

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Arthur Silva Colchesqui

**Estudo das correlações de longo alcance das
estruturas do campo magnético solar**

São Paulo

2025

Arthur Silva Colchesqui

Estudo das correlações de longo alcance das estruturas do campo magnético solar

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Santos de
Lima

Co-orientador: Dr. Breno Raphaldini

São Paulo

2025

*Ao meu pai, Emerson, à minha mãe Elisângela, aos meus irmãos Gustavo e Nicolas,
e à minha avó Maria de Lourdes.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a minha família, que me apoiou não só no decorrer do curso, mas durante toda minha vida. Ao meu pai, que me ensinou o valor dos estudos e, apesar de às vezes não compreender, sempre se interessou pelo o que eu estava estudando. À minha mãe, que apoiou as minhas escolhas durante esses anos de graduação, mesmo as mais radicais, e aos meus irmãos, que foram verdadeiros companheiros especialmente nesta última etapa do curso. Também deixo meus agradecimentos aos companheiros caninos Luna, Bob, Loki e ao felino Spok pelo carinho incondicional que, sem dúvidas, foi essencial para eu chegar até aqui.

Quero agradecer ao co-orientador Breno, pela oportunidade e por ter acreditado em minha capacidade de realizar este trabalho. Você é uma grande inspiração para mim como pesquisador, e tem sido um ótimo orientador, obrigado pela calma e confiança que teve comigo durante esse projeto e por toda ajuda.

Também quero agradecer ao professor Reinaldo pela orientação. Obrigado pela ajuda que me deu em encontrar um projeto de pesquisa e por todo apoio que deu na realização desse trabalho. Você também é uma grande inspiração para mim, não apenas como pesquisador, mas também como professor.

Obrigado aos meus grandes amigos e veteranos, Érick Ghuron e Pedro Senne, que tenho como irmãos que a vida me proporcionou. Espero que saibam que sem o apoio e a inspiração que vocês são para mim eu provavelmente não estaria finalizando esse curso, e com certeza não estaria buscando a carreira acadêmica. Também agradeço à Raquel por ter sido uma grande amiga e uma inspiração, obrigado por ter tirado as minhas dúvidas de astronomia e de burocracias. À Alessandra, que também é uma inspiração de pesquisadora e uma grande amiga. E ao Enrico que nesse último ano me apoiou e ajudou quando precisei

me preparar para apresentar minha pesquisa, além de sempre estar presente, obrigado pela amizade!

Agradeço também aos meus melhores amigos, Jaque e Gustavo, que foram meus primeiros amigos na universidade e me ajudaram em diversas disciplinas. Jaque, agora são 6 anos de amizade, obrigado por me aturar e por todo apoio que você me dá. E Gustavo (ou melhor, Esguicho), obrigado por todas as vezes que almoçamos e jantamos juntos, por todas as conversas que me ajudaram a sobreviver ao caos da vida universitária, e por estar comigo nos melhores momentos que vivi na universidade.

Aos meus amigos Noá, Demo, Mayara e Azzi, muito obrigado pelo apoio, as confraternizações e as conversas em todos esses anos. Vocês tornaram os dias mais insanos muito mais fáceis de serem vividos.

Agradeço os meus colegas Gael, Cibele, Urso e Júlia, pelas inúmeras disciplinas que fizemos juntos e pelo apoio que me deram nos estudos.

Agradeço os meus amigos Matheus, Chico, Guilherme, Lucas, Gabriel e Pedro, por todo apoio que me deram durante o fim da graduação, e pelo incentivo para continuar. Em especial quero agradecer ao Matheus pelos já 9 anos de amizade e por todas as risadas, conversas e conselhos que vieram com eles. E ao Chico, por me apoiar e me aconselhar sempre que precisava, e pelas confraternizações inesquecíveis.

Ao Joel, Maylson e Maebata, obrigado pelos 9 anos de amizade e por todo o apoio que vocês me deram. Desde antes de ingressar na universidade vocês já me incentivavam a estudar mais, definitivamente eu não teria chegado até aqui sem vocês.

Por fim, agradeço à USP e ao IAG. Todas as expectativas que coloquei nessas instituições antes de ingressar foram superadas, obrigado por todos os momentos!

“Posso dizer uma coisa, eu não chegaria onde cheguei sem as experiências que tive. Tudo que fiz até aqui é a prova da minha própria história.”

Agumon, *Digimon Adventure 02*

“I used to be a lounge lizard, now look at me... I'm a wizard.”

Julian Casablancas, *Prophecy of the Dragon*

Resumo

O Sol possui em seu interior um complexo e dinâmico sistema que realiza a manutenção do seu campo magnético em um ciclo de 11 anos. Esse sistema, conhecido como dinâmo solar, também é responsável pela geração de estruturas no campo magnético (como manchas solares e pontos brilhantes, entre outras) e acarreta em eventos explosivos, como a emissão de *flares* e de massa coronal. Em uma sociedade altamente dependente da tecnologia, torna-se cada vez mais importante a capacidade de prever eventos explosivos na superfície solar a médio a longo prazo, visto que estes são capazes de afetar missões espaciais, redes de telecomunicações e, até mesmo, redes elétricas (Dikpati e McIntosh, 2020).

Com isso, é proposto o estudo das correlações de longo alcance das estruturas do campo magnético solar através do uso de métodos estatísticos, como o I de Moran e a combinação complexidade-entropia, a fim de procurar sinais de alerta antecipados dos eventos explosivos e dos períodos de alta atividade solar. Isso é feito utilizando os dados de mapas da superfície solar (ou fotosfera) disponibilizados publicamente de satélites, como o *Solar Dynamics Observatory* e o *Solar and Heliospheric Observatory*, e também os dados de emissão de raios-X dos satélites das missões *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES).

Por fim, os resultados das correlações de longo alcance são comparados entre si e com os dados das sondas GOES, e verificamos se essas correlações são úteis na previsão dos eventos explosivos do Sol. Os resultados apresentados das correlações espaciais demonstraram a capacidade de previsão de eventos solares a médio e longo prazo desses métodos estatísticos, provando ser promissor em relação ao cenário atual do desaifo de estudo do clima espacial.

Abstract

The Sun possesses within its interior a complex and dynamic system that maintains its magnetic field through an 11-year cycle. This system, known as solar dynamo, is also responsible for generating magnetic field structures (such as sunspots and bright points, and others), as well as for triggering explosive events, like solar flares and coronal mass ejections. In a society highly dependent on technology, the ability to predict explosive events on the solar surface in the medium to long term becomes increasingly important, as these events can affect space missions, telecommunications networks, and even power grids (Dikpati e McIntosh, 2020).

In this context, we propose the study of long-range correlations in solar magnetic field structures through the use of statistical methods, such as Moran's I and the complexity-entropy framework, in order to search for early warning signs of explosive events and periods of high solar activity. This is carried out using publicly available solar surface (or photosphere) maps from satellites, such as the Solar Dynamics Observatory and the Solar and Heliospheric Observatory, as well as X-ray emission data from the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) missions.

