chegada da ICME, Figura 5.8.

$$T_{trCI} = 181,47 - 15,90 \ln(V_{expC}) \tag{5.7}$$

Com T_{trCS} e T_{trCI} em horas e V_{expC} em quilômetros por segundo. Seja uma CME, cuja velocidade de expansão lateral é igual a $500\, km/s$, por exemplo, utilizando a Equação 5.6 o tempo de chegada é 74 ± 15 horas.

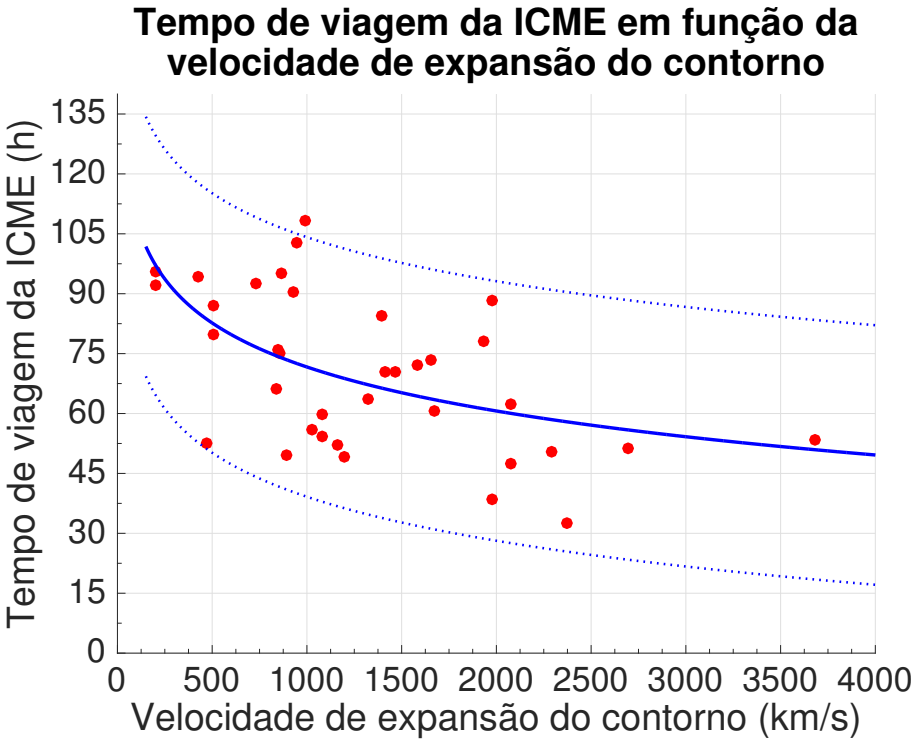
Figura 5.7 - Tempo de chegada do choque em função da velocidade de expansão lateral do contorno.



Os círculos azuis são os dados, a curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico para o conjunto de 36 pontos, definido pela equação $T_{trCS} = 174,98 - 16,40 \ln(V_{expC})$. As curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.8 - Tempo de chegada da ICME em função da velocidade de expansão lateral do contorno.



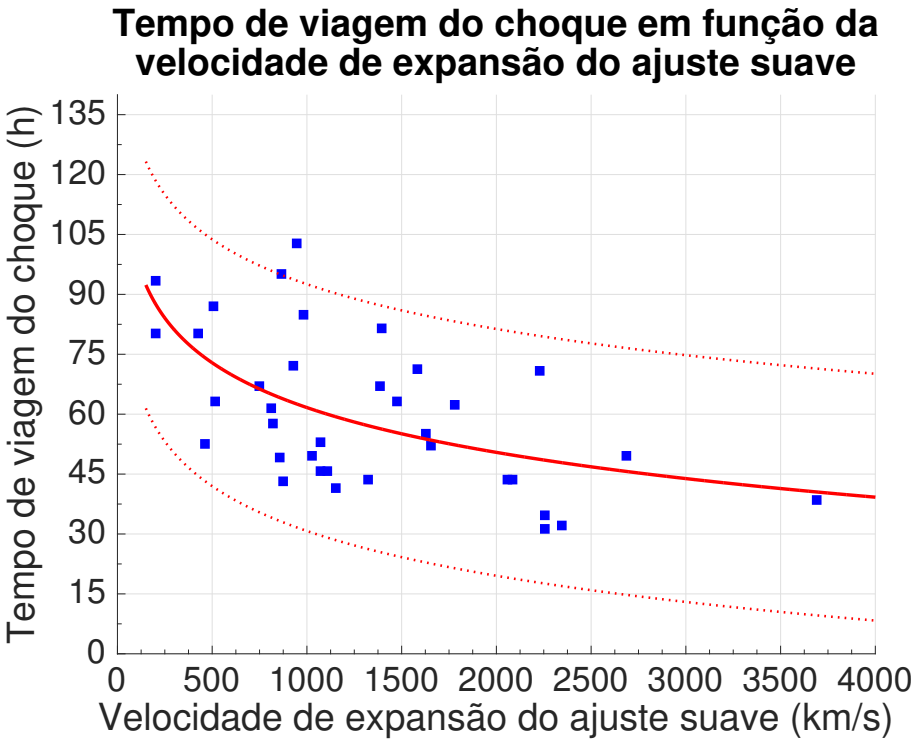
Os círculos vermelhos são os dados, a curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico para o conjunto de 36 pontos, definido pela equação $T_{tr\,CI} = 181,47 - 15,90\,\ln(V_{exp\,C})$. As curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Produção do autor.

5.4.2 Método associado ao 'ajuste suave'

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram os gráficos do tempo de chegada do choque e da ICME em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave', para um conjunto de 36 eventos. Os quadrados são os dados associados a esse conjunto de eventos. A curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico e as curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%, equivalente a duas vezes o desvio padrão.

Figura 5.9 - Tempo de chegada do choque em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'.



Os quadrados azuis são os dados, a curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico para o conjunto de 36 pontos, definido pela equação $T_{tr\,SS} = 173,45 - 16,18\,\ln(V_{exp\,S})$. As curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Produção do autor.

Matematicamente, as curvas contínuas podem ser expressas como:

i. Para o tempo de chegada do choque, Figura 5.9.

