



Ministério da Ciência e Tecnologia
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS
ESPACIAIS

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA/PIBIC/CNPq

PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA:

INVESTIGAÇÃO DE FENÔMENOS SOLARES ENERGÉTICOS E
DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS PARA PREVISÃO DE SUA
OCORRÊNCIA

BOLSISTA:

Roberta Camilly Freitas de Carvalho

ORIENTADOR:

Dr. José Roberto Cecatto

PERÍODO: 01/09/23 - 31/08/24

FÍSICA DO MEIO INTERPLANETÁRIO – FMI
DIVISÃO DE ASTROFÍSICA – DIDAS
COORDENAÇÃO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS / ATMOSFÉRICAS - CGCEA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE

São José dos Campos

2024

AGRADECIMENTO

Professor Dr. José Roberto Cecatto, agradeço pela oportunidade de estar me orientando no processo de desenvolvimento deste trabalho, estando sempre presente: orientando e auxiliando.

Ao INPE pela oportunidade e condições oferecidas para a realização deste projeto, com o professor orientador.

Ao CNPq pela bolsa PIBIC concedida.

Gratidão pelo apoio que a minha mãe, Denise Suely de Freitas me proporciona com todas as dificuldades.

INVESTIGAÇÃO DE FENÔMENOS SOLARES ENERGÉTICOS E DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA PREVISÃO DE SUA OCORRÊNCIA

RESUMO

As explosões – “flares” – solares são fenômenos energéticos gerados nas chamadas regiões ativas, localizadas na alta cromosfera / baixa coroa, e que se caracterizam por valores elevados de temperatura e densidade, relativamente à atmosfera solar circundante, e campos magnéticos intensos (centenas a poucos milhares de Gauss) na forma de arcos magnetizados. Esses fenômenos correspondem à liberação repentina de uma grande quantidade de energia ($10^{24} - 10^{32}$ erg) que se manifesta na forma de aquecimento do plasma e energização de partículas. O plasma aquecido se torna mais brilhante e as partículas energizadas formam feixes que se propagam pelos arcos magnéticos produzindo radiação eletromagnética de amplo espectro (desde ondas de rádio a raios-X e gama), que quando no ambiente terrestre, pode afetar serviços/sistemas tecnológicos causando por exemplo blecaute nas comunicações de rádio e perturbação dos sinais de GPS, entre outros efeitos. O fenômeno é detectado apenas quando já se encontra no ambiente terrestre, e assim não existe tempo suficiente para a tomada de qualquer medida protetiva dos serviços / sistemas tecnológicos. Sendo assim, com o objetivo de evitar ou minimizar os efeitos que esses fenômenos causam é necessário prever sua ocorrência com antecipação suficiente – 1-2 dias. Com o intuito de desenvolver um método que auxilie na previsão desse fenômeno, estamos realizando um levantamento de parâmetros e índices solares de forma a gerar um modelo empírico de previsão. Os resultados para os ciclo de atividade solar 23 (1996-2008) foram os seguintes: nível base do fluxo de raios-X (1-8 Angstrom) de 1×10^{-7} W/m² e 2×10^{-7} W/m² para ocorrência de eventos M e X, respectivamente; e nível base de densidade de fluxo de rádio (10.7 cm) de 74 UFS (Unidade de Fluxo Solar = 1×10^{-22} W/m².Hz) e 90 UFS para ocorrência de eventos M e X, respectivamente.

Palavras-chave: Sol, Explosões solares, Previsão.

¹ Aluno (a) do curso de bacharelado em engenharia física - **E-mail:** ² Pesquisador (a) do INPE - **E-mail:** jr.ceccatto@inpe.br