Finally, the results of the long-range correlation analyses are compared with one another and with the GOES probe data to assess whether these correlations can be useful in predicting the Sun's explosive events. The spatial correlation results demonstrated the medium- and long-term predictive capability of these statistical methods for solar events, proving to be promising in relation to the current challenges in space weather research.

Lista de Figuras

2.1	Mapa sinótico radial do instrumento HMI embarcado no satélite SDO para a rotação de Carrington 2300. Fonte: http://hmi.stanford.edu/data/synoptic.html .	22
2.2	Mapa global da coroa solar do dia 26 de Maio de 2013. O sistema de coordenadas utilizado também é o sistema heliográfico de Carrington.	23
3.1	Valores obtidos para o índice MI dos mapas sinóticos do MDI e HMI. Uma linha pontilhada em vermelho divide a série entre os dados do MDI (CR 1909 a CR 2095) e os dados do HMI (CR 2096 em diante).	27
3.2	Valores obtidos para a Entropia de Permutação (painei 1) e Complexidade (painei 2) dos mapas sinóticos do MDI e HMI. Uma linha pontilhada em vermelho divide a série entre os dados do MDI (CR 1909 a CR 2095) e os dados do HMI (CR 2096 em diante).	28
3.3	Resultados obtidos do índice MI (painei 1), Entropia de permutação (painei 2) e Complexidade (painei 3) para os mapas globais da coroa solar de AIA/EUVI. Além dos resultados, todos os gráficos apresentam o fluxo solar integrado do período analisado.	29
4.1	Variação do índice MI obtido para os mapas sinóticos de MDI/HMI a lag-1.	31
4.2	Variação da complexidade à lag-1 para os mapas sinóticos de MDI/HMI .	32
4.3	Auto-correlação espacial e Complexidade-Entropia do período de alta emissão de <i>flares</i> em Agosto de 2011, os <i>flares</i> emitidos chegaram a variar de grau X1.3 a X1.9.	33

Sumário

1. <i>Introdução</i>	17
2. <i>Metodologia</i>	21
2.1 Mapas sinóticos de HMI/MDI	21
2.2 Mapas globais da coroa solar	22
2.3 Autocorrelação Espacial	22
2.4 Complexidade e entropia de permutação	24
3. <i>Resultados</i>	27
3.1 Resultados para os mapas sinóticos do MDI/HMI	27
3.2 Resultados para os mapas globais do AIA/EUVI	28
4. <i>Análise dos Resultados</i>	31
4.1 Análise dos resultados para os mapas sinóticos de MDI/HMI	31
4.2 Análise dos resultados para os mapas globais de AIA/EUVI	32
5. <i>Conclusão e perspectivas futuras</i>	35
Referências	37

Capítulo 1

Introdução

O Sol é uma estrela típica da sequência principal de tipo espectral G2 V e a única que pode ser estudada em grande detalhe (Thomas e Weiss, 2008). No interior solar, a energia gerada por reações em seu núcleo ($\sim 0.2 R_{\odot}$) é carregada através da zona radiativa que se estende até $0.7 R_{\odot}$, após a qual a redução da temperatura do plasma solar o torna muito opaco para que o fluxo de energia seja carregado apenas por radiação, tornando a convecção termal o principal meio de transporte de energia na chamada zona convectiva, $> 0.7 R_{\odot}$ (Thomas e Weiss, 2008).

A região equatorial do Sol rotaciona mais rapidamente que as regiões polares. Essa rotação diferencial se estende por toda a zona convectiva, criando uma transição abrupta de rotação entre a zona convectiva e a zona radiativa, que possui rotação aproximadamente uniforme, chamada de tacocлина ($\sim 0.04 R_{\odot}$). Na tacocлина, a rotação diferencial estica as linhas do campo magnético poloidal transformando-o em um campo toroidal (chamado efeito- Ω), o qual se torna instável devido à convecção turbulenta, sofrendo torções que geram campos bipolares de pequena escala (chamado efeito- α). Esses pequenos campos bipolares emergem na fotosfera como manchas solares por causa do empuxo magnético, e, conforme as manchas evoluem e dissipam, seu fluxo magnético remanescente é transportado para as regiões polares, formando um campo polar de grande escala com polaridade invertida em relação ao campo inicial (Charbonneau, 2014). Esse ciclo, conhecido como dínamo- $\alpha\Omega$ solar, dura cerca de 11 anos (levando cerca de 22 anos para o campo magnético retornar à sua configuração inicial) e é caracterizado pelos mínimos e máximos de atividade magnética solar.

O ciclo do dínamo solar é responsável pelas estruturas do campo magnético solar, como as já citadas manchas solares e as regiões "porosas" da fotosfera, conhecidas como pontos

brilhantes, e também pelos eventos explosivos, como *flares* e emissões de massa coronal (EMC), entre outros eventos (Usoskin, 2023). Esses eventos eruptivos podem causar aceleração esporádica de partículas energizadas, podendo afetar missões espaciais, bem como a interação com a magnetosfera da Terra pode causar intensas tempestades geomagnéticas, podendo perturbar a propagação de ondas de rádio, os sistemas de navegação, ou, até mesmo, induzir correntes perigosas em linhas elétricas. Existe também uma potencial conexão entre o clima terrestre e a atividade magnética solar (Usoskin, 2023). Dikpati e McIntosh (2020) argumentam ser de extrema importância encontrar uma forma de prever o clima espacial para a segurança da nossa sociedade altamente dependente da tecnologia, com o paradigma atual para o tratamento de *flares* e EMCs como eventos aleatórios, considerando um tempo de preparo para eventos explosivos no Sol sendo de no máximo 5 dias.

A detecção de ondas Rossby no Sol por McIntosh et al. (2017) demonstra a possibilidade de previsão do clima espacial. Ondas Rossby, ou ondas globais, são geradas pelas forças de Coriolis perpendiculares em uma casca esférica rotacionando, e, no contexto do clima da Terra, as ondas Rossby são responsáveis pelas diferentes correntes de ar, tempestades e frentes frias em latitudes médias (Boers et al., 2019). A emergência do fluxo magnético solar é governada por ondas Rossby, que atuam na tacocilina de forma análoga às correntes de ar na Terra e possibilitam a previsão do estado futuro do campo magnético solar e do clima espacial (Dikpati e McIntosh, 2020).

A previsão de pontos críticos em sistemas complexos e dinâmicos é amplamente estudada em áreas como a ecologia, economia, meteorologia, medicina, entre outras (Scheffer et al., 2009). Apesar de ser muito difícil prever o momento em que um ponto ou transição crítica irá acontecer, é possível encontrar sinais de alerta antecipados (*early-warning signals*) para esses eventos devido à desaceleração crítica (*critical slowing-down*), isto é, conforme um sistema se aproxima de uma transição crítica, o tempo de recuperação do estado de equilíbrio após sofrer pequenas perturbações se torna cada vez mais longo, ou seja, se torna cada vez mais difícil o sistema retornar ao estado anterior (Kéfi et al., 2014). A existência das ondas Rossby no Sol sustenta o estudo e a aplicação dos métodos de sinais de alerta antecipados, utilizados na previsão do clima terrestre, no contexto do clima espacial.

