

# ANÁLISE DE EMISSÕES SOLARES MÉTRICAS COM LENTA TAXA DE DERIVA EM FREQUÊNCIA ASSOCIADAS À EVAPORAÇÃO CROMOSFÉRICA

## ANALYSIS OF METRIC SOLAR EMISSIONS WITH SLOW FREQUENCY DRIFT RATE ASSOCIATED WITH CHROMOSPHERIC EVAPORATION

Andre Rossi Korol<sup>1</sup>  
Francisco Carlos Rocha Fernandes<sup>2</sup>

**Resumo:** Por meio de ferramentas computacionais desenvolvidas exclusivamente para extração e análise de dados solares obtidos pelos espectrógrafos da rede e-Callisto, foi realizada a análise de uma rádio-emissão solar registrada em ondas métricas (200 - 800 MHz), no dia 9 de agosto de 2011 (~08:32 UT). O espectro dinâmico da emissão solar gerado demonstra claramente a presença de uma lenta taxa de deriva de frequência, indício de uma frente de expansão ascendente de plasma aquecido, que caracteriza a evaporação cromosférica. A partir dos dados espectrais, uma função de ajuste para a relação entre frequência e tempo foi obtida, por meio de regressão linear e uma taxa de deriva em frequência de 1,14 MHz/s foi determinada. Então, a velocidade da frente de expansão de plasma aquecido foi estimada em 99,1 km/s (para a baixa coroa) e 369,6 km/s (para a alta coroa), adotando um modelo de densidade eletrônica para a região de emissão na coroa solar. Esses valores são comparáveis com resultados obtidos na literatura, confirmando que a rádio-emissão representa uma assinatura em ondas métricas do fenômeno da evaporação cromosférica. Por fim, ressalta-se que as ferramentas computacionais desenvolvidas se provam úteis para a extração e análise de dados de espectrógrafos da rede e-Callisto, e que por serem de código aberto, outros pesquisadores e desenvolvedores podem contribuir com alterações, correções, novas funcionalidades e até mesmo outros serviços e plataformas que as utilizem.

**Palavras-chave:** Rádio-emissões solares. Emissão de plasma. Evaporação Cromosférica. Ondas Métricas.

**Abstract:** By computational tools exclusively developed for the extraction and analysis of solar data obtained by spectrometers from the e-Callisto network, the analysis of a solar radio-emission recorded in metric wavelengths (200 - 800 MHz) on August 9th, 2011 (~ 08: 32 UT), was performed. The generated dynamic spectrum of the solar emission clearly demonstrates the presence of a slow frequency drift rate, an indication of a front of upward expansion of heated plasma, which characterizes the chromospheric evaporation phenomenon. From the spectral data, an adjustment function for the relationship between frequency and time was obtained by linear regression and a drift rate at the frequency of 1.14 MHz / s was determined. Thus, the speed of the heated plasma expansion front was estimated at 99.1 km/s (for the lower corona) and 369.6 km/s (for the upper corona), adopting an electronic density model for the region of emission in the solar corona. These values are comparable with results obtained in the literature, confirming that the radio emission represents a signature in metric waves of the phenomenon of chromospheric evaporation. Finally,

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia da Computação pela Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), E-mail: [anrobits@yahoo.com.br](mailto:anrobits@yahoo.com.br).

<sup>2</sup> Doutor em Ciência Espacial. Docente no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus São José dos Campos (IFSP-SJC), E-mail: [francisco.fernandes@ifsp.edu.br](mailto:francisco.fernandes@ifsp.edu.br).

it is emphasized that the developed computational tools are proven useful for the extraction and analysis of data from the e-Callisto network's spectrometers, and since they are open-source, other researchers and developers may contribute with changes, corrections, new features and even completely new services and platforms that use them.

**Key words:** Solar Radio Emissions. Plasma Emission. Chromospheric Evaporation. Metric Waves.

**Data de submissão:** 23.02.2020

**Data de aprovação:** 18.11.2020

**Identificação e disponibilidade:**

(<https://revista.univap.br/index.php/revistaunivap/article/view/2484>,  
<http://dx.doi.org/10.18066/revistaunivap.v27i53.2484>).