Lista de figuras

Figura 1 - Explosão solar EUV (SDO/AIA 131 A). Fonte: Space weather (Maio, 2024)	6
Figura 2 - Foto de uma mancha solar tirada em 1º de julho de 2010 pelo New Solar Telescope do Observatório Solar de Big Bear, na Califórnia, EUA. Fonte: Adriano Valio (2022)	8
Figura 3 - Foto dos arcos magnéticos observados pelo satélite Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) na linha de ultravioleta de 171 Å são estruturas magnéticas presentes na coroa solar. Esses arcos são m.visíveis devido à emissão de luz ultravioleta produzida pelo plasma aquecido presente nas regiões onde os campos magnéticos se curva	8
Figura 4 - Arcos magnéticos de uma região ativa (AR) observados na cromosfera/corona. FONTE: TRACE/NASA	10
Figura 5 - Dados sobre o fluxo de raios-x da GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)	12
Figura 6 - Valor de fluxo de rádio para os eventos M e X. Fonte: (Autor).....	15

SUMÁRIO

1. Introdução

2. Material e Metodologia

3. Resultados preliminares

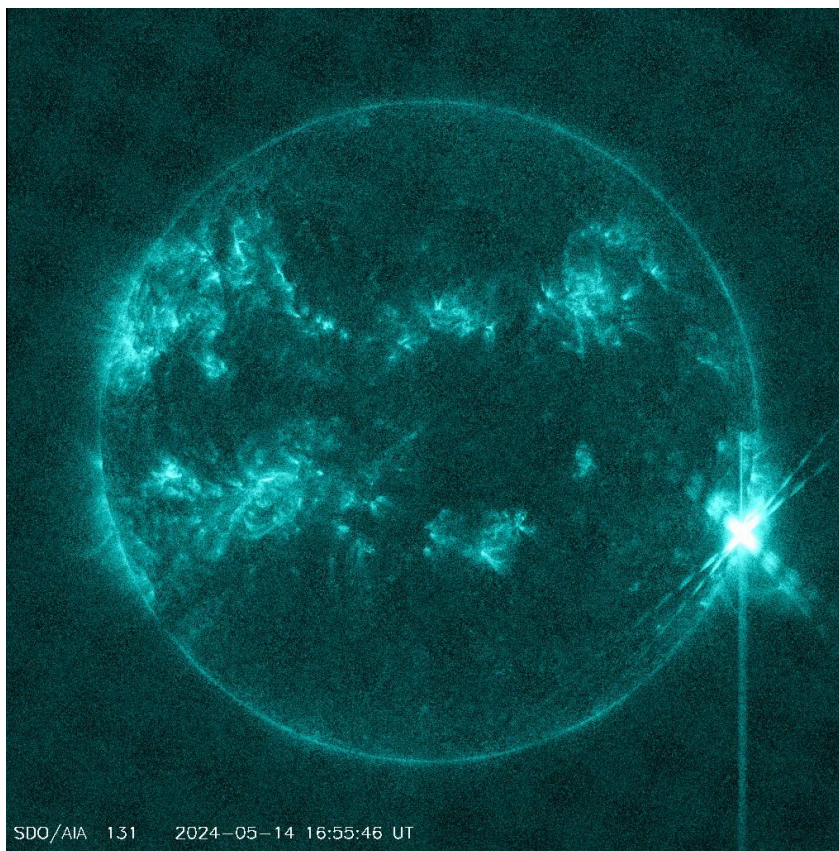
4. Conclusão

Referências

1. Introdução

O Sol é a principal fonte de energia para o planeta Terra, emitindo energia na forma de radiação eletromagnética em amplo espectro (rádio a raios - X / gama). Por estar relativamente próximo da Terra, há milhares de anos o homem já identificava as principais características do Sol, como por exemplo as manchas solares. Como é conhecido, durante a fase de máximo do ciclo também cresce a ocorrência de fenômenos energéticos, principalmente os “flares” ou explosões solares. Um exemplo é mostrado na figura 1.