Com isso, esse trabalho busca estudar o campo magnético solar e suas estruturas a

fim de encontrar candidatos a sinais de alerta antecipados dos eventos explosivos do Sol e da atividade magnética solar como um todo. Para isso, foram analisadas as variações nas autocorrelações espaciais e na variância espacial dos magnetogramas e mapas de pontos brilhantes do Sol ao longo dos anos (Suess e Tsurutani, 2015). Além disso, foram analisadas as variações nas medidas de complexidade e entropia dos mapas utilizando o método de Ribeiro et al. (2017). Para isso, foi tomado como inspiração o trabalho de Tirabassi e Masoller (2023), que demonstrou que essas medidas de complexidade e entropia podem ser utilizadas como sinais de alerta antecipados para séries espaciais, bem como propôs que a medida de autocorrelação e as medidas de complexidade-entropia são complementares para buscar sinais de alerta antecipados.

Por fim, os resultados de autocorrelação e complexidade-entropia serão comparados com os catálogos de fluxo de raios-X solar e emissões de flares, a fim de entender a possibilidade de previsão a médio prazo do clima espacial.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Mapas sinóticos de HMI/MDI

Para realizar o estudo das correlações de longo alcance da superfície solar foram utilizados dois conjuntos de dados.

O *Helioseismic and Magnetic imager* (HMI) é um instrumento feito para estudar as oscilações e o campo magnético da fotosfera solar, que foi embarcado no satélite *Solar Dynamics Observatory* (SDO) e está em atividade desde maio de 2010, observando o disco solar completo a 6173 Å com uma resolução de 1 segundo de arco. O HMI é o sucessor do *Michelson Doppler Imager* (MDI), que esteve embarcado no satélite *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) e manteve atividade entre maio de 1996 e dezembro de 2010, fazendo observações da fotosfera semelhantes ao HMI, porém com uma resolução menor. Um exemplo de mapa sinótico obtido através do HMI é visto na Figura 2.1.

Como o SOHO e o SDO não conseguem observar a fotosfera solar completa de forma síncrona, os mapas são dados em termos de rotação de Carrington, de forma que escaneiam o Sol conforme ele rotaciona ao redor do seu eixo. Uma rotação de Carrington é dada por um período de 27,2763 dias e o ínicio da contagem de rotações foi em 9 de Novembro de 1853. Os mapas também são construídos em termos de coordenadas de Carrington, um sistema de coordenadas no qual a longitude é fixa para a rotação solar, ao contrário de ser fixada a um observador na Terra, quando a linha 0° da longitude Carrington passa pelo meridiano central do Sol visto pela Terra, uma nova rotação de Carrington se inicia.

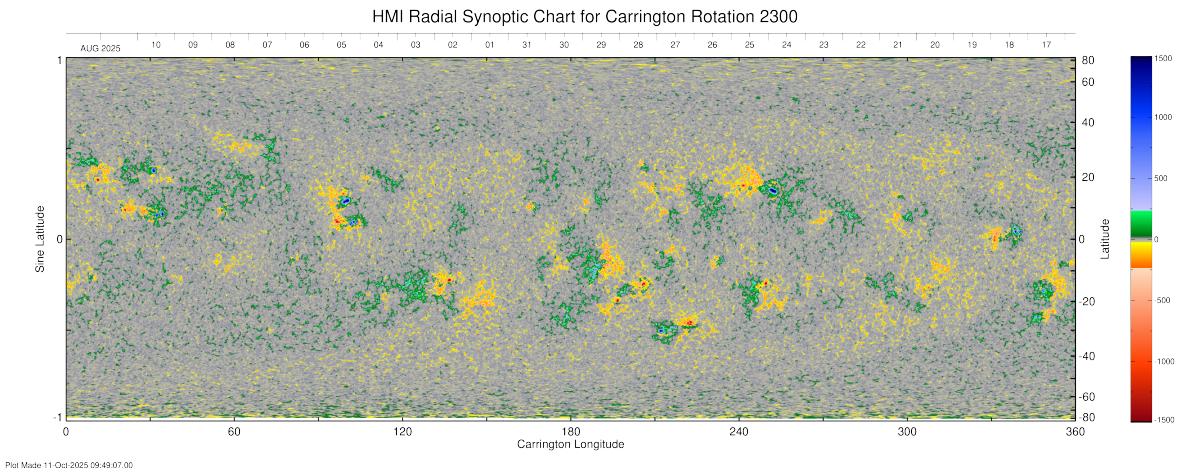


Figura 2.1: Mapa sinótico radial do instrumento HMI embarcado no satélite SDO para a rotação de Carrington 2300. Fonte: <http://hmi.stanford.edu/data/synoptic.html>.

2.2 Mapas globais da coroa solar

O segundo conjunto de dados foi criado através da união das imagens obtidas pelo instrumento *Extreme-Ultraviolet Imager* (EUVI), que foi embarcado nas sondas gêmeas *Solar Terrestrial Relations Observatory* (STEREO) que observavam a coroa solar a 195 Å, e também pelo *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA), que foi embarcado na sonda SDO que observava a coroa solar a 193 Å. O conjunto de dados abrange o período de 1 de Junho de 2010 a 31 de Maio de 2013, quando as órbitas dessas 3 sondas permitiram observar a coroa solar em sua totalidade de forma síncrona. Um exemplo de mapa global da coroa solar é dado pela Figura 2.2.

2.3 Autocorrelação Espacial

A fim de iniciar o estudo das correlações de longo alcance das estruturas do campo magnético solar, foi necessário inicialmente o estudo teórico dos métodos que possibilitam essa análise. Dakos et al. (2012) propõem o uso de indicadores de evolução de séries espaciais e séries temporais como possíveis ferramentas para o estudo de sistemas complexos variados, que passam por transições ou eventos críticos. Um evento crítico é caracterizado por um momento em que o sistema passa de um estado para outro abruptamente. Por exemplo, na medicina isso pode ser visto como ataques de asma ou ataques epiléticos, na Terra as mudanças climáticas podem causar catástrofes naturais e mudanças na população de fauna e flora (Scheffer et al., 2009), e no Sol as mudanças nas dinâmicas das ondas