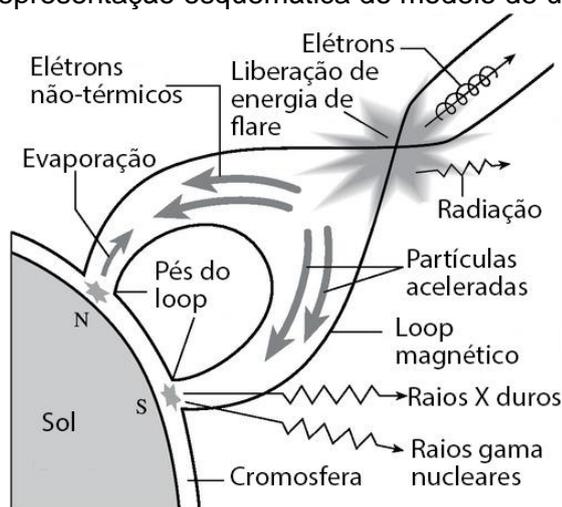
## 1 INTRODUÇÃO

Os chamados flares solares liberam grandes quantidades de energia, da ordem de  $10^{29}$  a  $10^{32}$  ergs (KANE *et al.*, 1995), e são resultantes da conversão de energia magnética dos fluxos de campo magnético das regiões ativas solares, preferencialmente, em energia térmica e cinética. A liberação primária de energia durante um flare solar resulta no aquecimento do plasma ambiente da atmosfera solar e na aceleração de partículas eletricamente carregadas, como elétrons não-térmicos (KANE; BÉNZ; TREUMANN, 1982).

Assim, feixes de elétrons acelerados durante as fases iniciais de um flare solar podem se propagar para cima, rumo à alta coroa solar ou para baixo na cromosfera, rumo à fotosfera ao longo dos loops magnéticos e perder energia por colisões, dissipada para o plasma na região dos pés dos loops magnéticos.

À medida que vários feixes de elétrons viajam para baixo, mais energia é dissipada para o plasma dos pés dos loops magnéticos, numa taxa maior do que pode ser irradiada por ele. Como resultado, o plasma aquecido se expande preferencialmente ao longo das linhas de campo, gerando uma frente de expansão de plasma aquecido movendo-se para cima, como mostrado na Figura 1. Este fenômeno é comumente chamado de evaporação cromosférica (STURROCK, 1973; DOSCHEK; WARREN, 2005). De acordo com Ning (2012a; 2012b), que apresenta uma revisão das evidências de evaporação cromosférica em rádio, raios-X e ultravioleta, a evaporação cromosférica representa a expansão de material nos arcos magnéticos de regiões ativas na cromosfera, rumo à coroa após o aquecimento durante as explosões solares. Este fenômeno ocorre na fase ascendente dos flares solares e apresenta velocidade típica de 300 a 400 km/s.

Figura 1 - Representação esquemática do modelo de um flare solar.



Fonte: Adaptado de Lang (2010).

O movimento ascendente do plasma quente e denso cria uma descontinuidade em temperatura e densidade no loop (frente). Elétrons viajando para baixo, rumo aos pés do loop, interagem com esta frente de alta temperatura movendo-se lentamente para cima, na qual a opacidade é reduzida devido à dependência com a temperatura, permitindo a geração de emissões em rádio frequências, pelo mecanismo de emissão de plasma (ASCHWANDEN; BENZ, 1997).

O cutoff para altas frequências é reduzido lentamente em função do tempo, relacionado com a velocidade da frente que se desloca para cima, até que eventualmente desapareça quando a frente da evaporação cromosférica atinge um equilíbrio com o plasma que preenche o loop. Então, o instante de início da emissão em alta frequência é potencialmente importante para a investigação da temperatura da frente da evaporação cromosférica (ANTONUCCI *et al.*, 1985; DOSCHEK; WARREN, 2005).

Acredita-se que esse processo de evaporação cromosférica desempenhe um papel fundamental na dinâmica e na energia das explosões solares e no mecanismo de transporte de plasma aquecido emitindo raios-X e em ultravioleta e na coroa solar. Portanto, a evaporação cromosférica tem sido principalmente investigada em observações em raios-X (ANTONUCCI *et al.*, 1985; SAVY, 1996; NING *et al.*, 2009) e, mais recentemente, em ultravioleta. A turbulência no plasma das regiões ativas e o deslocamento do plasma aquecido podem ser inferidos por meio do alargamento e do desvio para o azul de linhas de emissão em raios-X moles, como Ca XIX (SILVA *et al.*, 1997) e Fe XXV ou em linhas no ultravioleta, como CII e Fe XXI (SADYKOV *et al.*, 2019).

