

IX Workshop da Pós-graduação em Astrofísica  
3 - 4 Maio 2016

**Propagação de Ondas MHD em *loops* coronais**

Sandra M. Conde C.  
Dr. Joaquim E. Rezende C.

Divisão de Astrofísica (DAS)  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)  
São José dos Campos, Brasil





## Resumo

As ondas MHD representam uma fonte de calor que pode balancear perdas de energia por radiação e manter o equilíbrio térmico na atmosfera solar. Porém a sua observação e análise é de vital importância neste estudo.

Com ajuda de instrumentos com alta cadência temporal e boa resolução espacial é possível observar eventos transientes, como os flares, e com eles a presença de ondas MHD. Oscilações de diferentes períodos são determinadas através do uso de periodogramas e transformadas wavelet contínuas. A análise das ondas encontradas é completada calculando as velocidades sobre linhas de campo magnético extrapoladas com a aproximação *force-free* no regime linear. Desta forma nós vemos o comportamento da onda ao longo dos *loops* em 3 dimensões.

Nós apresentamos um estudo feito sobre a região ativa NOAA 111272, onde aconteceu o flare C1.9 no dia 17-08-2011, e foram vistas ondas em *loops* magnéticos que estiveram presentes durante esse flare.



## Conteúdo

- I - Equilíbrio térmico na atmosfera solar e ondas MHD
- II - Observação e diagnóstico de Ondas MHD
- III - Região ativa NOAA 111272

## Resumo da situação

- Cromosfera e coroa perdendo energia por radiação [Rosner, Tucker e Vaiana 1978]
- É preciso de uma fonte mecânica de calor para manter o equilíbrio térmico [Walsh e Ireland 2003]
- Candidatas: Ondas MHD [Nakariakov e Verwichte 2005]
- A energia dissipada pelo amortecimento das ondas MHD podem balancear a perda de energia por radiação [Moortel 2009]

Regiões ativas no Sol que continuamente apresentam diferentes classes de Flares e onde existe alta probabilidade de encontrar ondas MHD [De Moortel 2006, Kim, Nakariakov e Shibasaki 2012]

## Ondas MHD

Perturbações de pequenas amplitudes que propagam-se ao longo das linhas de campo magnético  $\mathbf{B}$ , através da interação entre a inércia do fluido e a força restauradora da pressão [Ferraro e Plumpton 1966].

Relação de dispersão da ondas MHD

$$\omega^4 - \omega^2 k^2 (c_s^2 + v_A^2) + c_s^2 v_A^2 k^4 \cos^2 \theta_B = 0, \quad (1)$$

onde  $v_A$  é a velocidade Alfvén ( $v_A = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi\rho_0}}$ ) [Ferraro e Plumpton 1966].

A solução de (1) representa a velocidade de fase  $v_{ph}$ , na direção do vetor de onda  $\mathbf{k}$ , em função do ângulo de propagação  $\theta_B$  [Priest 1982].

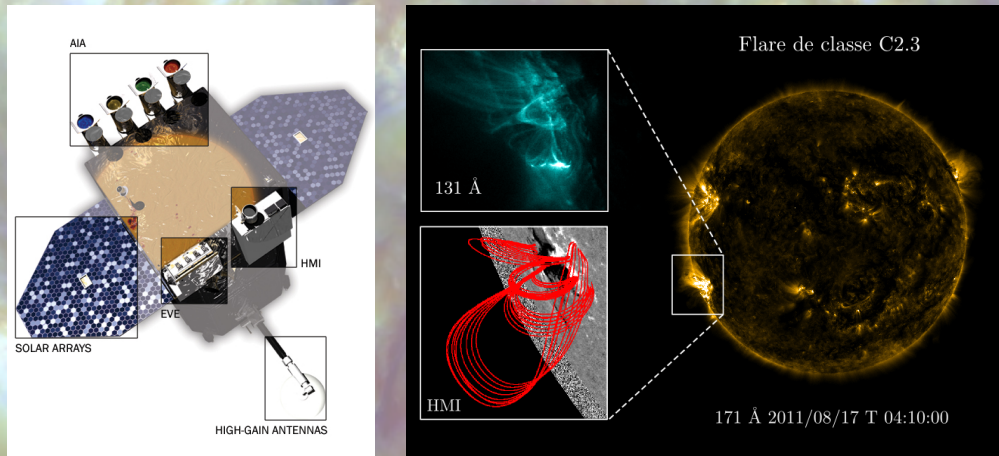
$$v_{ph} = \frac{\omega}{k} = \left[ \frac{1}{2}(c_s^2 + v_A^2) \pm \frac{1}{2} \sqrt{c_s^4 + v_A^4 - 2c_s^2 v_A^2 \cos 2\theta_B} \right]^{1/2}$$