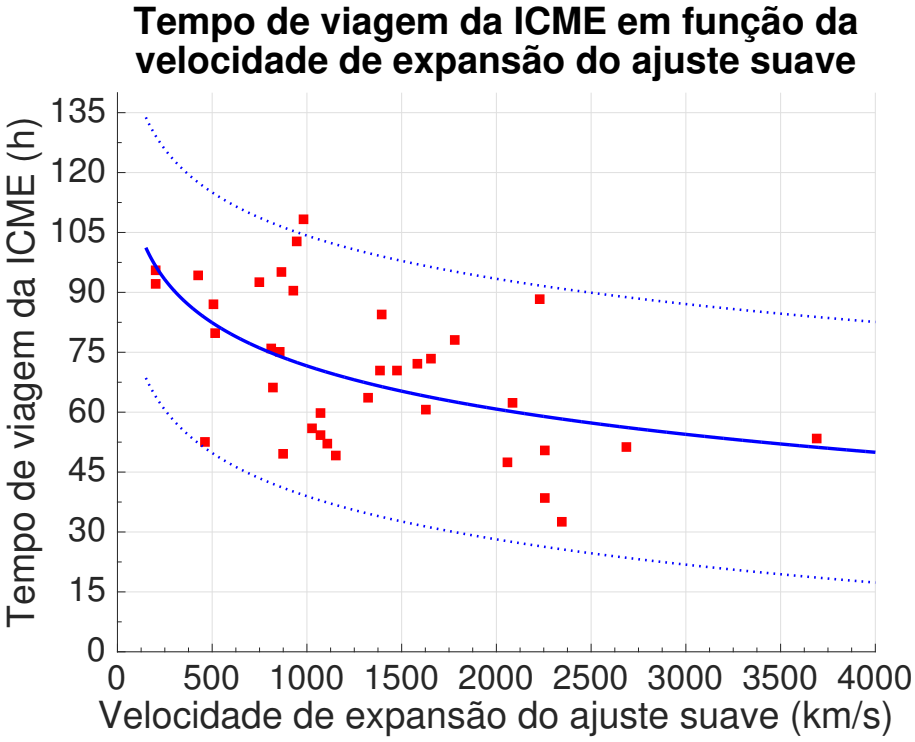
$$T_{tr\,SS} = 173,45 - 16,18\,\ln(V_{exp\,S}) \tag{5.8}$$

ii. Para o tempo de chegada da ICME, Figura 5.10.

$$T_{tr\,SI} = 179,38 - 15,60\,\ln(V_{exp\,S}) \tag{5.9}$$

Com $T_{tr\,SS}$ e $T_{tr\,SI}$ em horas e $V_{exp\,S}$ em quilômetros por segundo.

Figura 5.10 - Tempo de chegada da ICME em função da velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave'.



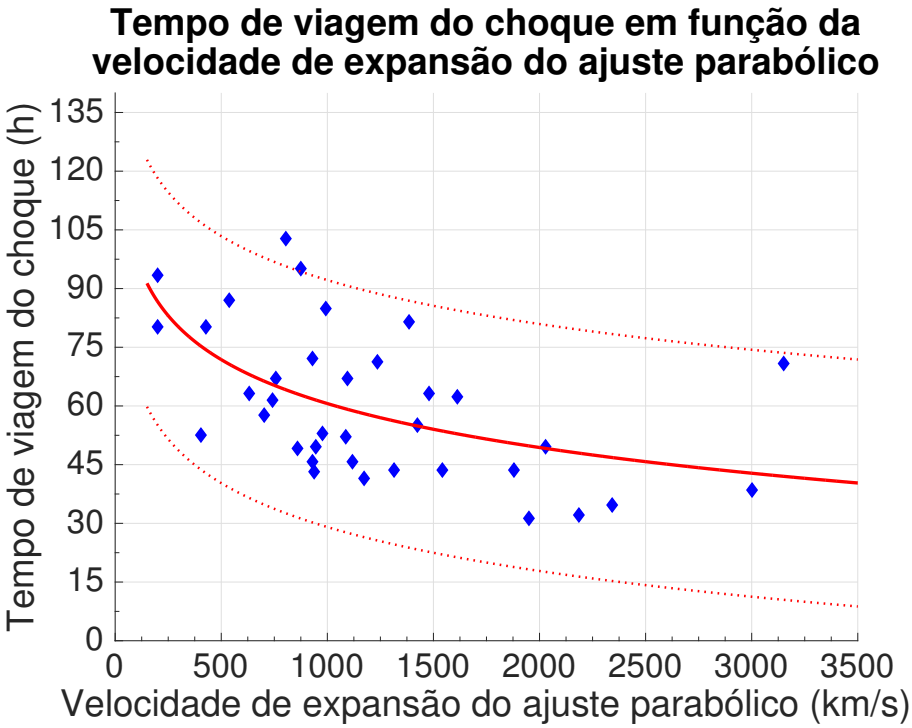
Os quadrados vermelhos são os dados, a curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico para o conjunto de 36 pontos, definido pela equação $T_{tr\,SI} = 179,38 - 15,60\,\ln(V_{exp\,S})$. As curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Produção do autor.

5.4.3 Método associado ao ajuste parabólico

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram os gráficos do tempo de chegada do choque e da ICME em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico, para um conjunto de 36 eventos. Os losangos são os dados associados a esse conjunto de eventos. A curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico e as curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%, equivalente a duas vezes o desvio padrão.

Figura 5.11 - Tempo de chegada do choque em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico.



Os losangos azuis são os dados, a curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico para o conjunto de 36 pontos, definido pela equação $T_{tr\,PS} = 172,53 - 16,20\,\ln(V_{exp\,P})$. As curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Produção do autor.

Matematicamente, as curvas contínuas podem ser expressas como:

i. Para o tempo de chegada do choque, Figura 5.11.

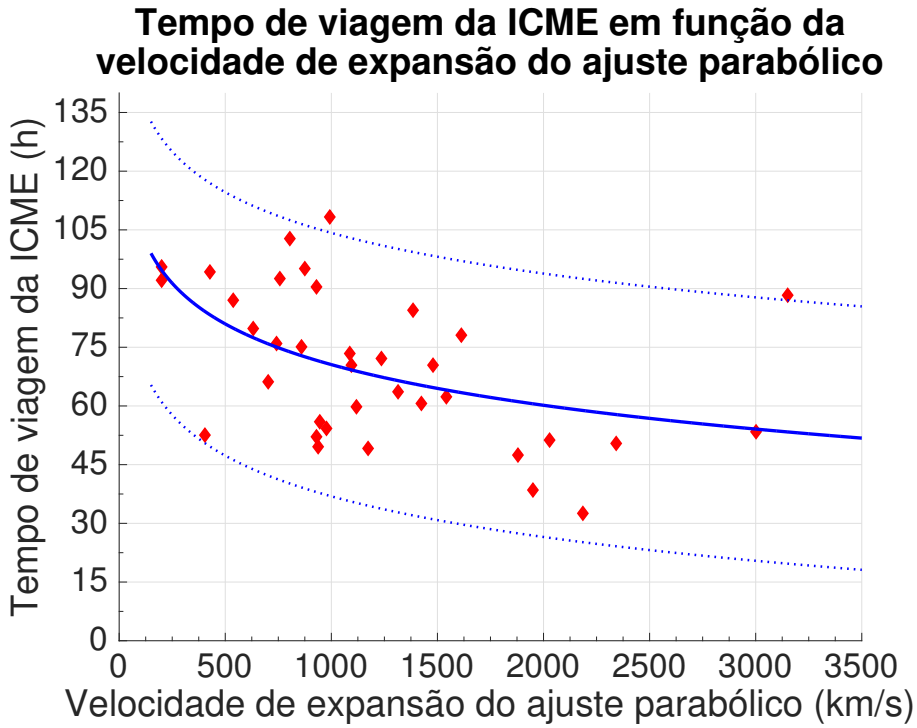
$$T_{tr\,PS} = 172,53 - 16,20\,\ln(V_{exp\,P}) \tag{5.10}$$

ii. Para o tempo de chegada da ICME, Figura 5.12.