Com o avanço da tecnologia e aprimoramento dos instrumentos de observação solar, principalmente a bordo de satélites, como o *Interface Region Imaging Spectrograph* (IRIS) e o *Extreme-ultraviolet Imaging Spectrometer* (EIS), uma série de estudos do fenômeno da evaporação cromosférica tem sido realizada a partir de dados de linhas espectrais no extremo ultravioleta e deslocamento Doppler. Entre esses trabalhos, podem ser citados, Li *et al.* (2019); Li *et al.*, (2015); Gömöry *et al.* (2016); Li *et al.* (2017a); Li *et al.*, (2017b); Brosius e Inglis (2017); Lee *et al.* (2017) e Gupta, Sarkar e Tripathi (2018); Sadykov *et al.* (2019). A evaporação cromosférica também tem sido estudada a partir de imagens e dados do arranjo de telescópios *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA), abordo do *Solar Dynamics Observatory* (SDO)

(ZHANG *et al.*, 2019).

De acordo com Sadykov *et al.* (2019), a dinâmica do plasma aquecido faz com que a alta pressão também empurre o plasma mais denso da alta coroa para baixo na cromosfera inferior, em um processo conhecido como "condensação cromosférica" (MILLIGAN *et al.* 2006a; 2006b). Neste cenário, as observações de linhas podem apresentar desvio para o azul (do plasma aquecido ascendente - *upflow*) e desvio para o vermelho (do material frio descendente - *downflow*). Existem muitos trabalhos sobre a análise do processo de evaporação/condensação cromosférica usando observações em ultravioleta com alta resolução espacial, espectroscópica e temporal, cujos resultados apresentam, principalmente, desvio para o vermelho nas linhas de emissão (*downflow*).

Gömöry *et al.* (2016) estudaram a resposta da atmosfera solar durante um *flare* de classe M1.6, usando observações espectroscópicas e de imagens. Em particular, foi examinada a evolução dos fluxos de massa e de densidade eletrônica juntamente com a entrada de energia derivada de observações em raios-X duros, no contexto de evaporação cromosférica. O *flare* estudado foi acompanhado por uma erupção filamentar, que foi parcialmente capturada pelas observações do EIS, a partir das quais, foram derivadas velocidades Doppler do material ascendente de 250 a 300 km/s.

Por sua vez, investigações também mostram contrapartida do fenômeno de evaporação cromosférica no registro de rádio-emissões solares, como o trabalho pioneiro de Aschwanden e Benz (1995), que apresentou pela primeira vez, evidências observacionais do deslocamento do plasma aquecido e assinatura dessa dinâmica, na forma de lenta deriva em frequência em ondas decimétricas.

Evidências observacionais de emissões em ondas decimétricas apresentando lenta taxa de deriva em frequência, associadas ao fenômeno de evaporação cromosférica, foram reportadas por Fernandes *et al.* (2004). Ning *et al.* (2009) apresentaram evidências de em ondas rádio (1.100 – 1.340 MHz) e raios-X de evaporação cromosférica durante um *flare* solar M1.0.

As investigações do *cutoff* no limite de alta frequência das rádio-emissões associadas e da taxa de deriva em alta frequência permitem a determinação dos parâmetros da frente da evaporação cromosférica: densidade, temperatura e velocidade do agente emissor (FERNANDES *et al.*, 2004; FERNANDES *et al.*, 2007).

Emissões solares registradas em ondas métricas também podem apresentar lenta taxa de deriva em frequência, associada ao deslocamento ascendente da fonte emissora, possivelmente relacionado ao fenômeno da evaporação cromosférica, ou a ondas de choque cromosféricos. Porém, detalhes do mecanismo de geração da contrapartida em rádio da evaporação cromosférica ainda não são plenamente compreendidos e há uma escassez de investigações desse fenômeno a partir de dados em rádio frequências, o que justificam as análises de rádio-emissões métricas, no contexto da evaporação cromosférica, como a realizada no presente trabalho.