Fig. 1- Explosão solar EUV (SDO/AIA 131 A)

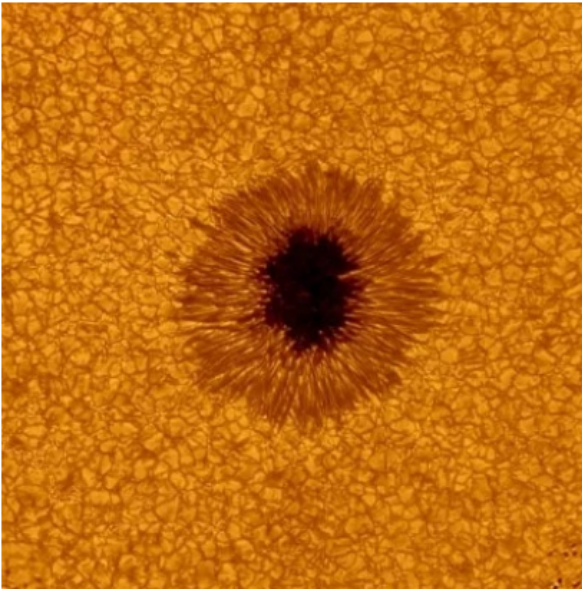


Fonte: Space weather (Maio, 2024)

As explosões solares foram descobertas em 1º de setembro de 1859, por R. C. Carrington e R. Hodgson, quando eles observavam grupos de manchas solares na luz visível. A energia cinética liberada no “flare” tem origem da reconexão magnética que ocorre em uma região ativa na atmosfera solar. Uma fração das regiões ativas presentes no Sol apresenta um caráter dinâmico que gera o estiramento e a torção das linhas de campo de seus arcos magnéticos armazenando energia no campo. Eventualmente, também pode ocorrer cisalhamento e a reconexão de linhas de campo magnético da região ativa, o que libera a energia armazenada causando o “flare” ou explosão solar. Toda essa energia liberada provoca o aquecimento do gás e aceleração de feixes de partículas energizadas. A interação dessas partículas com o ambiente da região ativa gera radiação eletromagnética de amplo espectro desde ondas de rádio quilométricas a raios - X e raios-gama.

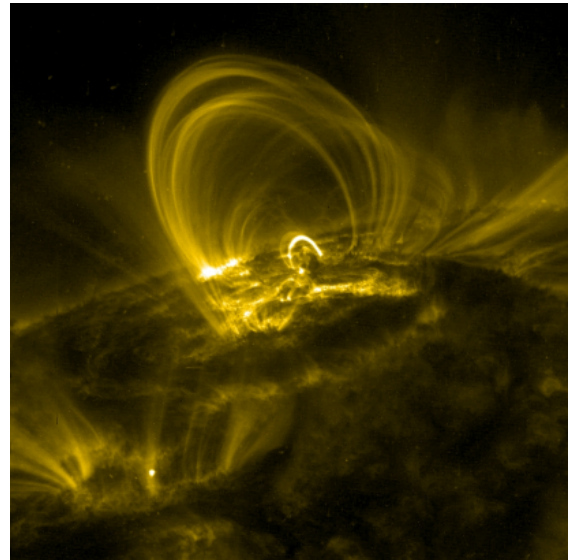
O ciclo de atividade solar tem duração média de 11 anos. E se caracteriza pela variação correlacionada dos seguintes parâmetros: irradiância total, número de manchas solares e grupos de manchas, fluxo da emissão rádio em 10.7cm e número de “flares”. O Sol é uma estrela que produz campos magnéticos através da operação de dínamos no interior, o campo produzido é transportado até a fotosfera onde sua presença é notada na forma de manchas solares (Gudel, 2017). As manchas solares tratam-se de regiões onde o campo magnético é intenso, o que inibe o transporte de energia do interior do envelope convectivo até a fotosfera, e isso gera uma temperatura bem mais baixa e assim um brilho bem menor do gás nesses locais. Por esse motivo apresentam aparência escura na fotosfera como ilustrado na figura 1 e a figura 2 mostra um exemplo de arco magnético de uma região ativa da atmosfera solar (alta cromosfera/baixa coroa) associada a grupos de manchas solares observado na fotosfera. No início de um ciclo - logo após um mínimo - as manchas surgem em latitudes moderadas (30-40 graus). Isso caracteriza o período de Sol ativo. Conforme o ciclo segue até o máximo, as manchas gradualmente passam a ocorrer em grupos e crescer em número e área, e se apresentam em latitudes mais próximas ao equador solar. A partir do máximo gradualmente a frequência de ocorrência das manchas, e dos fenômenos correlacionados, diminui nos anos seguintes até desaparecer por completo no próximo mínimo do ciclo de atividade solar, o que caracteriza o Sol calmo.