$$T_{tr\,PI} = 174,15 - 15,00\,\ln(V_{exp\,P}) \tag{5.11}$$

Com $T_{tr\,PS}$ e $T_{tr\,PI}$ em horas e $V_{exp\,P}$ em quilômetros por segundo.

Figura 5.12 - Tempo de chegada da ICME em função da velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico.



Os losangos vermelhos são os dados, a curva contínua é o ajuste do tipo logarítmico para o conjunto de 36 pontos, definido pela equação $T_{tr\,PI} = 174,15 - 15,00\,\ln(V_{exp\,P})$. As curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95%.

Fonte: Produção do autor.

Assim como nas Figuras 5.2 e 5.3, o espalhamento dos dados em torno do ajuste nas Figuras 5.7 até 5.12 ainda persiste. Em comparação com o resultado encontrado por Schwenn et al. (2005) os resultados obtidos são relativamente similares.

5.5 Tempos de Chegada

A Tabela 5.2 contém os tempos de chegada obtidos com base na comparação do instante da primeira observação da CME no coronógrafo LASCO-C2 e da observação do choque interplanetário e da ICME nos dados in situ no meio interplanetário de acordo com a lista de ICMEs de Richardson e os tempos de chegada calculados por meio do modelo empírico de Schwenn et al. (2005). As colunas 1, 2 e 3 são equivalentes as mesmas colunas da Tabela 5.1.

As colunas 4, 5 e 6 da Tabela 5.2 contém os tempos de chegada calculados pelo

modelo empírico de Schwenn et al. (2005) a partir dos valores da velocidade de expansão lateral apresentados nas colunas 6, 7 e 8 da Tabela 5.1. Onde $T_{tr\,C}$ indica o tempo de chegada calculado usando a velocidade de expansão lateral do contorno, $T_{tr\,S}$ o tempo calculado usando a velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave' e $T_{tr\,P}$ o tempo calculado usando o ajuste parabólico. A última coluna apresenta a diferença entre a segunda e a quarta coluna.

No fim da Tabela 5.2 são apresentados as quantidades mínima, máxima, média e mediana referentes a cada coluna.

Em alguns casos a diferença entre o tempo calculado pelo modelo empírico de Schwenn et al. (2005) e o tempo estimado pela lista de ICMEs chega a 42 horas, como é o caso do evento # 40. Supondo que a velocidade de expansão lateral para esse evento tenha sido bem estimada, então, a CME chegaria na Tinca aproximadamente 42 horas após o tempo calculado para sua chegada.

Do mesmo modo, supondo que as velocidades de expansão lateral para os eventos #26 e 30 tenham sido bem estimadas, então, as CMEs associadas chegariam entre aproximadamente 17 e 18 horas antes do tempo calculado para sua chegada.

Por outro lado, os eventos # 16, 32 e 35 são previstos com diferença de aproximadamente 1 hora entre o tempo estimado e o tempo calculado.

Tabela 5.2 - Comparação entre tempos de chegada estimados pela lista de ICMEs e tempos calculados pelo modelo empírico de Schwenn et al. (2005).

#	**Tempo de chegada do choque (h)**	**Tempo de chegada da ICME (h)**	$T_{tr\,C}$ **(h)**	$T_{tr\,S}$ **(h)**	$T_{tr\,P}$ **(h)**	ΔT **(h)**
1	80,10	94,10	77,3	77,4	77,1	2,8
2	52,77	54,10	57,9	58,0	60,1	-5,2
3	31,43	38,50	45,4	42,6	45,6	-14,0
4	72,13	90,50	61,1	61,1	61,0	11,1
5	62,27	77,90	45,8	47,6	49,7	16,4
6	43,55	63,50	53,8	53,7	53,9	-10,2
7	54,27	71,50	-	-	-	-
8	45,90	59,90	58,0	58,0	57,2	-12,1
9	41,58	49,17	55,8	56,5	56,2	-14,2
10	54,90	60,50	48,8	49,4	52,1	6,1
11	32,20	32,60	41,6	41,8	43,3	-9,4
12	18,68	23,50	-	-	-	-
13	19,42	29,10	-	-	-	-
14	49,52	55,90	63,3	63,7	67,0	-13,8
15	57,52	66,10	63,3	63,7	67,0	-5,8
16	43,45	62,40	44,4	44,3	50,5	-0,9
17	66,95	70,50	52,3	52,7	57,6	14,6
18	49,52	51,10	38,9	39,0	44,8	10,6

(Continua)

Tabela 5.2 - Continuação

#	**Tempo de chegada do choque (h)**	**Tempo de chegada da ICME (h)**	$T_{tr\,C}$ **(h)**	$T_{tr\,S}$ **(h)**	$T_{tr\,P}$ **(h)**	ΔT **(h)**
19	38,73	53,57	32,4	32,4	36,7	6,3
20	35,50	37,50	-	-	-	-
21	87,10	87,10	73,6	73,8	72,4	13,5
22	29,43	33,20	-	-	-	-
23	84,70	108,10	59,8	59,9	59,6	24,9
24	67,02	92,50	65,9	65,5	65,2	1,1
25	95,05	95,05	62,6	62,6	62,3	32,4
26	43,42	49,50	61,9	62,2	60,9	-18,5
27	80,17	92,10	92,5	93,1	92,8	-12,3
28	70,90	88,40	45,4	42,9	35,7	25,5
29	63,28	70,40	51,5	51,5	51,4	11,7
30	58,00	58,00	75,1	75,4	78,3	-17,1
31	61,62	75,92	63,0	63,8	65,6	-1,3
32	93,32	95,72	92,6	92,4	92,7	0,7
33	62,98	79,80	73,7	73,1	69,0	-10,7
34	34,65	50,60	42,3	42,6	41,9	-7,7
35	43,50	47,40	44,4	44,5	46,4	-0,9
36	71,08	72,00	50,0	50,0	55,1	21,0
37	52,15	73,25	49,1	49,1	57,9	3,1

(Continua)

Tabela 5.2 - Continuação

#	**Tempo de chegada do choque (h)**	**Tempo de chegada da ICME (h)**	$T_{tr\,C}$ **(h)**	$T_{tr\,S}$ **(h)**	$T_{tr\,P}$ **(h)**	ΔT **(h)**
38	81,40	84,40	52,6	52,6	52,8	28,8
39	45,88	52,00	56,4	57,4	61,0	-10,5
40	102,60	102,60	60,7	60,8	64,1	41,9
41	49,07	75,00	62,8	62,7	62,7	-13,7
Min	18.68	23.50	32,4	32,4	35,7	-18,5
Max	102.60	108.10	92,6	93,1	92,8	41,9
Mean	56.77	66.46	57,7	57,7	59,1	2,6
Median	54.27	66.10	57,2	57,7	58,8	-0,1

Fonte: Produção do autor.