## 2 DADOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE

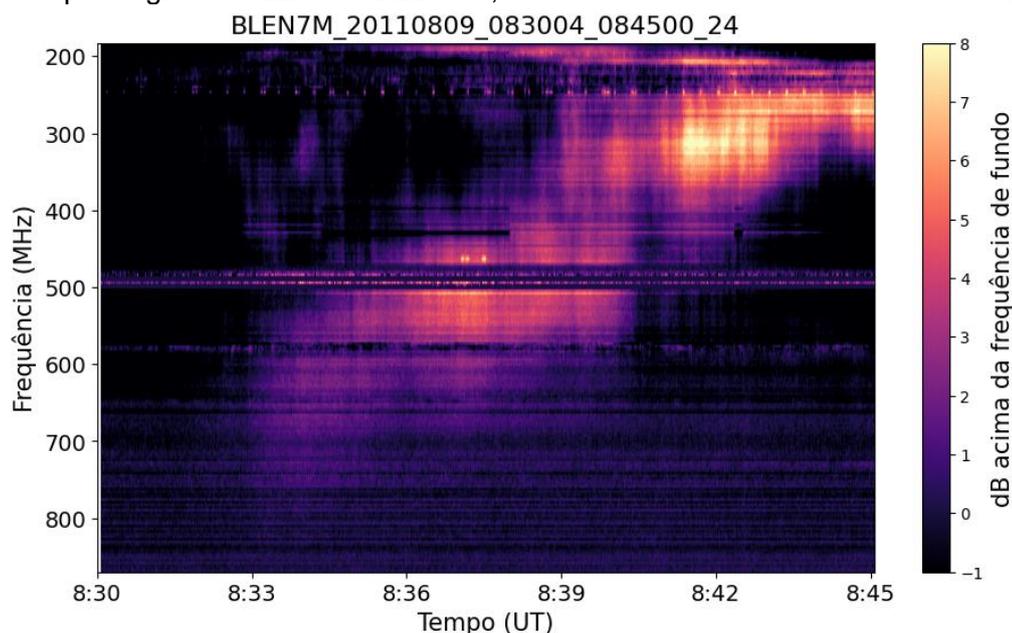
### 2.1 DADOS DE RÁDIO-EMISSION MÉTRICA

A partir do banco de dados da rede de espectrógrafos e-Callisto (BENZ;

MONSTEIN; MEYER, 2005; BENZ *et al.*, 2009), foi identificada uma rádio-emissão solar em ondas métricas apresentando lenta deriva em frequência.

A rádio-emissão selecionada foi registrada em 9 de agosto de 2011 (~08:30 - 08:45 UT), pelo espectrógrafo Bleien, Suíça (BLEN7M), no intervalo de 800 a 200 MHz. O critério para a seleção desta rádio-emissão foi a identificação visual de uma morfologia espectro-temporal no espectro dinâmico apresentando de lenta taxa de deriva em frequência. A Figura 2 mostra o espectro dinâmico da rádio-emissão selecionada e gerado pela ferramenta computacional desenvolvida.

Figura 2 - Espectro dinâmico de emissão solar registrada em 9 de agosto de 2011 (~08:32 UT) pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M, mostrando lenta taxa de deriva em frequência.



Os dados da rede e-Callisto são de domínio público e estão disponíveis no site <http://soleil.i4ds.ch/solarradio/callistoQuicklooks/em> em arquivos no formato FITS (*Flexible Image Transport System*). O formato FITS é mais útil do que formatos de imagem comuns (e.g., JPEG, GIF, PNG), uma vez que é utilizado para o transporte, análise e armazenamento arquivístico de conjuntos de dados como: matrizes multidimensionais (i.e., espectros 1D, imagens 2D, cubos de dados 3D+) e tabelas contendo linhas e colunas de informação. Os arquivos FITS são compostos por segmentos chamados de HDUs (*Header/Data Units*), com o primeiro HDU sendo chamado de HDU primário ou de matriz primária.

No caso dos arquivos FITS da rede e-Callisto, os HDUs primários contêm uma imagem 2-D, sendo uma matriz dos valores da frequência (200 canais) e a outra matriz dos valores do tempo (3.600 pontos, correspondendo a 15 minutos). O segundo HDU presente nos arquivos FITS do sistema e-Callisto é do tipo Extensão de Tabela Binária e contém os mesmos dados de tempo e de frequência encontrados no HDU primário, porém, em forma binária.

Para a extração, leitura e análise dos dados do arquivo FITS da rede e-Callisto, foi utilizada a biblioteca *PyCallisto*, desenvolvida pelos autores e disponível em <https://github.com/andrekorol/pycallisto> sob a licença de software livre e de código aberto GNU *General Public License* v3.0. A biblioteca fornece abstrações na forma de classes e métodos para o tratamento de arquivos de dados astronômicos, tendo

como dependências as bibliotecas *Astropy* para a leitura dos arquivos FITS, *NumPy* para o tratamento e manipulação dos dados, e *Matplotlib* para a plotagem dos espectros dinâmicos.

Nos arquivos FITS da rede e-Callisto, estão contidos valores de frequência das emissões relacionados aos horários em que foram observados. Durante a geração dos espectros dinâmicos, o *PyCallisto* calcula uma média das frequências, extraindo uma frequência de fundo a partir da qual uma intensidade (decibéis acima da frequência de fundo) para cada valor de tempo é calculada, e representada no espectro por meio de uma escala de cores.