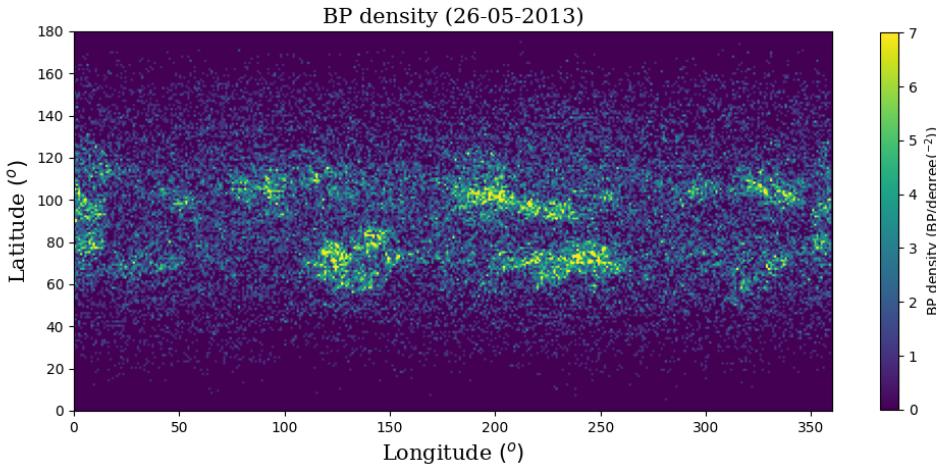


Figura 2.2: Mapa global da coroa solar do dia 26 de Maio de 2013. O sistema de coordenadas utilizado também é o sistema heliográfico de Carrington.

Rossby na tacocilina podem causar períodos de alta atividade magnética solar (Dikpati e McIntosh, 2020).

Como o estudo está centrado nas séries espaciais da fotosfera e coroa solar, foi posto foco maior nos métodos para séries espaciais, como a autocorrelação espacial. A autocorrelação espacial descreve como uma variável se relaciona consigo mesma em um campo espacial, sendo que a autocorrelação positiva ocorre quando valores semelhantes estão localizados próximos no espaço e a autocorrelação negativa ocorre quando valores distintos se encontram próximos no espaço Moraga (2024). Uma das formas mais comuns de se medir a autocorrelação espacial é utilizando o índice I de Moran (doravante MI), desenvolvido por Moran (1950) e dado pela Equação 2.1.

$$I = \frac{N}{\sum_{i \neq j} w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.1)$$

onde N é o número de regiões ou pontos, x_i é o valor da variável de interesse na região i , \bar{x} é a média da variável de interesse em todos os pontos e w_{ij} é a matriz de peso que denota a proximidade entre uma região i e uma região j .

A autocorrelação espacial é um bom indicador da desaleceração crítica, pois como o sistema leva cada vez mais tempo para retornar ao estado de equilíbrio ao se aproximar de uma transição crítica, as regiões vizinhas vão se tornando cada vez mais semelhantes,

ou seja, vão se tornando cada vez mais correlacionadas entre si (Kéfi et al., 2014). Desta forma, a variação do índice MI ao longo do tempo serve como um indicador da formação de estruturas, que antecipam transições e/ou eventos críticos no sistema.

Para realizar o cálculo do índice MI para as séries espaciais da fotosfera solar foi utilizado o ESDA, um dos módulos do PySal. O PySal é uma grande biblioteca em `python` para análise geoespacial, que possui ferramentas como o `Exploratory Spatial Data Analysis` (ESDA) que permite o cálculo direto de autocorrelações espaciais e locais (Rey e Anselin, 2007).

2.4 Complexidade e entropia de permutação

A segunda etapa do trabalho envolveu o estudo das séries espaciais através da entropia de permutação e da complexidade estatística. A entropia de permutação é uma medida natural da complexidade de um sistema usada tanto em análises de séries temporais (Ribeiro et al., 2017) quanto em análises de séries espaciais (Tirabassi e Masoller, 2023). Rosso (2007) propõe o uso da entropia de permutação com uma medida relativa de entropia, a complexidade estatística, para formar o campo de causalidade entropia-complexidade. O campo de causalidade não apenas permite avaliar o comportamento do sistema, distinguindo esse comportamento entre estocástico ou caótico, como também forma um sinal de alerta antecipado caracterizando a formação de estruturas em imagens (Ribeiro et al., 2012).

A entropia de permutação é definida como uma normalização da entropia de Shannon. Para entender, utilizamos a formulação de Ribeiro et al. (2012) para as permutações em uma série temporal s composta por n elementos e vetores de d -dimensões, que são definidas por:

$$(s) \rightarrow (x_{s-(d-1)}, x_{s-(d-2)}, \dots, x_{s-1}, x_s), \quad (2.2)$$

Onde $s = d, d+1, \dots, n$. Para todos os $(n-d+1)$ vetores teremos as permutações $\pi = (r_0, r_1, \dots, r_{d-1})$ de $(0, 1, \dots, d-1)$ definidas por $x_{s-r_{d-1}} \leq x_{s-r_{d-2}} \leq \dots \leq x_{s-r_1} \leq x_{s-r_0}$. As $d!$ possíveis permutações de π são os estados acessíveis do sistema, e para cada um desses estados existe uma probabilidade de obter o padrão presente nele dada por:

$$p(\pi) = \frac{\#\{s|s \leq n-d+1; (s) \text{ com padrão } \pi\}}{n-d+1}. \quad (2.3)$$

Com isso podemos definir a entropia de permutação como:

$$H[P] = \frac{S[P]}{S_{max}}, \quad (2.4)$$

onde $S[P] = -\sum p(\pi) \log p(\pi)$ é a entropia de Shannon calculada para as probabilidades das diferentes permutações possíveis π e $S_{max} = \log(d!)$ é a entropia de Shannon obtida considerando todos os estados acessíveis $d!$ como equiprováveis, ou seja, $P = P_e = 1/(d!)$.

A complexidade estatística é definida por:

$$C[P] = Q[P, P_e]H[P], \quad (2.5)$$

onde $Q[P, P_e]$ é o desequilíbrio, definido em termos da divergência Jensen-Shannon (Ribeiro et al., 2012) como $Q[P, P_e] = \frac{S[(P+P_e)/2] - S[P]/2 - S[P_e]/2}{Q_{max}}$ e é uma medida entrópica relativa entre a probabilidade ordinal empírica P e a probabilidade dos estados equiprováveis P_e , onde Q_{max} é o valor máximo possível de $Q[P, P_e]$,

Para o cálculo das entropias e complexidades dos mapas da fotosfera solar foi utilizada a biblioteca `ordpy`, desenvolvida por Pessa e Ribeiro (2021) especificamente para a análise das entropias de permutação e complexidade estatística.

Capítulo 3

Resultados

3.1 Resultados para os mapas sinóticos do MDI/HMI

Para a obtenção dos resultados da autocorrelação espacial e permutação de entropia para os mapas sinóticos dos instrumentos MDI e HMI, foi feito primeiro um código para baixar automaticamente todos os dados dos mapas sinóticos, disponibilizados publicamente pela Universidade de Stanford. Após a obtenção dos dados foram feitos dois códigos, um utilizando a biblioteca ESDA e outro utilizando a biblioteca `ordpy`, a fim de obter o índice MI e a complexidade-entropia, respectivamente. A Figura 3.1 mostra os resultados do índice MI para os mapas sinóticos.