Modo Rápido

Modo Lento

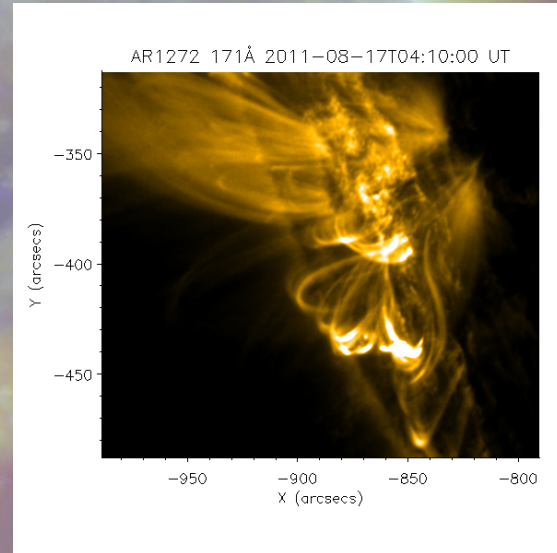
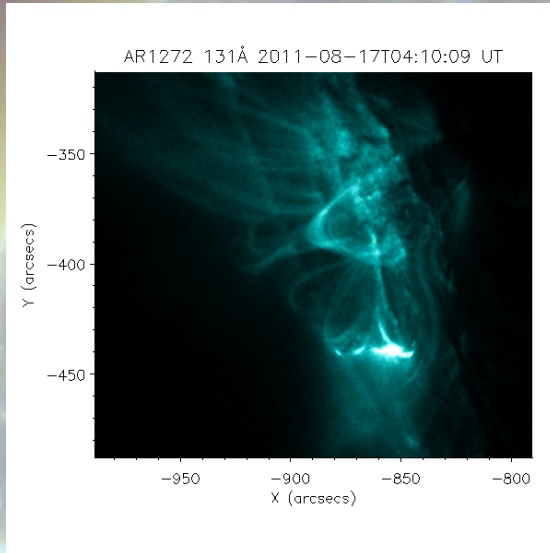
## Observação e diagnóstico de Ondas MHD

Escolher a região ativa e obter os dados com o *Solar Dynamics Observatory* (SDO) [Pesnell, Thompson e Chamberlin 2011] através dos instrumentos *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) [Lemen et al. 2012] e *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) [Scherrer et al. 2011]



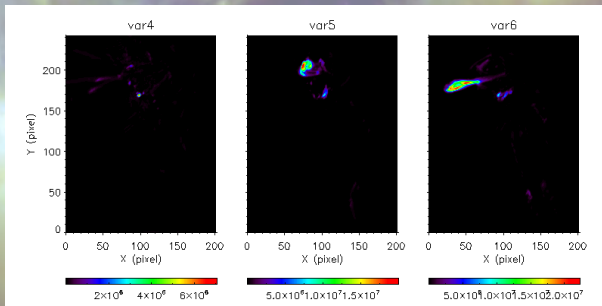
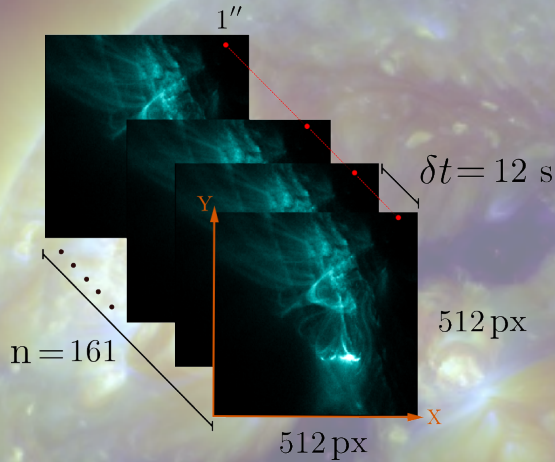
Ondas: Transformadas wavelet contínuas sobre cubos de dados 3D.  
 $v_A$  e  $c_s$ : Extrapolação de linhas de campo.