A partir dos valores de intensidade, o *PyCallisto* ajusta, por meio de regressão linear, uma função para a relação entre o tempo e a frequência da taxa de deriva, a qual é utilizada para o cálculo dos parâmetros físicos da frente de expansão do plasma aquecido.

## 2.2 ANÁLISE

A determinação das velocidades do deslocamento ascendente da fonte emissora, associada à taxa de deriva em frequência das emissões, foi feita automaticamente pelo *software* desenvolvido, seguindo a metodologia de Fernandes *et al.* (2004), e é descrita a seguir.

A taxa de variação temporal da frequência ( $df/dt$ ) da emissão, assumindo emissão de plasma, pode ser expressa por (KANE; BENZ; TREUMANN, 1982):

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dN_e} \frac{dN_e}{dh} \frac{dh}{dt} = \frac{df}{dN_e} \frac{dN_e}{dh} v_f \cos\theta, \quad (1)$$

em que  $f$  é a frequência de plasma da região da emissão,  $N_e$  é a densidade eletrônica,  $h$  é a altura da fonte acima da fotosfera solar,  $\theta$  é o ângulo entre a direção de propagação da frente e a normal à fotosfera e  $v_f$  é a velocidade de deslocamento da frente da evaporação cromosférica.

Considerando emissão no modo fundamental pelo mecanismo de emissão de plasma, pode-se expressar a frequência ( $f$ ) em função da densidade eletrônica ( $N_e$ ) pela Equação (1) (MELROSE, 1985). Assim, a partir da frequência de observação, calcula-se a densidade eletrônica da região emissora na atmosfera solar.

$$f = 8,98 \times 10^{-3} N_e^{1/2} \quad (\text{em MHz}). \quad (2)$$

A altura da fonte emissora pode ser estimada a partir de um modelo de densidade da cromosfera. O modelo adotado foi proposto por Meléndez-Moreno (1997) e Meléndez *et al.* (1999), adaptado do modelo de Aschwanden e Benz (1995) e Karlický (1998), pelo qual a densidade eletrônica em função da altura é dada por:

$$N_e(h) = \begin{cases} N_1 \left(\frac{h}{h_1}\right)^{-p} & \text{se } h \leq h_1 \quad (\text{baixa coroa}) \\ N_q e^{\left(\frac{-h}{H}\right)} & \text{se } h > h_1 \quad (\text{alta coroa}) \end{cases}, \quad (3)$$

em que  $h_1$  ( $3,5 \times 10^5$  km) é a altura de transição do regime de variação da densidade,  $N_1$  ( $3,1 \times 10^6$  cm<sup>-3</sup>) é a densidade de transição,  $H$  ( $7 \times 10^4$  km) é a escala

de altura e  $N_q$  ( $4,6 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ) é a densidade eletrônica na base da coroa quieta determinada pelo modelo barométrico e  $p = 5$  (MELÉNDEZ-MORENO, 1997).

A velocidade da frente é, então, calculada considerando intervalos finitos para as variações da frequência de plasma e os respectivos intervalos da densidade eletrônica e da altura na atmosfera determinados a partir dos parâmetros observacionais e do modelo adotado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados da emissão solar registrada em 9 de agosto de 2011, foram identificados os valores limites de frequência de corte (*cutoff*) nos pontos de início e de fim da emissão apresentando lenta taxa de deriva, podendo assim ser ajustada, por regressão linear simples (método dos mínimos quadrados), uma função (frequência x tempo) que representa o avanço da frente de evaporação cromosférica.

A partir das medidas de frequência de início e fim e dos tempos inicial e final da emissão, foram obtidos os respectivos intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) e de banda de frequência ( $\Delta f$ ). A partir da metodologia descrita anteriormente, foram determinados os intervalos de densidade eletrônica  $e$ , pelo modelo adotado, de altura ( $\Delta h$ ). Finalmente, foi determinada a velocidade da frente de deslocamento da fonte emissora das emissões solares, adotando os dois regimes de altura, na baixa coroa ( $h < h_1$ ) e na coroa superior ( $h > h_1$ ), para comparação. Os valores obtidos estão na Tabela 1.

O espectro dinâmico da emissão solar analisada apresenta lenta taxa de deriva em frequência da ordem de 1,14 MHz/s. Esta lenta taxa de deriva poderia estar relacionada com o fenômeno da evaporação cromosférica ou então a ondas de choques cromosféricos gerados por uma ejeção de massa coronal (CME).