A Tabela 5.3 contém os tempos de chegado estimados pela lista de ICMEs de Richardson e os tempos de chegada calculados por meio da Equação 5.6. As colunas 1, 2 e 3 são equivalentes as mesmas colunas da Tabela 5.1.

As colunas 4, 5 e 6 da Tabela 5.3 contém os tempos de chegada calculados pela equação $T_{tr} = 174,98 - 16,40 \ln(V_{exp})$ a partir dos valores da velocidade de expansão lateral apresentados nas colunas 6, 7 e 8 da Tabela 5.1. Onde $T_{tr\,C}$ indica o tempo de chegada calculado usando a velocidade de expansão lateral do contorno, $T_{tr\,S}$ o tempo calculado usando a velocidade de expansão lateral do 'ajuste suave' e $T_{tr\,P}$ o tempo calculado usando a velocidade de expansão lateral do ajuste parabólico. A última coluna apresenta a diferença entre a segunda e a quarta coluna, que é a diferença entre o tempo de chegada do choque estimado pela lista de ICMEs e o tempo de chegada do choque calculado empiricamente neste trabalho para um conjunto de 36 eventos.

No fim da Tabela 5.3 são apresentados as quantidades mínima, máxima, média e mediana referentes a cada coluna.

Assumindo que as velocidades de expansão lateral tenham sido bem estimadas, os eventos # 10, 19, 24 e 37 são previstos com intervalo de aproximadamente 2 horas entre o tempo estimado e o tempo calculado pela Equação 5.6. Por outro lado, o evento # 40 teria sua chegada prevista aproximadamente 40 horas antes da sua chegada de fato.

Tabela 5.3 - Comparação entre tempos de chegada estimados pela lista de ICMEs e tempos calculados pela equação $T_{tr\,CS} = 174,98 - 16,40\ \ln(V_{exp\,C})$.

#	**Tempo de chegada do choque (h)**	**Tempo de chegada da ICME (h)**	$T_{tr\,C}$ **(h)**	$T_{tr\,S}$ **(h)**	$T_{tr\,P}$ **(h)**	ΔT **(h)**
1	80,10	94,10	75,71	75,78	75,59	4,4
2	52,77	54,10	60,43	60,52	62,12	-7,7
3	31,43	38,50	50,53	48,36	50,73	-19,1
4	72,13	90,50	62,91	62,96	62,86	9,2
5	62,27	77,90	50,89	52,24	53,90	11,4
6	43,55	63,50	57,14	57,11	57,22	-13,6
7	54,27	71,50	-	-	-	-
8	45,90	59,90	60,46	60,52	59,87	-14,6
9	41,58	49,17	58,72	59,33	59,06	-17,1
10	54,90	60,50	53,24	53,73	55,85	1,7
11	32,20	32,60	47,53	47,73	48,86	-15,3
12	18,68	23,50	-	-	-	-
13	19,42	29,10	-	-	-	-
14	49,52	55,90	61,31	61,19	62,66	-11,8
15	57,52	66,10	64,66	64,99	67,56	-7,1
16	43,45	62,40	49,72	49,66	54,60	-6,3
17	66,95	70,50	56,03	56,33	60,20	10,9
18	49,52	51,10	45,42	45,50	50,08	4,1

(Continua)

Tabela 5.3 - Continuação

#	**Tempo de chegada do choque (h)**	**Tempo de chegada da ICME (h)**	$T_{tr\,C}$ **(h)**	$T_{tr\,S}$ **(h)**	$T_{tr\,P}$ **(h)**	ΔT **(h)**
19	38,73	53,57	40,31	40,29	43,66	-1,6
20	35,50	37,50	-	-	-	-
21	87,10	87,10	72,77	72,93	71,89	14,3
22	29,43	33,20	-	-	-	-
23	84,70	108,10	61,90	62,02	61,79	22,8
24	67,02	92,50	66,75	66,42	66,21	0,3
25	95,05	95,05	64,14	64,16	63,87	30,9
26	43,42	49,50	63,56	63,83	62,81	-20,1
27	80,17	92,10	87,70	88,17	87,95	-7,5
28	70,90	88,40	50,51	48,54	42,85	20,4
29	63,28	70,40	55,39	55,36	55,24	7,9
30	58,00	58,00	73,96	74,26	76,52	-16,0
31	61,62	75,92	64,41	65,06	66,52	-2,8
32	93,32	95,72	87,79	87,63	87,90	5,5
33	62,98	79,80	72,85	72,44	69,18	-9,9
34	34,65	50,60	48,09	48,33	47,75	-13,4
35	43,50	47,40	49,71	49,84	51,36	-6,2
36	71,08	72,00	54,20	54,20	58,19	16,9
37	52,15	73,25	53,46	53,42	60,38	-1,3

(Continua)

Tabela 5.3 - Continuação

#	**Tempo de chegada do choque (h)**	**Tempo de chegada da ICME (h)**	$T_{tr\,C}$ **(h)**	$T_{tr\,S}$ **(h)**	$T_{tr\,P}$ **(h)**	ΔT **(h)**
38	81,40	84,40	56,26	56,25	56,37	25,1
39	45,88	52,00	59,21	59,98	62,84	-13,3
40	102,60	102,60	62,59	62,66	65,28	40,0
41	49,07	75,00	64,28	64,16	64,19	-15,2
Min	18,68	23,50	40,31	40,29	42,85	-20,14
Max	102,60	108,10	87,79	88,17	87,95	40,01
Mean	56,77	66,46	60,13	60,16	61,22	0,16
Median	54,27	66,10	59,82	60,25	61,09	-2,18

Fonte: Produção do autor.

5.6 Sobre as Incertezas Associadas a Velocidade Radial

No Capítulo 4 foi descrito como a velocidade radial e sua respectiva incerteza são estimadas. Entretanto, a incerteza apresentou valores elevados para alguns eventos, como o evento # 19 e valores muito pequenos para outros eventos, como o # 32. Aqui, apresentaremos uma maneira alternativa de estimar as incertezas para avaliar se havia algum problema causando essa variação.