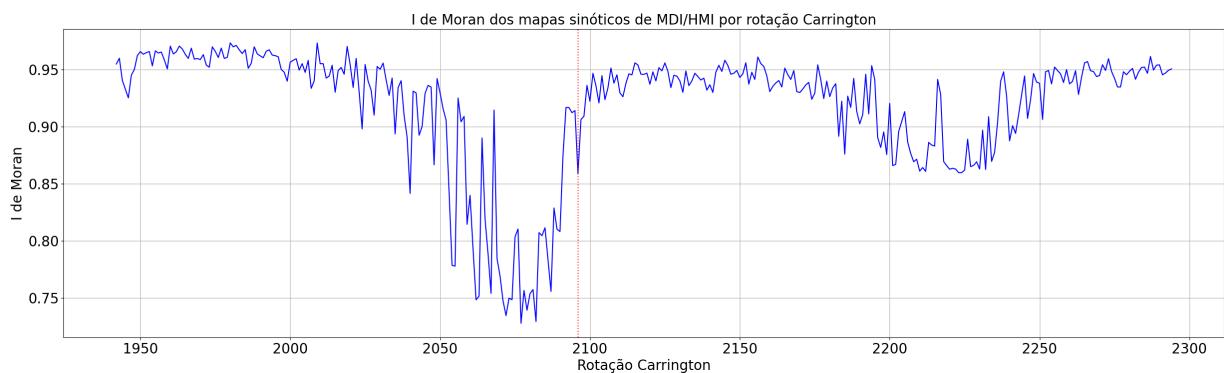


Figura 3.1: Valores obtidos para o índice MI dos mapas sinóticos do MDI e HMI. Uma linha pontilhada em vermelho divide a série entre os dados do MDI (CR 1909 a CR 2095) e os dados do HMI (CR 2096 em diante).

Para obter a Complexidade e Entropia de permutação é necessário a escolha das dimensões de imersão d_x e d_y , que vão ditar quantas permutações são possíveis para a análise ($(d_x d_y)!$), Ribeiro et al. (2017) demonstram que a escolha da dimensão de imersão pode impactar os resultados finais, e que o ideal é escolher dimensões que sejam muito menores que

o número de pontos disponíveis ($(d_x d_y!) \ll N$). Por isso, foram feitas diversas execuções do código para testar qual seria a melhor dimensão de imersão, permutando pares das listas $d_x \in [2, 3, 6]$ e $d_y \in [2, 3, 6]$. Devido à pequena diferença entre os resultados, foi escolhido $d_x = d_y = 3$ como as dimensões finais para a análise. A Figura 3.2 contém os resultados para a Complexidade e Entropia de Permutação para os mapas sinóticos.

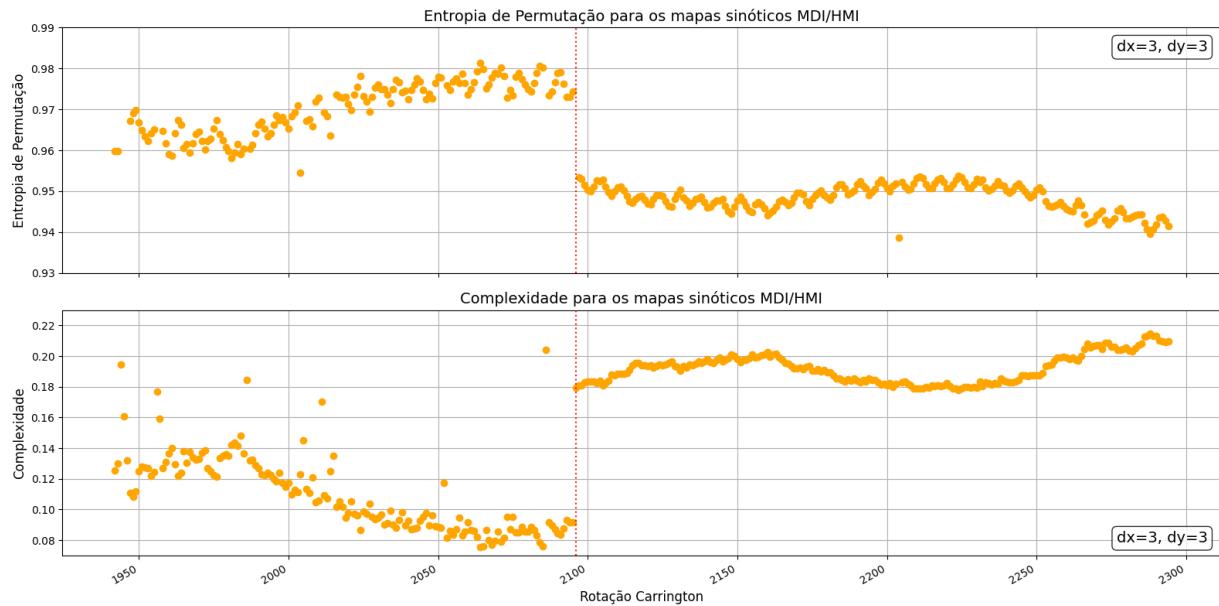


Figura 3.2: Valores obtidos para a Entropia de Permutação (painele 1) e Complexidade (painele 2) dos mapas sinóticos do MDI e HMI. Uma linha pontilhada em vermelho divide a série entre os dados do MDI (CR 1909 a CR 2095) e os dados do HMI (CR 2096 em diante).

3.2 Resultados para os mapas globais do AIA/EUVI

Os mapas globais de pontos brilhantes das sondas AIA/EUVI foram disponibilizados por Scott W. McIntosh, e são os mesmos que foram utilizados no artigo de 2017 (McIntosh et al., 2017). Além dos mapas globais, foram utilizados os índices de fluxo de raios-X integrados dia a dia da 15^o sonda *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES-15), que abrange o período de 2010 a 2013, a fim de analisar a viabilidade de utilizar esses resultados como sinal de alerta antecipado para períodos de alta atividade solar.

A Figura 3.3 mostra os resultados do índice MI e da Complexidade-Entropia para esses mapas. Também foram feitos testes com $d_x \in [1, 2, 3]$ e $d_y \in [1, 2, 3]$, e foi visto que com parâmetros diferentes de $d_x = d_y = 2$ eram obtidos valores de complexidade e entropia

semelhantes entre si, ao contrário do inverso esperado, portanto a análise foi feita com $d_x = d_y = 2$.