Obtiveram-se valores de velocidade para os dois regimes do modelo de densidade, de 369,6 km/s e 99,1 km/s, obtidos para alta e baixa coroa solar, respectivamente. Esses valores de velocidade da frente da evaporação cromosférica concordam com os reportados anteriormente na literatura por Fernandes et al. (2004) no intervalo de 30 a 1.700 km/s e com as velocidades médias de Aschwanden e Benz (1995), de  $(147 \pm 114)$  km/s, obtidas para os 21 eventos de rádio emissão associadas à evaporação analisados e de  $(236 \pm 129)$  km/s, apenas para aqueles eventos de 5 a 15 segundos de duração.

Tabela 1- Parâmetros determinados para a rádio-emissão de 9 de agosto de 2011: intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), banda de frequência ( $\Delta f$ ), taxa de deriva em frequência ( $df/dt$ ), intervalo de densidade eletrônica ( $\Delta N_e$ ), intervalo de altura acima da fotosfera ( $\Delta h$ ) e velocidade da região emissora ( $v_f$ ).

Modelo	$\Delta f$ (MHz)	$\Delta t$ (s)	$df/dt$ (MHz/s)	$\Delta N_e$ ( $10^9 \text{ cm}^{-3}$ )	$\Delta h$ ( $10^3 \text{ km}$ )	$v_f$ (km/s)
Baixa coroa ( $h < h_1$ )	243	212,4	1,14	2,67	21,052	99,1
Alta Coroa ( $h > h_1$ )	243	212,4	1,14	2,67	78,512	369,6

Fonte: Os autores.

Houve a ocorrência de um *flare* classe X6.9 em raios-X, aproximadamente 30 minutos antes do registro da rádio-emissão associada à evaporação cromosférica. O CDAW Data Center do Goddard Space Flight Center - NASA mostra também a ocorrência de uma CME tipo halo às 08:12:06 UT (cerca de 20 minutos antes da rádio-emissão analisada). A Tabela 2 apresenta o *flare* e a CME registrados em horários que antecederam o da emissão analisada, que ocorreu na fase de decaimento do *flare*, após o instante de máximo (pico).

Tabela 2 - Dados da atividade solar associada às rádio-emissões de 9 de agosto de 2011: classe do *flare* em raios-X; instante de pico do *flare*, região ativa, CME, instante de início da CME; velocidade linear da CME ( $V_{LIN}$ ) e velocidade final (2ª. ordem) da CME ( $V_{2ND}$ ).

Flare Raios-X	Pico <sub>flare</sub> (UT)	Região Ativa	CME (tipo)	Início <sub>CME</sub> (UT)	$V_{LIN}$ (km/s)	$V_{2ND}$ (km/s)
X6.9	08:05	1263	Halo	08:12:06	1.610	1.419

Fonte: NOAA-SWPC e CDAW-GSFC.

No entanto, a velocidade linear registrada para a CME foi de 1.610 km/s, muito superior à velocidade ascendente de propagação da fonte da rádio-emissão determinada, reforçando a hipótese das emissões registradas em 9 de agosto de 2011 estarem associadas à evaporação cromosférica e não à onda de choque da CME.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas computacionais desenvolvidas foram utilizadas para a geração do espectro dinâmico das rádio-emissões e para a determinação dos parâmetros observacionais da emissão e físicos da frente de evaporação cromosférica. Considerando os dois regimes de altura para a fonte emissora, foi obtida uma velocidade da frente de 99,1 km/s para a baixa coroa e de 369,6 km/s para a alta coroa. No caso do modelo de densidade adotado, o regime para a alta coroa se mostra mais adequado, considerando que as observações são na faixa métrica (inferior a 800 MHz), mais compatíveis com altura da fonte na coroa solar, acima da região de transição, em altitudes superiores a  $2 \times 10^3$  m acima da fotosfera solar.

O resultado obtido para a velocidade da frente para alta coroa, da ordem de 370 km/s, concorda com o maior valor de velocidade para o plasma ascendente, 360 km/s, obtido por Aschwanden e Benz (1995) para um grupo de 21 eventos analisados, cujos valores de velocidade variaram de 44 a 360 km/s. Os valores médios para a velocidade obtidos pelos autores foram de  $(147 \pm 114)$  km/s e  $(236 \pm 129)$  km/s, considerando todos os eventos analisados ou apenas os eventos com duração entre 5 e 15 segundos, respectivamente. Por sua vez, a velocidade média da frente de evaporação cromosférica inferida pelo desvio para o azul da linha de Ca XIX foi de  $(270 \pm 90)$  km/s. As estimativas de margens de erro nestes valores representam o desvio padrão da amostra analisada.