O contorno do evento é essencial no cálculo da velocidade, portanto um valor elevado na incerteza poderia estar associado à algum problema neste contorno. Para avaliar se a discrepância nos valores das incertezas estavam associadas ou não ao contorno recalculou-se a velocidade radial e a incerteza com ângulos vizinhos diferentes.

As velocidades radiais e as incertezas foram calculados de três maneiras distintas, associadas à escolha dos ângulos vizinhos. A primeira maneira foi estimar as incertezas a partir de ângulos vizinhos equidistantes e iguais a $\pm 10°$, conforme mencionado no Capítulo 4. A segunda maneira foi utilizando ângulos vizinhos iguais a $-1°$ e $+10°$. E a terceira maneira foi utilizando ângulos vizinhos iguais a $-10°$ e $+1°$.

A Tabela 5.4 apresenta os valores estimados para as velocidades radiais e suas respectivas incertezas obtidas de três maneiras distintas. A segunda coluna é a data em que a CME foi observada pela primeira vez no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2. A terceira coluna, 'Vrad 1 ± inc', apresenta a velocidade radial e a incerteza estimada utilizando ângulos vizinhos equidistantes e iguais a $\pm$ 10°. A quarta coluna, 'Vrad 2 ± inc', apresenta a velocidade radial e a incerteza estimada utilizando ângulos vizinhos iguais a $-1°$ e $+10°$. E a última coluna, 'Vrad 3 ± inc', apresenta a velocidade radial e a incerteza estimada utilizando ângulos vizinhos iguais a $-10°$ e $+1°$.

Dos resultados obtidos percebeu-se que a estimativa da incerteza é sensível ao contorno da CME. A partir disto refez-se os gráficos apresentados nas Figuras 5.1 e 5.4 utilizando a menor estimativa de incerteza dentre as três opções.

Tabela 5.4 - Comparação entre as velocidades radial e as incertezas associadas.

#	**LASCO-C2 CME (Y/M/D)**	**Vrad 1 ± inc (km/s)**	**Vrad 2 ± inc (km/s)**	**Vrad 3 ± inc (km/s)**
1	2001/07/05 03:54	491 ± 97	492 ± 2	495 ± 2
2	2001/09/27 04:54	903 ± 210	851 ± 72	812 ± 128
3	2001/11/22 23:30	1610 ± 134	1347 ± 12	1567 ± 319
4	2001/12/26 05:30	889 ± 62	894 ± 12	898 ± 14
5	2002/03/15 23:06	1081 ± 23	1078 ± 22	1104 ± 20
6	2002/07/15 20:30	969 ± 117	1068 ± 215	1057 ± 156
7	2002/08/16 12:30	-	-	-
8	2002/09/17 08:06	955 ± 53	958 ± 87	946 ± 703
9	2003/05/28 00:50	1214 ± 186	1237 ± 102	1212 ± 142
10	2003/10/22 08:30	752 ± 214	857 ± 5	853 ± 5
11	2003/10/26 17:54	2106 ± 145	2113 ± 68	2053 ± 68
12	2003/10/28 11:30	-	-	-
13	2003/10/29 20:54	-	-	-
14	2004/01/20 00:06	758 ± 212	761 ± 107	757 ± 117
15	2004/01/21 04:54	631 ± 173	602 ± 10	604 ± 9
16	2004/09/12 00:36	1410 ± 543	1408 ± 81	1400 ± 97
17	2004/11/04 23:30	1110 ± 25	1106 ± 16	1095 ± 16
18	2004/11/07 16:54	1768 ± 310	1734 ± 111	1787 ± 208
19	2004/11/10 02:26	2470 ± 882	2518 ± 114	2504 ± 29

(Continua)

Tabela 5.4 - Continuação

#	**LASCO-C2 CME (Y/M/D)**	**Vrad 1 ± inc (km/s)**	**Vrad 2 ± inc (km/s)**	**Vrad 3 ± inc (km/s)**
20	2005/01/17 09:30	-	-	-
21	2005/08/05 08:54	470 ± 23	498 ± 25	501 ± 14
22	2005/09/09 19:48	-	-	-
23	2006/07/06 08:54	774 ± 13	782 ± 6	788 ± 6
24	2006/08/16 16:30	544 ± 119	552 ± 53	617 ± 53
25	2006/08/26 20:57	681 ± 45	818 ± 237	673± 75
26	2006/12/14 22:30	1021 ± 80	1013 ± 233	1038 ± 32
27	2010/04/08 04:54	377 ± 237	407 ± 13	374 ± 76
28	2011/02/15 02:36	1572 ± 82	1968 ± 40	1932 ± 71
29	2011/08/02 06:36	928 ± 51	948 ± 15	971 ± 15
30	2011/09/06 05:24	740 ± 150	821 ± 30	816 ± 76
31	2011/09/06 23:05	519 ± 470	568 ± 198	602 ± 40
32	2011/10/01 10:17	326 ± 3	319 ± 1	329 ± 2
33	2012/01/19 15:12	1322 ± 47	1360 ± 32	1310 ± 9
34	2012/03/07 00:24	2279 ± 350	2604 ± 15	2581 ± 15
35	2012/03/13 17:36	1962 ± 20	1926 ± 33	1871 ± 33
36	2012/09/28 00:00	1233 ± 13	1269 ± 36	1267 ± 9
37	2013/09/29 21:45	1175 ± 14	1566 ± 7	1573 ± 7
38	2013/12/12 03:36	835 ± 19	875 ± 34	1183 ± 8

(Continua)