Fig. 1 - Foto de uma mancha solar tirada em 1º de julho de 2010 pelo New Solar Telescope do Observatório Solar de Big Bear, na Califórnia, EUA.



Fonte: Adriano Valio (2022)

Fig. 2 - Foto dos arcos magnéticos observados pelo satélite Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) na linha de ultravioleta de 171 Å são estruturas magnéticas presentes na coroa solar. Esses arcos são m.visíveis devido à emissão de luz ultravioleta produzida pelo plasma aquecido presente nas regiões onde os campos magnéticos se curva.



Fonte: Adriano Valio (2022)

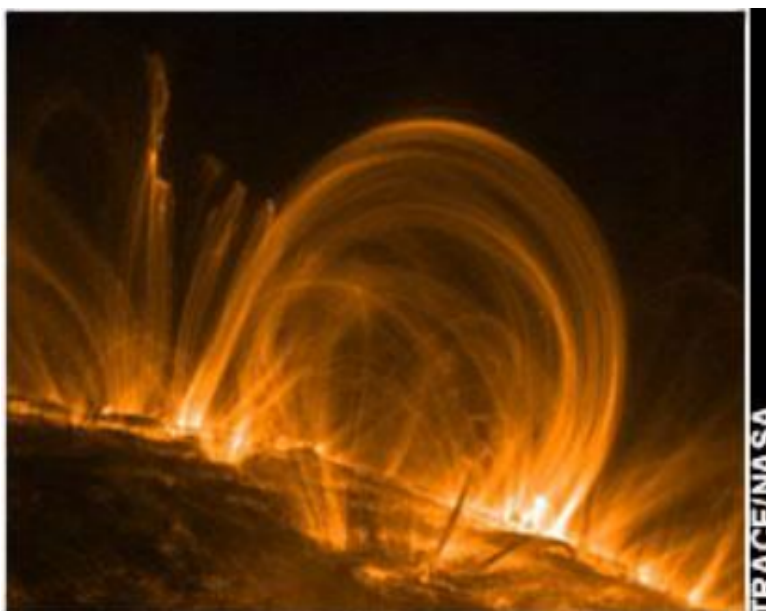
A configuração de um arco magnético pode variar desde um arco único a um conjunto de arcos não alinhados e muito complexos. Um dos modelos mais simples encontrados na literatura é o das linhas de campo magnético na forma de arcos devido a um dipolo magnético profundo na atmosfera, como está sendo ilustrado na Figura 3. Estão associados a grupos de manchas solares observados na fotosfera. Neste tipo de configuração, temos então duas regiões que destacamos: o topo do Arco e a base do Arco, onde a densidade no topo do arco será menor e na base será maior. Além disso, o gás mais quente e denso do que a atmosfera das vizinhanças se apresenta brilhante, evidenciando as linhas do campo magnético da região ativa.

Esses arcos costumam ser chamados de regiões ativas e com o avanço do ciclo de atividade em direção ao máximo uma boa fração deles apresenta configuração magnética complexa e de caráter dinâmico o que provoca o armazenamento de energia no campo. Devido a essa dinâmica e complexidade, eventualmente pode ocorrer cisalhamento e a reconexão magnética, com simplificação da configuração magnética da RA, e a consequente liberação da energia armazenada. No início da fase ascendente, passando pelo máximo, até a fase de

decaimento, são observados os “flares” de moderada (classe M) e grande ou extrema (classe X) instensidades. Esses fenômenos se apresentam como uma liberação repentina, rápida e intensa de grande quantidade (10^{24} - 10^{32} erg; típico 10^{27} erg) de energia magnética, observada em uma região ativa. No momento em que isso ocorre temos a explosão (“flare”) solar, a qual se manifesta no aquecimento do gás e aceleração de feixes de partículas. A interação desses feixes de partículas com o meio circundante gera uma explosão de radiação eletromagnética de amplo espectro (desde rádio a RX e raios-gama).