## NOAA 111272

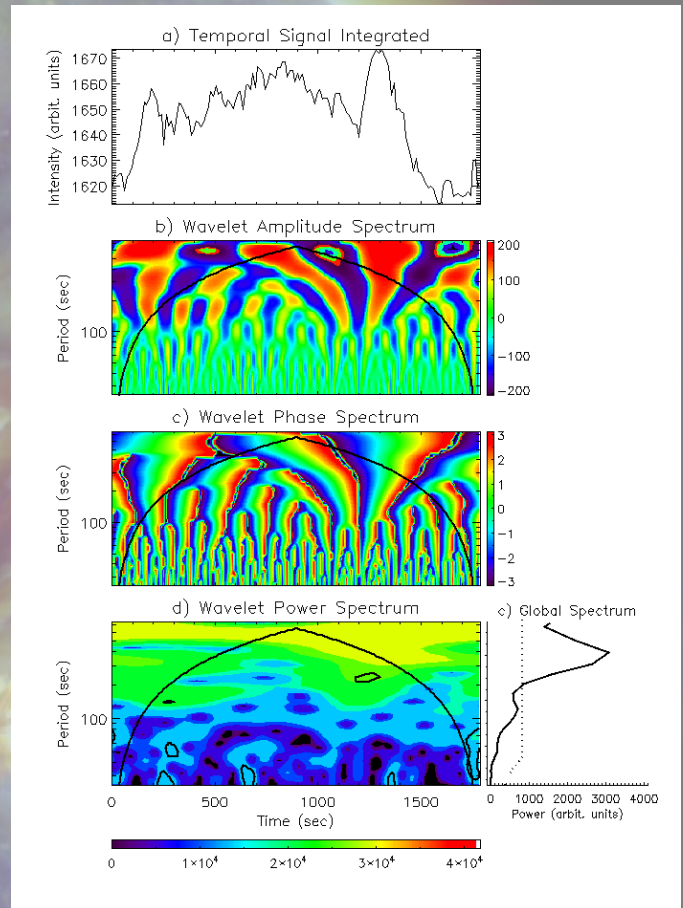


- Posição: S19E53
- Flares de classe: B3.8, C1.9 e C2.3
- início: 16/08/2011 23:45:00 UT
- Fim: 17/08/2011 05:39:48 UT

# Análise Wavelet

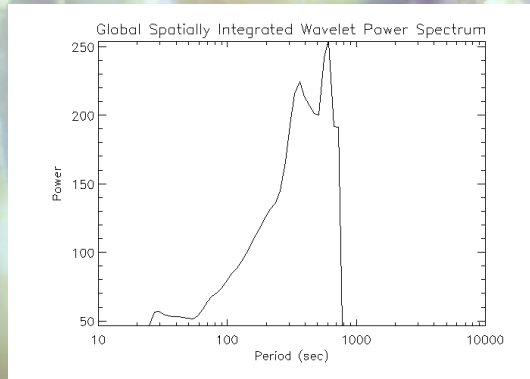


Cubo de imagens e  
Mapa de variância

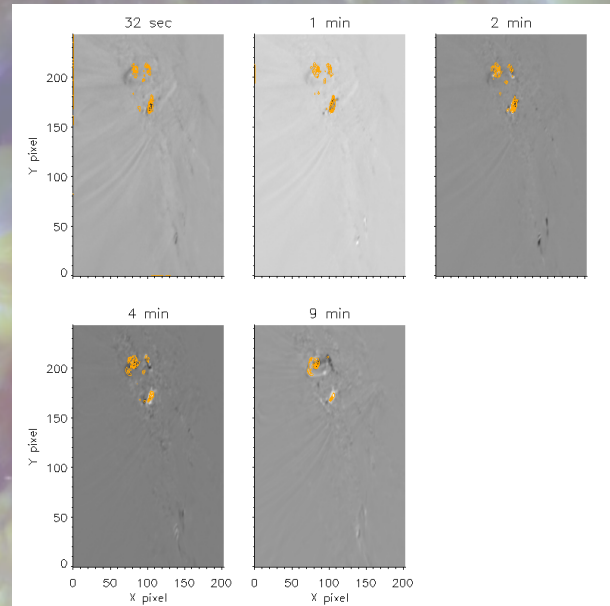




Pixelised Wavelet Filtering (PWF). Determina espacial e temporalmente fontes de oscilação em seqüências temporais de imagens 2D [Sych e Nakariakov 2008]



Espectro global de potencias



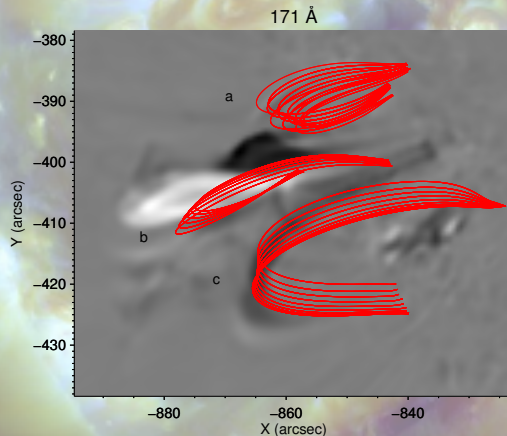
snapshots de mapa dinâmico para 5 harmônicos selecionados