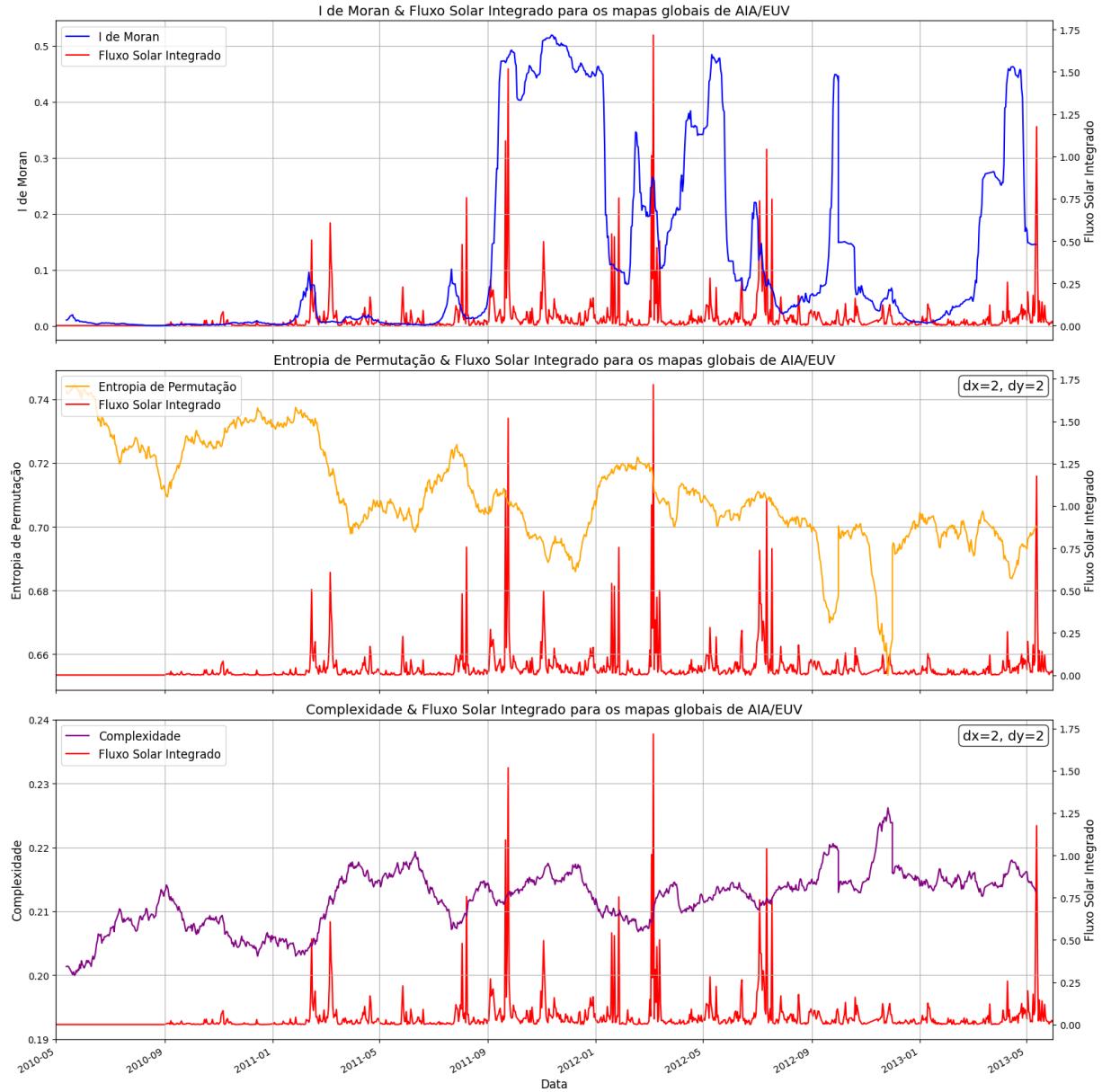


Figura 3.3: Resultados obtidos do índice MI (painel 1), Entropia de permutação (painel 2) e Complexidade (painel 3) para os mapas globais da coroa solar de AIA/EUVI. Além dos resultados, todos os gráficos apresentam o fluxo solar integrado do período analisado.

Capítulo 4

Análise dos Resultados

4.1 Análise dos resultados para os mapas sinóticos de MDI/HMI

Para todos os resultados do índice MI obtidos (tanto para os mapas sinóticos de MDI/HMI quanto para os mapas globais de AIA/EUVI), os p-valores se mantiveram baixos, com $p = 0.001$, o que possibilita a rejeição da hipótese nula de que não há correlação alguma nos mapas observados.

Nos resultados do índice MI para os mapas sinóticos de MDI/HMI, vistos na Figura 4.1, é possível observar que os valores se mantém elevados ($I \geq 0.9$) na maior parte do tempo, com exceção do vale observado entre as rotações Carrington 2000 e 2100, que corresponde a um longo período de baixa atividade solar, localizado na transição entre o ciclo 23 e o ciclo 24 (Usoskin, 2023), e outro vale é visto entre as rotações 2175 e 2250, que também corresponde a um período de baixa atividade solar, marcado pela transição do ciclo 24 para o ciclo 25. Também é possível observar que para os dados do MDI (CR 1909 à CR 2096) a variação do índice MI a lag-1, visto na Figura 4.1, é maior do que para os dados do HMI, possivelmente devido ao aumento da resolução do HMI em relação ao MDI.

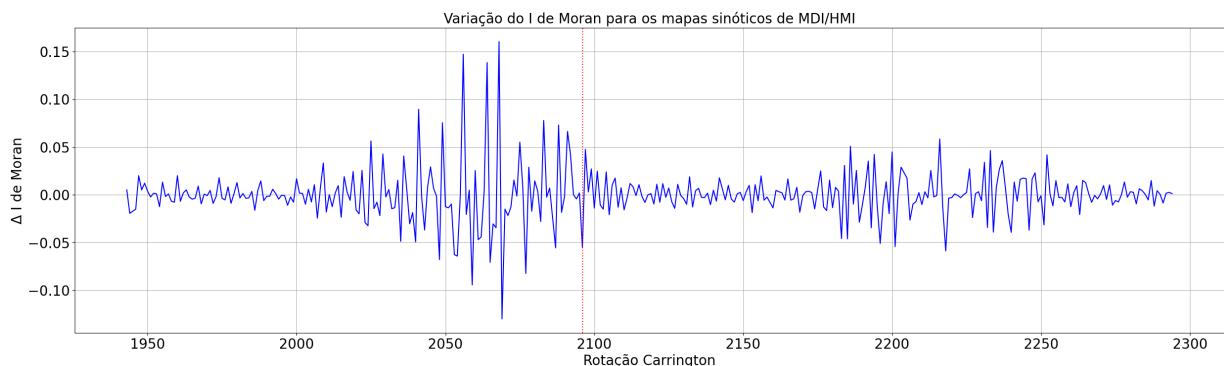


Figura 4.1: Variação do índice MI obtido para os mapas sinóticos de MDI/HMI a lag-1.