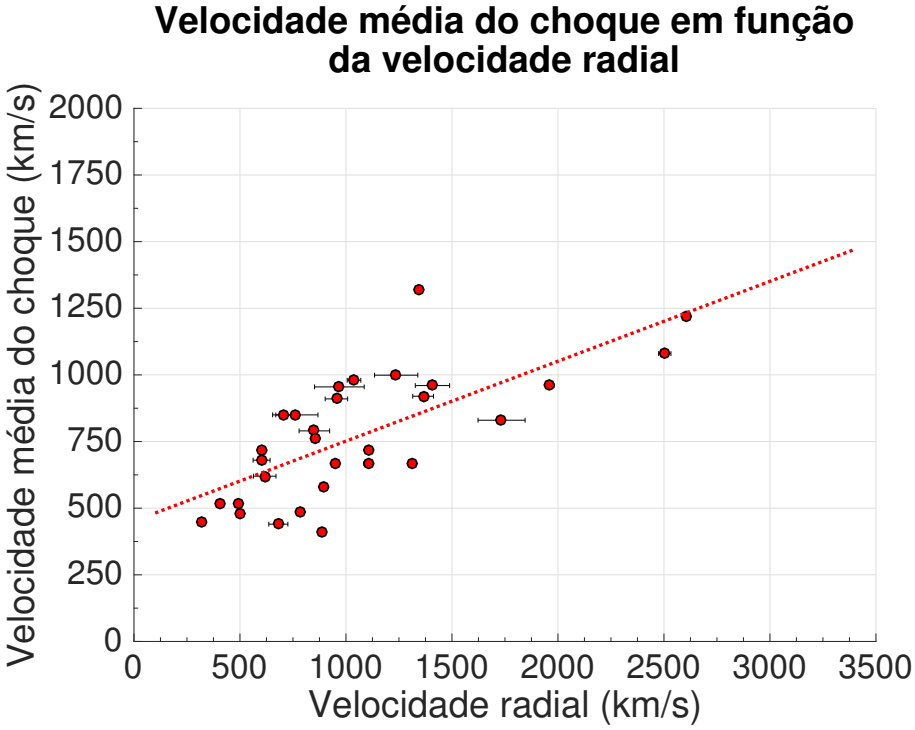
Tabela 5.4 - Continuação

#	**LASCO-C2 CME (Y/M/D)**	**Vrad 1 ± inc (km/s)**	**Vrad 2 ± inc (km/s)**	**Vrad 3 ± inc (km/s)**
39	2014/09/10 18:00	1364 ± 49	1271 ± 153	1305 ± 153
40	2014/09/12 09:24	865 ± 17	887 ± 7	884 ± 5
41	2015/09/18 05:00	714 ± 100	705 ± 36	745 ± 52

Fonte: Produção do autor.

A Figura 5.13 apresenta o gráfico da velocidade média do choque em função da velocidade radial para um conjunto de 30 eventos. Os círculos são os dados associados ao conjunto de eventos, as barras horizontais são as menores incertezas relacionadas as medidas da velocidade radial e a curva pontilhada é o ajuste linear que melhor descreve a relação entre as variáveis.

Figura 5.13 - Velocidade média do choque para 1 AU em função da velocidade radial.



Os círculos são os dados, as barras horizontais representam as menores incertezas associadas as medidas da velocidade radial e a linha pontilhada vermelha é a curva ajustada para os dados.

Fonte: Produção do autor.

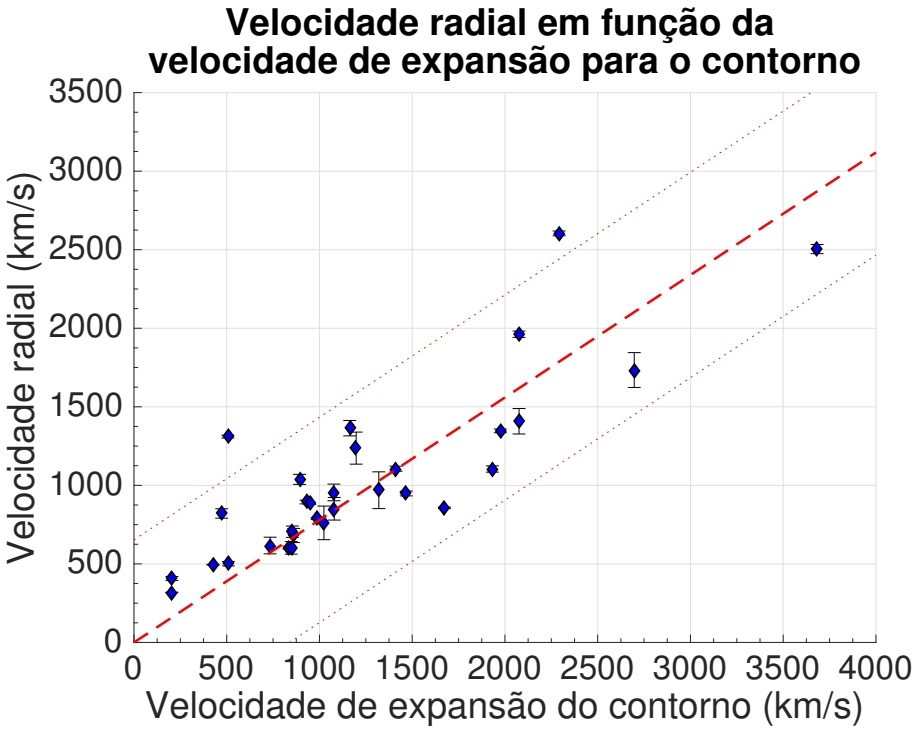
Seja a velocidade média do choque descrita por V_{tr} e a velocidade radial descrita por V_{rad}. A partir do conjunto de eventos estudado e considerando-se que há um relação linear entre V_{rad} e V_{tr}, obtém-se a seguinte relação empírica:

$$V_{tr} = 0,3\,V_{rad} + 452,0 \tag{5.12}$$

Com coeficiente de correlação igual a 0,71.

A Figura 5.14 apresenta o gráfico da velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral associada ao contorno, para um conjunto de 31 eventos. Os losangos são os dados associados as quantidades, as barras verticais são as menores incertezas associadas as medidas da velocidade radial, a curva tracejada é o ajuste de primeira ordem e as curvas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95 %, equivalente a duas vezes o desvio padrão.

Figura 5.14 - Velocidade radial em função da velocidade de expansão lateral do contorno.



Os losangos são os dados, as barras verticais são as menores incertezas associadas as medidas da velocidade radial, a linha vermelha tracejada é o ajuste linear associado ao conjunto de dados e as linhas pontilhadas indicam um intervalo de confiança de 95 %.

Fonte: Produção do autor.

A equação que melhor descreve o ajuste linear para esse conjunto de dados é:

$$V_{rad} = 0,78\, V_{exp} \tag{5.13}$$

Com coeficiente de correlação igual a 0,85.

Vale ressaltar que o cálculo da velocidade radial sofre variações com os três métodos, porque o ajuste linear leva em consideração as incertezas. Entretanto, é possível perceber que essa variação é pequena.

Como resultado dessa variação no valor da velocidade radial, as Equações 5.12 e 5.13 são diferentes das Equações 5.1 e 5.4, que foram obtidas utilizando as velocidades radiais com ângulos vizinhos equidistantes e iguais a $\pm 10°$.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação analisou-se a relação entre as velocidades de propagação de CMEs obtidas a partir de observações da coroa solar pelo coronógrafo LASCO-C3 e os tempos de chegada de suas correspondentes estruturas interplanetárias.

Dentre os diversos métodos disponíveis para determinação das velocidades de propagação de CMEs, utilizou-se o método denominado CORSET que identifica os contornos de CMEs, utilizando análise de textura, a partir de um conjunto de imagens pré-definido e de um conjunto de parâmetros, sem a necessidade de identificação visual dos limites da frente da CME. A principal vantagem do método é a objetividade que o algoritmo oferece e as desvantagens estão associadas principalmente ao fato de parte dos eventos analisados no presente estudo não serem corretamente rastreados em determinados casos como quando a textura da CME torna-se similar ao plano de fundo ou quando há presença de outras CMEs próximas.