Essa radiação, leva 8 minutos para atingir a Terra e causa efeitos como, a perturbações ou interrupções em serviços / sistemas tecnológicos terrestres. E, dependendo do caso, até riscos aos seres humanos. A detecção das explosões solares por instrumentos em órbita terrestre, embora crucial para a compreensão desses eventos, apresenta uma limitação. Devido à distância entre o Sol e a Terra, a radiação emitida durante um flare leva cerca de 8 minutos para chegar ao nosso planeta. Conseqüentemente, os detectores, mesmo operando na banda de alta energia de 1-8 Angstroms, registram o evento apenas após seus efeitos já estarem causando varios impactos no ambiente terrestre. Essa defasagem temporal resulta em um cenário onde ocorrem o aquecimento da alta atmosfera, o aumento da ionização da ionosfera e as subsequentes perturbações em sistemas de comunicação e navegação de GPS.

Fig. 4 - Arcos magnéticos de uma região ativa (AR) observados na cromosfera/corona.



FONTE: TRACE/NASA

Para minimizar os impactos desses eventos, busco desenvolver um modelo empírico que utiliza dados históricos de junho de 1996 a dezembro de 2008 do satélite GOES e índices de atividade solar para auxiliar na previsão da ocorrência de "flares" com alguma antecedência. Os resultados preliminares obtidos, mostram para classe de eventos M e X o fluxo dos níveis base de raios-X (GOES 1-8 Å) $1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ e $2 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$. Os mesmos eventos são observados apenas para níveis base da densidade de fluxo rádio (10.7cm) integrada de $74 \times 10^{-22} \text{ W.Hz}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ e $90 \times 10^{-22} \text{ W.Hz}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. Esse levantamento revelou a ocorrência de 54 flares classe X e 780 classe M durante o período mencionado acima. Visando prevenir os impactos desses eventos, estamos em busca de desenvolvendo um modelo empírico que utiliza dados históricos do satélite GOES e índices de atividade solar, com o objetivo de determinar o evento mais intenso das classes M e/ou X que pode ser produzido pelo Sol num dado dia do ciclo de atividade. Na seção seguinte, apresentamos os resultados preliminares desse levantamento, obtidos junto às bases de dados de atividade solar desde o início deste trabalho, em Junho de 2023. No entanto, é importante ressaltar que esses resultados ainda são preliminares e que planejamos expandir nossa análise para o ciclo solar 24.

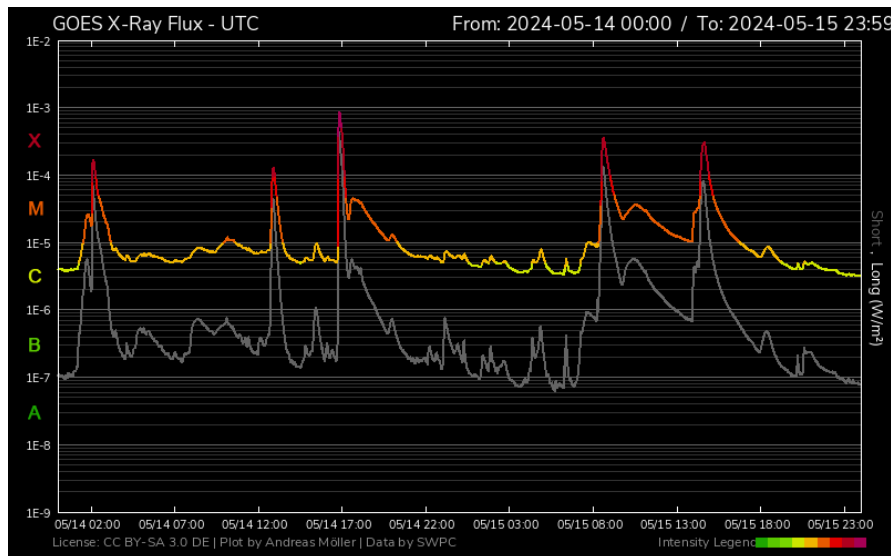
Devido aos impactos, o objetivo deste projeto é desenvolver um método para detectar com antecedência a ocorrência da explosão / "flare" solar, através da análise de dados sobre sua origem e as principais características, com o intuito de permitir ações preventivas ou mitigantes. A detecção antecipada de explosões solares é de extrema importância devido aos seus potenciais efeitos danosos. Ao detectá-las com antecedência, é possível tomar medidas de segurança e evitar rupturas nos sistemas, bem como minimizar os impactos negativos para a sociedade como um todo.