A velocidade da frente determinada no presente trabalho, também está no intervalo de valores obtidos por Fernandes *et al.* (2004), a partir da análise de um grupo de diferentes emissões decimétricas, com velocidades estimadas desde 30 km/s até velocidades de 1.700 km/s e concordam com os valores apontados por

Ning (2012a), entre 300 e 400 km/s e com o limite superior dos valores estimados por Ning *et al.* (2009), entre 175 e 347 km/s para dados de raios-X, mas é superior aos estimados para dados decimétricos de 70 a 276 km/s, para rádio-emissões com múltiplas taxas de deriva.

No caso de determinações a partir de observações no ultravioleta, a velocidade estimada tem a mesma ordem de grandeza das velocidades Doppler do material ascendente, entre 250 e 300 km/s, obtidas por Gömöry *et al.* (2016), para fluxo de plasma ascendente registrado durante a fase de declínio de um *flare* solar analisado e da velocidade aparente dos fluxos ascendentes de 50 a 630 km/s, com valor médio de ~170 km/s, obtidos por Zhang *et al.* (2019), reforçando as considerações de que as emissões métricas associadas a *flare*, apresentando lenta taxa de deriva, podem representar assinatura do processo de evaporação cromosférica que ocorre em regiões da coroa solar.

Além disso, é possível também concluir que o software desenvolvido está robusto o suficiente para ser utilizado por outros pesquisadores, assim como por ferramentas com interfaces gráficas que facilitem ainda mais seu uso, pois os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados previamente na literatura. Por ter seu código aberto, o *PyCallisto* ainda pode ser aprimorado por outros cientistas e desenvolvedores, além dos próprios autores. Embora não trivial, uma possível e importante adição seria a automatização da extração da taxa de deriva e consequentemente dos parâmetros físicos da fonte emissora.

Outras rádio-emissões apresentando lenta deriva em frequência foram identificadas no banco de dados da rede e-Callisto, e poderão ser utilizadas para testar o *software*, à medida que ele é aprimorado.

## 5 AGRADECIMENTOS

A. R. Korol agradece a bolsa de Iniciação Científica do PIBIC-UNIVAP. F. C. R. Fernandes agradece a Bolsa de PQ (CNPq Proc. 311376/2015-0 e o Projeto Regular (FAPESP Proc. 2017/08206-3). Os autores agradecem à rede e-Callisto pelos dados de emissões solares métricas.

## REFERÊNCIAS

ANTONUCCI, E. *et al.* Initial Phase of Chromospheric Evaporation in a Solar Flare. **Solar Physics**, v. 96, p. 129-142, 1985.

ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O. Chromospheric Evaporation and Decimetric Radio Emission in Solar Flares. **Astrophysical Journal**, v. 438, p. 997-1012, 1995.

ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O. Electron densities in solar flare loops, chromospheric evaporation upflows, and acceleration sites. **Astrophysical Journal**, v. 480, p. 825-839, 1997.

BENZ, A. O.; MONSTEIN, C.; MEYER, H. Callisto – A New Concept for Solar Radio Spectrometers. **Solar Physics**, v. 226, p. 143-151, 2005.

BENZ, A. O. *et al.* A World-Wide Net of Solar Radio Spectrometers: e-CALLISTO. **Earth, Moon and Planets**, v. 104, n. 1-4, p. 277-285, 2009.

BROSIUS, J. W.; INGLIS, A. R. Explosive Chromospheric Evaporation and Warm Rain in a C3.1 Flare Observed by IRIS, Hinode/EIS, and RHESSI. **Astrophysical Journal**, v. 848, p. 39, 2017.

DOSCHEK; G. A.; WARREN, H. P. Chromospheric Evaporation in Solar Flares Revisited. **Astrophysical Journal**, v. 629, p. 1150–1163, 2005.

FERNANDES, F. C. R. *et al.* Decimetric Fine Structures as a possible signature of Chromospheric Evaporation. **Brazilian Journal of Physics**, v. 34, n. 4B, p. 1792-1796, 2004.

FERNANDES, F. C. R. *et al.* Decimetric Shock-like Fine Structures in Solar Radio Emission and Chromospheric Evaporation. In: **CESRA Workshop, Program and Abstracts Book**, 2007.

GÖMÖRY, P. *et al.* Chromospheric evaporation flows and density changes deduced from Hinode/EIS during an M1.6 flare. **Astronomy and Astrophysics**, v. 558, n. A6, p. 1-12, 2016.