Para este trabalho foram selecionados eventos do catálogo de ICMEs de Richardson e Cane (RICHARDSON; CANE, 2010). Os eventos selecionados correspondem aqueles cuja associação entre uma CME e uma ICME foi estabelecida de forma unívoca, de abril de 2001 até dezembro de 2015.

Foi eleito um conjunto de 128 CMEs direcionadas para a Terra, dentre as quais foi possível rastrear, utilizando o método CORSET, 41 eventos de maneira condizente com o fenômeno observado no campo de visada do coronógrafo LASCO-C3. Dos 41 eventos rastreados corretamente pelo CORSET, foi possível estimar as velocidades radial e de expansão para 36 eventos. Entretanto, em cinco eventos a estimativa da velocidade radial não estava correta e esses eventos foram retirados das análises finais.

Ao comparar os resultados obtidos pelo CORSET, CACTus e CDAW para os três eventos analisados no Capítulo 4 é possível perceber que os resultados da velocidade radial e do ângulo de posição central variam de um método para outro. Comparações de alguns eventos analisados nesta dissertação mostram diferenças da ordem de uma centena de quilômetros por segundo e em torno de uma dezena de graus. Os resultados do CORSET e do CDAW, em geral, se assemelham mais entre si do que com os resultados do CACTus. Este fato está relacionado principalmente à detecção do evento, o CACTus muitas vezes identifica erroneamente as CMEs e, como consequência, os parâmetros cinemáticos desses eventos também são comprometidos.

A velocidade de expansão lateral de uma CME é definida como sendo a taxa com que a CME cresce lateralmente. Essa quantidade é mais fácil de ser estimada do que a velocidade radial e pode ser utilizada como aproximação para descrever cinematicamente uma CME. Neste trabalho calculamos a velocidade de expansão de três maneiras diferentes, a primeira associada ao contorno dos eventos, a segunda fazendo um ajuste suave dos pontos do contorno e a terceira ajustando os pontos da frente da CME a uma parábola.

A velocidade média do choque é um parâmetro obtido ao supor que as CMEs se propagam com velocidade constante até 1 AU e o tempo de propagação é dado pela diferença entre o horário de chegada do choque e o horário da primeira observação do evento no campo de visada do coronógrafo LASCO-C2. Utilizando-se um conjunto de 30 CMEs direcionadas para a Terra, obtidas após a remoção de 5 eventos sem os valores da velocidade radial, 1 evento sem o valor da velocidade média do choque e 5 eventos cuja estimativa da velocidade radial não estava correta do total de 41 eventos rastreados corretamente, encontrou-se a relação linear $V_{tr} = 0,3\,V_{rad} + 452,0$ entre a velocidade média do choque e a velocidade radial, onde V_{tr} é a velocidade média do choque e V_{rad} é a velocidade radial, com unidade de km/s.

A relação empírica entre a velocidade radial e a velocidade de expansão lateral foi obtida para um conjunto de 31 CMEs direcionadas para a Terra, após a remoção de 5 eventos sem os valores das velocidades e 5 eventos cuja estimativa da velocidade radial não estava correta do total de 41 eventos rastreados corretamente. A relação linear entre as velocidades pode ser expressa por $V_{rad} = 0,78\,V_{exp}$, onde V_{exp} é a velocidade de expansão e as velocidades são descritas em unidades de km/s. O coeficiente de correlação entre as velocidades é 0,85. O resultado encontrado é diferente do resultado obtido por Dal Lago et al. (2003) a partir de um conjunto de 57 CMEs do limbo solar.

Utilizando o tempo de chegada do choque estimado pela lista de ICMEs (RICHARDSON; CANE, 2010) e a velocidade de expansão associada ao contorno encontrou-se a relação empírica $T_{tr} = 174,98 - 16,40\,\ln(V_{exp})$, onde V_{exp} é a velocidade de expansão em quilômetros por segundo e T_{tr} é o tempo de chegada em horas. Esta equação pode ser utilizada para prever a chegada de CMEs na Terra com incerteza da ordem de aproximadamente 15 horas.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode ser implementado um método para estimar as incertezas associadas à velocidade de expansão. Ainda, pode ser implementada uma maneira de estimar a massa das CMEs, como feito pelo catálogo

CDAW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, C. R. **Study of coronal mass ejections and their corresponding inter-planetary structures using combined observations of cosmic ray detectors and coronagraphs**. 328 p. Thesis (Doctorate in Space Geophysics) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HS23EB>. 18

BRAGA, C. R.; DAL LAGO, A.; STENBORG, G. Pseudo-automatic characterization of the morphological and kinematical properties of coronal mass ejections using a texture-based technique. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 10, p. 1949–1965, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.05.009>. 13, 25, 28, 37, 38, 39, 73

BRUECKNER, G. E.; HOWARD, R. A.; KOOMEN, M. J.; KORENDYKE, C. M.; MICHELS, D. J.; MOSES, J. D.; SOCKER, D. G.; DERE, K. P.; LAMY, P. L.; LLEBARIA, A.; BOUT, M. V.; SCHWENN, R.; SIMNETT, G. M.; BEDFORD, D. K.; EYLES, C. J. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO). **Solar Physics**, v. 162, n. 1, p. 357–402, 1995. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00733434>. 2, 3

CANE, H. V.; LARIO, D. An introduction to CMEs and energetic particles. **Space Science Reviews**, v. 123, n. 1, p. 45–56, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-006-9011-3>. 2, 11

CASELLA, G.; BERGER, R. L. **Statistical inference**. [S.l.]: Thomson Learning, 2001. 660 p. (Duxbury advanced series in statistics and decision sciences). 66

CREMADES, H. **Three-dimensional configuration and evolution of coronal mass ejections**. 125 p. Dissertation — Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2005. Disponível em: <http://opus.tu-bs.de/opus/volltexte/2005/730/pdf/CREMADES_THESIS.pdf=x>. 1, 2, 4, 5

DAL LAGO, A.; GONZALEZ, W. D.; DE LUCAS, A.; BRAGA, C. R.; VIEIRA, L. R.; STEKEL, T. R. C.; ROCKENBACH, M. CME dynamics using coronagraph and interplanetary ejecta data. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 10, p. 1942–1948, 2013. Advances in Theories and Observations of Solar System Dynamics - II. Disponível em:

<//www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117712007065>. 6, 12, 13, 14

DAL LAGO, A.; SCHWENN, R.; GONZALEZ, W. D. Relation between the radial speed and the expansion speed of coronal mass ejections. **Advances in Space Research**, v. 32, n. 12, p. 2637 – 2640, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2003.03.012>. 6, 13, 38, 39, 72, 96