2. Material e Metodologia

Para realização deste trabalho, iniciado em Junho de 2023, foi necessário pesquisar e fazer um levantamento dos dados, na base de dados da NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, Centro de Ambiente Espacial. Foram consultados os dados diários do fluxo de raios-X (W.m^{-2}) solar registrado, dentro da banda 1-8 Angstrom, pelo detector a bordo do satélite GOES-15. Também foram consultados os dados diários da densidade de fluxo de rádio ($\text{W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$) solar, no comprimento de onda de 10.7 cm, registrados pelo radiotelescópio canadense Penticton, o qual monitora diariamente a densidade de fluxo rádio do Sol. As densidades de fluxo medidas encontram-se em unidades de $10^{-22} \text{W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$ (ou Unidade de Fluxo Solar - UFS).

A intensidade/classe de raios-X, dos "flares" registrados, é classificada de acordo com uma escala logarítmica em décadas do valor do fluxo em 5 classes A, B, C, M e X. A figura 4. mostra o perfil temporal do fluxo de raios-X (1-8 Angstrom) solar de 3 dias - curva vermelha - registrada pelo detector a bordo do satélite GOES-15. No eixo vertical à esquerda estão as intensidades do fluxo de raios-X e as correspondentes classes de intensidade dos "flares" que são registrados. Em ordem crescente de intensidades: A, a mais débil, B, C, M e X, a mais severa ou extrema.

Fig. 5 - Dados sobre o fluxo de raios-x da GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)



Fonte: <https://www.polarlicht-vorhersage.de/goes-archive/>

O interesse deste trabalho é no valor diário dos níveis base tanto do fluxo de raios-X quanto da densidade de fluxo rádio, para aqueles dias em que foram registrados "flares" em raios-X de classes M e/ou X. A partir desse levantamento, esses resultados serão testados e verificados durante o atual ciclo de atividade solar (25), para verificar a viabilidade de seu uso como um índice de previsão do evento diário mais intenso que pode ocorrer. Os resultados obtidos do levantamento diário para o ciclo solar 23 encontram-se na seção seguinte.