Os resultados obtidos de Entropia de Permutação e Complexidade para os mapas sinóticos de MDI/HMI apresentam um comportamento complementar à autocorrelação espacial, porém com uma variação a lag-1 menor, como visto na Figura 4.2. Mais uma vez a mudança de resolução entre os instrumentos é vista claramente, dessa vez na forma de uma desconexão entre as séries. Observando a complexidade no segundo painel da Figura 3.2 é possível chegar à mesma conclusão de dois vales, correspondendo aos respectivos períodos de mínima solar, em especial é possível observar que a queda do período de mínima se inicia em um ponto anterior ao início da queda na Figura 3.1 do índice MI.

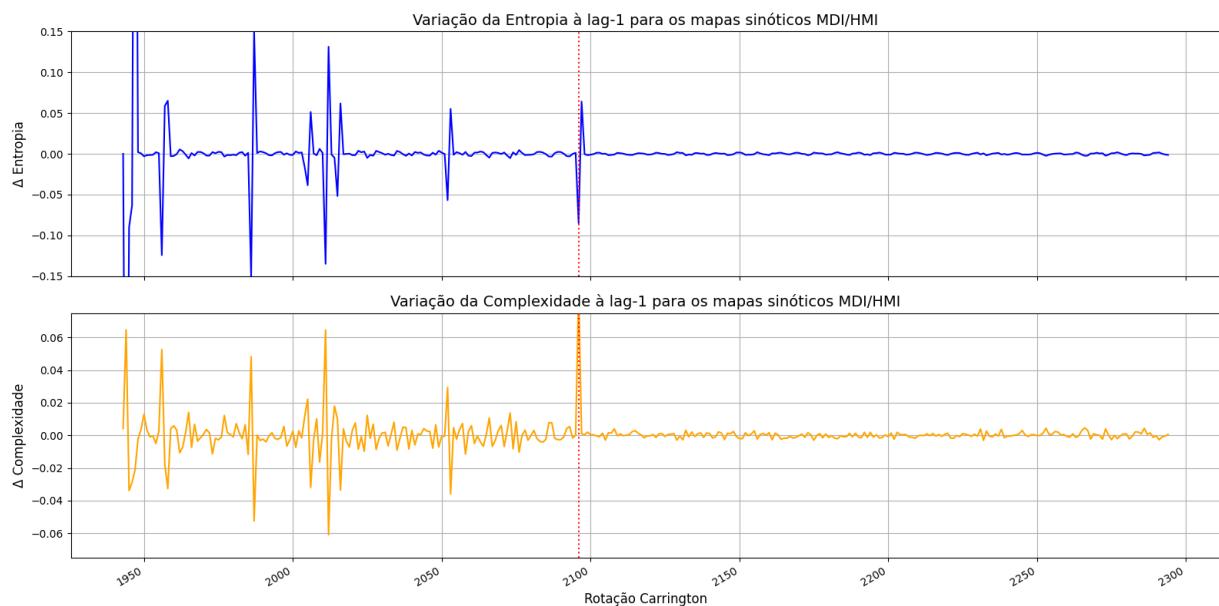


Figura 4.2: Variação da complexidade à lag-1 para os mapas sinóticos de MDI/HMI

4.2 Análise dos resultados para os mapas globais de AIA/EUVI

Dado que os mapas globais de pontos brilhantes da coroa solar são séries diárias e síncronas, pode-se fazer uma comparação com a série de fluxo solar do GOES-15 e entender o comportamento do sistema em períodos de alta atividade. De fato, é possível observar no painel 1 da Figura 3.3 que em pontos que antecedem os períodos de alta atividade solar a autocorrelação espacial começa a aumentar. Uma vez que ela se mantém próxima a 0 e sofre aumentos nesses períodos, pode-se afirmar que a formação de estruturas na superfície do Sol ocorre junto ao aumento de atividade magnética, visto que uma correlação próxima a 0 é indicativo de um sistema disperso sem estruturas, e uma autocorrelação

maior que 0 é indicativo de que pontos próximos estão relacionados entre si (formação de estruturas) (Moraga, 2024).

De forma análoga, é possível observar variações na complexidade e entropia do sistema antecipando os períodos de alta atividade, como visto na Figura 4.3, em que são comparados em maior detalhe pontos específicos de alta emissão. Vale notar também na Figura 4.3, como o aumento do índice MI antecipa o *flare* de grau X em semanas antes, demonstrando o grande potencial dessa estatística como um sinal de alerta antecipado da atividade magnética solar.