## Velocidades ao longo dos *loops*

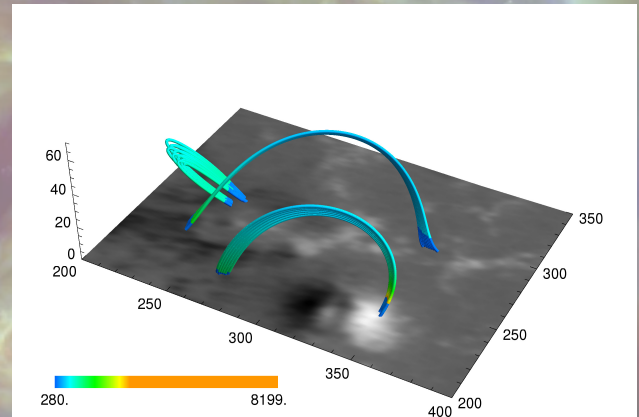
Extrapolação de linhas de campo magnético através de aproximação *linear force-free* ( $\nabla \times \vec{B} = \alpha \vec{B}$ ) [Nakagawa e Raadu 1972, Selhorst, Silva-Válio e Costa 2008].

Velocidade Alfvén ( $v_a = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}} \text{ km s}^{-1}$ ) e de som

( $c_s = 147 \sqrt{T_e/10^6} \text{ km s}^{-1}$ ) usando parâmetros dos modelos de estrutura solar [Machado et al. 1980, Aschwanden 2004]



Linhas de campo extrapoladas  
sobre *snapshot* em 171 Å



Velocidade Alfvén ( $v_a \text{ km s}^{-1}$ )

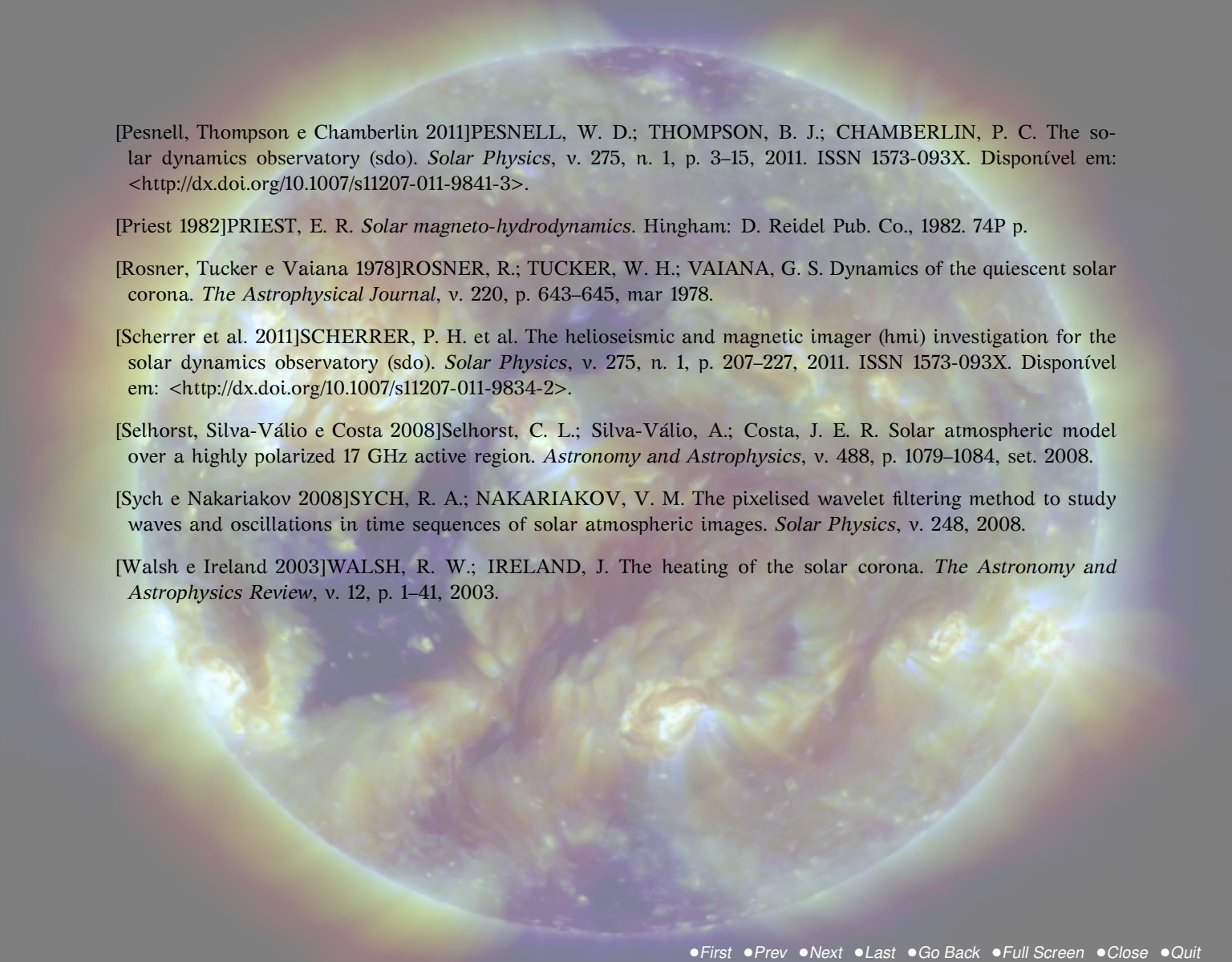
[Conde, Costa e Cedeño 2016]