3. Resultados preliminares

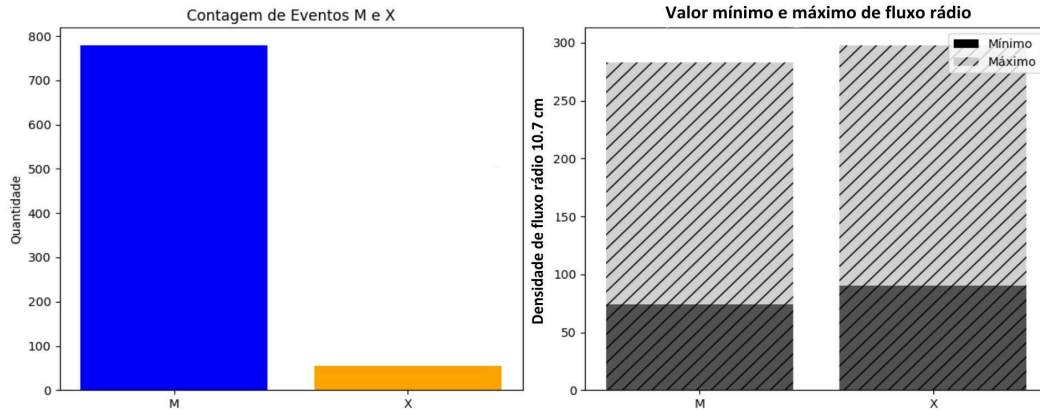
Para realização deste trabalho, iniciado em Junho de 2023, foi necessário pesquisar e fazer um levantamento dos dados, na base de dados da NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, Centro de Ambiente Espacial. Foram realizado um levantamento dos dados diários, para o período de janeiro de 1996 a dezembro de 2008 (ciclo solar 23), da ocorrência de eventos (“flares”) das classes M e X e níveis base tanto do fluxo de raios-X (GOES 1-8 Å) quanto da densidade de fluxo rádio em 10.7 cm para os mesmos dias de ocorrência dos “flares”. levantamento revelou a ocorrência de 54 flares classe X e 780 classe M, como pode ser visto na figura 5. Por sua vez, a tabela 1 apresenta os resultados preliminares obtidos para o período analisado. Os níveis base observados do fluxo de raios-X para ocorrência de eventos classes M e X foram, respectivamente $1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ e $2 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$. Para os mesmos eventos, e correspondentes dias, os níveis base observados da densidade de fluxo rádio (10.7cm) para ocorrência de eventos classes M e X foram, respectivamente $74 \times 10^{-22} \text{ W.Hz}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e $90 \times 10^{-22} \text{ W.Hz}^{-1}.\text{m}^{-2}$. A figura da esquerda apresenta o número de eventos solares das classes M e X durante o período analisado. O gráfico da direita revela que eventos classe X estão associados a valores do nível base da densidade de fluxo de rádio significativamente mais elevados do que aqueles de eventos classe M, como pode ser visto na coluna direita da tabela. A comparação da coluna esquerda da tabela mostra claramente que o nível base do fluxo de raios-X de eventos classe X é cerca do dobro daquele observado para eventos classe M.

Tabela 1 - Nível mínimo base de fluxo de rádio 10.7cm e fluxo de raio-x (1-8 Å) (w/m^2)

Classe de eventos	Fluxo de raio-X (1-8 Å) (w/m^2)	Densidade de fluxo rádio 10.7cm ($\text{w/m}^2/\text{Hz}$)
M	1×10^{-7}	74×10^{-22}
X	2×10^{-7}	90×10^{-22}

Fonte: (Autor)

Fig. 6 - Valor de fluxo de rádio para os eventos M e X



Fonte: (Autor)

4. Conclusão

Com base no levantamento realizado e resultados obtidos, do ciclo solar 23 (1996 a 2008) revelou uma clara predominância de eventos solares de classe M em comparação com eventos de classe X, pois os eventos X são mais raros.

Outros resultados importante foram:

a) Níveis base observados do fluxo de raios-X de 1×10^{-7} W/m² e 2×10^{-7} W/m², respectivamente para ocorrência de eventos classes M e X e;

b) Níveis base observados da densidade de fluxo rádio (10.7cm) de 74×10^{-22} W.Hz-1.m-2 e 90×10^{-22} W.Hz-1.m-2 para ocorrência de eventos classes M e X

Estes resultados observados durante o ciclo solar 23 indicaram claramente que não ocorreu evento classe M para valores do fluxo de raios-X (1-8 Angstrom) abaixo de 1×10^{-7} W/m² e para valores da densidade de fluxo rádio abaixo de 74 UFS. Os resultados também indicaram claramente que durante o ciclo solar 23 não ocorreu evento classe X para valores do fluxo de raios-X (1-8 Angstrom) abaixo de 2×10^{-7} W/m² e para valores da densidade de fluxo rádio abaixo de 90 UFS. Portanto, para o período analisado esses valores podem ser usados como limiares de ocorrência de eventos das classes M e X. E, conseqüentemente podem ser testados para o ciclo solar atual (25) e comparados com os mesmos resultados a serem obtidos para o levantamento que será realizado para o ciclo solar 24, durante o período de renovação da bolsa.

Referências

CECATTO R. J. , Capítulo 4: O Sol, Maio de 2018, INPE.

VALIO ADRIANO, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2022.

GUDEL M. , The Sun in Time: Activity and Environment. Living Reviews in Solar Physics, 2007.

Hathaway, D. H. The Solar Cycle. [on-line]. file:///C:/Users/rober/Downloads/lrsp-2015-4.pdf