GOPALSWAMY, N.; DAL LAGO, A.; YASHIRO, S.; AKIYAMA, S. The expansion and radial speeds of coronal mass ejections. **Central European Astrophysical Bulletin**, v. 33, p. 115–124, 2009. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009CEAB...33..115G>. 6

GOPALSWAMY, N.; LARA, A.; LEPPING, R. P.; KAISER, M. L.; BERDICHEVSKY, D.; CYR, O. C. S. Interplanetary acceleration of coronal mass ejections. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 2, p. 145–148, 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL003639>. 67

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: Space Physics**, v. 96, n. A5, p. 7831–7839, 1991. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/91JA00316>. 11

GOUSSIES, N.; STENBORG, G.; VOURLIDAS, A.; HOWARD, R. Tracking of coronal white-light events by texture. **Solar Physics**, v. 262, n. 2, p. 481–494, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-009-9495-6>. 13, 15, 16, 18, 25

HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEIN, I. Textural features for image classification. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, SMC-3, n. 6, p. 610–621, 1973. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>. 15

HOWARD, R.; MOSES, J.; VOURLIDAS, A.; NEWMARK, J.; SOCKER, D.; PLUNKETT, S.; KORENDYKE, C.; COOK, J. W.; HURLEY, A.; DAVILA, J.; THOMPSON, W. T.; ST. CYR, O.; MENTZELL, E.; MEHALICK, K.; LEMEN, J. R.; WUELSER, J. P.; DUNCAN, D. W.; TARBELL, T.; WOLFSON, C. J.; CARTER, T. Sun earth connection coronal and heliospheric investigation (SECCHI). **Space Science Reviews**, v. 136, p. 67, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9341-4">. 4

HOWARD, R. A.; MICHELS, D. J.; SHEELEY JR., N.; KOOMEN, M. The observation of a coronal transient directed at earth. **Solar Physics**, v. 263, p. L101–L104, 1982. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1982ApJ...263L.101H>. 5

HUNDHAUSEN, A. J. The origin and propagation of coronal mass ejections (R). In: SIXTH INTERNATIONAL SOLAR WIND CONFERENCE, 6., 1987, YMCA of the Rockies, Estes Park, Colorado. **Proceedings...** NCAR, 1987. v. 2, p. 181. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987sowi.conf..181H>. 6

HUNDHAUSEN, A. J.; SAWYER, C. B.; HOUSE, L.; ILLING, R. M. E.; WAGNER, W. J. Coronal mass ejections observed during the solar maximum mission: latitude distribution and rate of occurrence. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 89, n. A5, p. 2639–2646, 1984. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/JA089iA05p02639>. 4

INHESTER, B. Thomson scattering in the solar corona. **ArXiv e-prints**, p. 104, 2016. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015arXiv151200651I>. 8, 9

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to space physics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995. 568 p. 1

LUGAZ, N.; FARRUGIA, C. J.; DAVIES, J. A.; MöSTL, C.; DAVIS, C. J.; ROUSSEV, I. I.; TEMMER, M. The deflection of the two interacting coronal mass ejections of 2010 may 23-24 as revealed by combined in situ measurements and heliospheric imaging. **The Astrophysical Journal**, v. 759, n. 1, p. 68, 2012. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0004-637X/759/i=1/a=68>. 27

MINNAERT, M. On the continuous spectrum of the corona and its polarisation. **Zeitschrift für Astrophysik**, v. 1, p. 209, 1930. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1930ZA.....1..209M>. 9

PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1992. 660 p. 38

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**, v. 264, n. 1, p. 189–237, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>. 11, 13, 25, 26, 61, 95, 96

ROBBRECHT, E.; BERGHMANS, D. Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data. **Astronomy and Astrophysics**, v. 425, p. 1097–1106, 2004. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004A%26A...425.1097R>. 5

SCHUSTER, A. On the polarization of the solar corona. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 40, n. 2, p. 35–56, 1879. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mnras/40.2.35>. 9

SCHWENN, R. An essay on terminology, myths,- and known facts: Solar transient-flare-CME-driver gas-piston-BDE-magnetic cloud-shock wave-geomagnetic storm. **Astrophysics and Space Science**, v. 243, n. 1, p. 187–193, 1996. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00644053">. 4

_____. Space weather: The solar perspective. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 3, n. 1, p. 2, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2006-2>. 5, 6, 8, 11

SCHWENN, R.; DAL LAGO, A.; GONZALEZ, W. D.; HUTTUNEN, E.; ST.CYR, C. O.; PLUNKETT, S. P. A tool for improved space weather predictions: the CME expansion speed. **AGU Fall Meeting Abstracts**, 2001. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2001AGUFMSH12A0739S>. xi, xiii, 13

SCHWENN, R.; DAL LAGO, A.; HUTTUNEN, E.; GONZALEZ, W. D. The association of coronal mass ejections with their effects near the earth. **Annales Geophysicae**, v. 23, n. 3, p. 1033–1059, 2005. Disponível em: <http://www.ann-geophys.net/23/1033/2005/>. xi, xiii, xvii, 6, 7, 13, 14, 25, 37, 38, 39, 40, 79, 80, 81

STENBORG, G. A. **Interpretation and analysis on various time scales of narrow-band coronal observations obtained with a new coronagraph system**. 151 p. Dissertation — Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August-Universität zu Göttingen, Göttingen, 2000. 4

VOURLIDAS, A.; BALMACEDA, L. A.; STENBORG, G.; DAL LAGO, A. Multi-viewpoint coronal mass ejection catalog based on STEREO COR2 observations. **The Astrophysical Journal**, v. 838, n. 2, p. 141, 2017. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0004-637X/838/i=2/a=141>. 5

VOURLIDAS, A.; BUZASI, D.; HOWARD, R. A.; ESFANDIARI, E. Mass and energy properties of LASCO CMEs. In: SOLAR VARIABILITY: FROM CORE

TO OUTER FRONTIERS, 10., 2002, Prague, Czech Republic. **Proceedings...** ESA Publications Division, 2002. v. 1, p. 91–94. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002ESASP.506...91V>. 6

VOURLIDAS, A.; HOWARD, R. A. The proper treatment of coronal mass ejection brightness: a new methodology and implications for observations. **The Astrophysical Journal**, v. 642, n. 2, p. 1216–1221, 2006. Disponível em: <http://stacks.iop.org/0004-637X/642/i=2/a=1216>. 6, 9, 10

VOURLIDAS, A.; LYNCH, B. J.; HOWARD, R. A.; LI, Y. How many CMEs have flux ropes? deciphering the signatures of shocks, flux ropes, and prominences in coronagraph observations of CMEs. **Solar Physics**, v. 284, p. 179–201, 2012. Disponível em: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013SoPh..284..179V>. 6, 38

WEBB, D. F.; HOWARD, T. A. Coronal mass ejections: observations. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 9, n. 1, p. 3, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>. 2, 5, 6, 7, 8