GUPTA, G. R.; SARKAR, A.; TRIPATHI, D. Observation and Modeling of Chromospheric Evaporation in a Coronal Loop Related to Active Region Transient Brightening. **Astrophysical Journal**, v. 857, p. 137, 2018.

KANE, S. R.; BENZ, A. O.; TREUMANN, R. A. Electron acceleration in impulsive solar flares. **Astrophysical Journal**, v. 263, p. 423-432, 1982.

KANE, S. R. *et al.* Energy-release and dissipation during giant solar-flares. **Astrophysical Journal Letters**, v. 446, p. L47- L50, 1995.

KARLICKÝ, M. Chromospheric evaporation shock and reduced optical thickness drifting in the 1-4.5 GHz range. **Astronomy and Astrophysics**, v. 338, p. 1084–1088, 1998.

LANG, K. R. Fig6\_10 Solar flare model. **NASA's Cosmos**. Disponível em: [https://ase.tufts.edu/cosmos/view\\_picture.asp?id=1379](https://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=1379). Acesso em: 17 fev. 2020.

LEE, K.-S. *et al.* IRIS, Hinode, SDO, and RHESSI Observations of a White Light Flare Produced Directly by Non-thermal Electrons. **Astrophysical Journal**, v. 836, p. 150, 2017.

LI, Y. *et al.* Chromospheric Evaporation in an X1.0 Flare on 2014 March 29 Observed with IRIS and EIS. **Astrophysical Journal**, v. 811, p. 7-20, 2015.

LI, D. *et al.* Explosive Chromospheric Evaporation Driven by Nonthermal Electrons around One Footpoint of a Solar Flare Loop. **Astrophysical Journal Letters**, v. 841, p. 1-6, 2017a.

LI, Y. *et al.* Spectroscopic Observations of Magnetic Reconnection and Chromospheric Evaporation in an X-shaped Solar Flare. **Astrophysical Journal**, v.

848, n. 2, 2017b.

LI, Y. *et al.* Different Signatures of Chromospheric Evaporation in Two Solar Flares Observed with IRIS Y. **Astrophysical Journal**, v. 879, p. 30, 2019.

MELÉNDEZ-MORENO, J. L. **Explosões solares decimétricas tipo III associadas com a fase impulsiva do flare solar**. Dissertação (Mestrado em Ciências Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1997.

MELÉNDEZ, J. L. *et al.* Statistical analysis of high-frequency decimetric type III bursts. **Solar Physics**, v. 187, p. 77-88, 1999.

MELROSE, D. B. Plasma emission mechanisms. *In*: McLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. Eds. **Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at meter wavelengths**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1985. p. 177-210.

MILLIGAN, O. R. *et al.* RHESSI and SOHO CDS observations of explosive chromospheric evaporation. **Astrophysical Journal**, v. 638, n. 2, p. L117-L120, 2006a.

MILLIGAN, O. R. *et al.* Observational evidence of gentle chromospheric evaporation during the impulsive phase of a solar flare. **Astrophysical Journal**, v. 642, p. L169-L171, 2006b.

NING, Z. *et al.* Evidence of chromospheric evaporation in the 2004 December, 1 solar flare. **Astrophysical Journal**, v. 699, p. 15-22, 2009.

NING, Z. Chromospheric Evaporation in Solar Flares. **EAS Publications Series**, v. 55, p. 245-249, 2012a.

NING, Z. Chromospheric Evaporation in Solar Flares. *In*: OBRIDKO V., GEORGIEVA K., NAGOVITSYN Y. (eds) **The Sun: New Challenges. Astrophysics and Space Science Proceedings**, v. 30, p. 105-116. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012b.

SADYKOV, M. V. *et al.* Statistical Study of Chromospheric Evaporation in Impulsive Phase of Solar Flares. **Astrophysical Journal**, v. 871, n. 1, id.2, 2019.

SAVY, S. K. Direct observations of chromospheric evaporation in solar flares. **ASP Conference Series**, v. 111, p. 240, 1996.

SILVA, A. V. R. *et al.* Imaging the chromospheric evaporation of the 1994 June 30 solar flare. **Astrophysical Journal**, v. 481, p. 978, 1997.

STURROCK, P. A. Mass Flow in Solar Flares. **Bulletim of American Astronomical Society**, v. 5, p. 280, 1973.

ZHANG, Q. M. *et al.* Imaging Observations of Chromospheric Evaporation in a Circular-ribbon Flare. **Astrophysical Journal**, v. 870, p. 1-10, 2019.