muito obrigada !!

## Referências

- [Aschwanden 2004]ASCHWANDEN, M. J. *Physics of the Solar Corona. An Introduction*. [S.l.]: Praxis Publishing Ltd, 2004.
- [Conde, Costa e Cedeño 2016]CONDE, S. M.; COSTA, J. E. R.; CEDEÑO, C. E. Submitted. 2016.
- [De Moortel 2006]De Moortel, I. Propagating magnetohydrodynamics waves in coronal loops. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, v. 364, p. 461–472, fev. 2006.
- [Ferraro e Plumpton 1966]FERRARO, V. C. A.; PLUMPTON, C. *An introduction to magneto-fluid mechanics*. Clarendon P., 1966. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=3fJQAAAAMAAJ>>.
- [Kim, Nakariakov e Shibasaki 2012]KIM, S.; NAKARIAKOV, V. M.; SHIBASAKI, K. Slow magnetoacoustic oscillations in the microwave emission of solar flares. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 756, p. –36, sep 2012.
- [Lemen et al. 2012]Lemen, J. R. et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Physics*, v. 275, p. 17–40, jan. 2012.
- [Machado et al. 1980]MACHADO, M. E. et al. Semiempirical models of chromospheric flare regions. *The Astrophysical Journal*, v. 242, p. 336–351, nov. 1980.
- [Moortel 2009]MOORTEEL, I. de. Longitudinal waves in coronal loops. *Space Science Reviews*, v. 149, p. 65–81, dec 2009.
- [Nakagawa e Raadu 1972]NAKAGAWA, Y.; RAADU, M. A. On practical representation of magnetic field. *Solar Physics*, v. 25, n. 1, p. 127–135, 1972. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF00155751>>.
- [Nakariakov e Verwichte 2005]NAKARIAKOV, V. M.; VERWICHTE, E. Coronal waves and oscillations. *Living Reviews in Solar Physics*, v. 2, n. 3, 2005. Disponível em: <<http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-3>>.



[Pesnell, Thompson e Chamberlin 2011]PESNELL, W. D.; THOMPSON, B. J.; CHAMBERLIN, P. C. The solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, v. 275, n. 1, p. 3–15, 2011. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3>>.

[Priest 1982]PRIEST, E. R. *Solar magneto-hydrodynamics*. Hingham: D. Reidel Pub. Co., 1982. 74P p.

[Rosner, Tucker e Vaiana 1978]ROSNER, R.; TUCKER, W. H.; VAIANA, G. S. Dynamics of the quiescent solar corona. *The Astrophysical Journal*, v. 220, p. 643–645, mar 1978.

[Scherrer et al. 2011]SCHERRER, P. H. et al. The helioseismic and magnetic imager (hmi) investigation for the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, v. 275, n. 1, p. 207–227, 2011. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2>>.

[Selhorst, Silva-Válio e Costa 2008]Selhorst, C. L.; Silva-Válio, A.; Costa, J. E. R. Solar atmospheric model over a highly polarized 17 GHz active region. *Astronomy and Astrophysics*, v. 488, p. 1079–1084, set. 2008.

[Syeh e Nakariakov 2008]SYCH, R. A.; NAKARIAKOV, V. M. The pixelised wavelet filtering method to study waves and oscillations in time sequences of solar atmospheric images. *Solar Physics*, v. 248, 2008.

[Walsh e Ireland 2003]WALSH, R. W.; IRELAND, J. The heating of the solar corona. *The Astronomy and Astrophysics Review*, v. 12, p. 1–41, 2003.