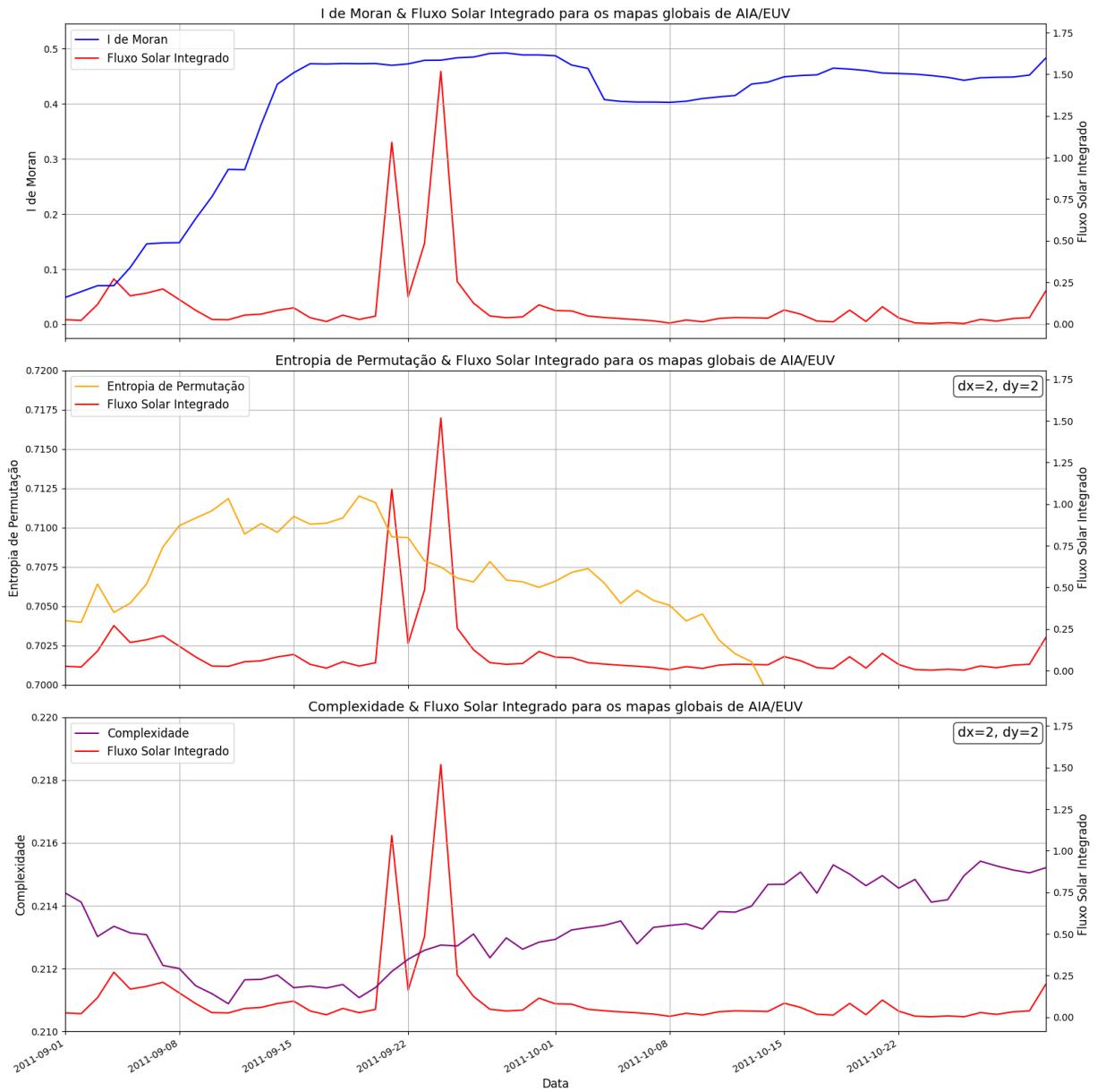


Figura 4.3: Auto-correlação espacial e Complexidade-Entropia do período de alta emissão de *flares* em Agosto de 2011, os *flares* emitidos chegaram a variar de grau X1.3 a X1.9.

Capítulo 5

Conclusão e perspectivas futuras

Através do cálculo da auto-correlação espacial e do estudo da complexidade-entropia da superfície do Sol foi possível compreender como a formação de estruturas e suas correlações de longo alcance estão relacionadas com a atividade magnética solar. Além disso, pode-se obter bons candidatos a sinais de alertas antecipados da atividade solar que se mostram promissores para melhorar o cenário atual de previsão de eventos explosivos no Sol.

O índice MI para os mapas globais da coroa solar demonstrou-se o mais promissor para servir como um sinal de alerta antecipado, podendo anteceder os aumentos de atividade magnética em semanas, um ótimo resultado quando comparado aos métodos atuais, que conseguem prever emissões em apenas poucos dias de antecedência (Dikpati e McIntosh, 2020). Ademais, para os mapas sinóticos, o índice MI exibe uma boa correlação com a atividade magnética solar, servindo como um sinal de alerta antecipado para períodos de mínima de atividade solar.

Os resultados para a entropia de permutação e a complexidade estatística para os mapas sinóticos de MDI/HMI também apresentaram uma boa correlação com a atividade magnética solar. Apesar de possuírem uma variação menor entre dias em comparação ao índice MI, que é mais sensível, a complexidade-entropia conseguiu antecipar o período de mínima atividade solar em rotações de Carrington anteriores ao início da queda correspondente do índice MI. De forma semelhante, para os mapas globais de AIA/EUVI a complexidade-entropia demonstra uma correlação entre a formação de estruturas e períodos de alta atividade solar, apesar de novamente apresentar uma variação menor entre dias quando comparado ao índice MI. Segundo Tirabassi e Masoller (2023), os métodos propõem indicações complementares da aproximação de um período de transição.

As perspectivas futuras para este trabalho são:

- Ampliar o estudo para os dados de 720s do HMI, que captura de forma síncrona a face do Sol visível da Terra a cada 720s;
- Testar métodos diferentes de entropia como a q-entropia de Tsallis (Ribeiro et al., 2017);
- Estudar e executar simulações do campo magnético solar utilizando métodos de aprendizado de máquina, como o *Physics Informed Neural Network* (PINN);
- Organizar o trabalho feito até agora em formato de artigo.

Referências Bibliográficas

- Boers N., Goswami B., Rheinwalt A., Bookhagen B., Hoskins B., Kurths J., Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections, *Nature*, 2019, vol. 566, p. 373–377
- Charbonneau P., Solar Dynamo Theory, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2014, vol. 52, p. 251–290
- Dakos V., van Nes E. H., D’Odorico P., Scheffer M., Robustness of variance and autocorrelation as indicators of critical slowing down, *Ecology*, 2012, vol. 93, p. 264–271
- Dikpati M., McIntosh S. W., Space Weather Challenge and Forecasting Implications of Rossby Waves, *Space Weather*, 2020, vol. 18, p. e2018SW002109
- Kéfi S., Guttal V., Brock W. A., Carpenter S. R., Ellison A. M., Livina V. N., Seekell D. A., Scheffer M., Nes E. H. v., Dakos V., Early Warning Signals of Ecological Transitions: Methods for Spatial Patterns, *PLOS ONE*, 2014, vol. 9, p. e92097
- McIntosh S. W., Cramer W. J., Pichardo Marcano M., Leamon R. J., The detection of Rossby-like waves on the Sun, *Nature Astronomy*, 2017, vol. 1, p. 0086
- Moraga P., Spatial statistics for data science: theory and practice with R first edition edn. Chapman and Hall/CRC Data Science Series, CRC Press Boca Raton London New York, 2024
- Moran P. A. P., Notes on Continuous Stochastic Phenomena, *Biometrika*, 1950, vol. 37, p. 17–23

Pessa A. A. B., Ribeiro H. V., ordpy: A Python package for data analysis with permutation entropy and ordinal network methods, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2021, vol. 31, p. 063110

Rey S. J., Anselin L., PySAL: A Python Library of Spatial Analytical Methods, *The Review of Regional Studies*, 2007, vol. 37, p. 5

Ribeiro H. V., Jauregui M., Zunino L., Lenzi E. K., Characterizing Time Series via Complexity-Entropy Curves, *Physical Review E*, 2017, vol. 95, p. 062106

Ribeiro H. V., Zunino L., Lenzi E. K., Santoro P. A., Mendes R. S., Complexity-Entropy Causality Plane as a Complexity Measure for Two-dimensional Patterns, *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, p. e40689

Rosso O. A., Distinguishing Noise from Chaos, *Physical Review Letters*, 2007, vol. 99

Scheffer M., Bascompte J., Brock W. A., Brovkin V., Carpenter S. R., Dakos V., Held H., van Nes E. H., Rietkerk M., Sugihara G., Early-warning signals for critical transitions, *Nature*, 2009, vol. 461, p. 53–59

Suess S. T., Tsurutani B. T., , 2015 SOLAR SYSTEM/SUN, ATMOSPHERES, EVOLUTION OF ATMOSPHERES — Solar Winds. Academic Press Oxford p. 189–194

Thomas J. H., Weiss N. O., Sunspots and Starspots 1 edn. Cambridge University Press, 2008

Tirabassi G., Masoller C., Entropy-based early detection of critical transitions in spatial vegetation fields, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, vol. 120, p. e2215667120

Usoskin I. G., A history of solar activity over millennia, *Living Reviews in Solar Physics*, 2023, vol. 20, p. 2