

DO SÉCULO XIX À ERA DIGITAL: UM ESTUDO SOBRE OS IMPACTOS POTENCIAIS DAS TEMPESTADES SOLARES NA IONOSFERA E NOS SISTEMAS GLOBAL DE COMUNICAÇÕES

Marco Antonio Saraiva Morais¹, Thiago Pinto Zangerolamo², Francisco Vieira³, Maukers Dias Além⁴

¹Estudante do Curso de Licenciatura em Ciências Biológicas – Campus Araguatins – IFTO. Bolsista do Programa de Iniciação Científica IFTO. e-mail: marco.morais2@ifto.edu.br

²Estudante do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônoma – Campus Araguatins – IFTO. Bolsista do Programa de Iniciação Científica IFTO. e-mail: thiago.zangerolamo@estudante.ifto.edu.br

³Docente do Curso Superior de Licenciatura em Ciências Biológicas e Agronomia – Campus Araguatins – IFTO. Orientador. e-mail: franciscofisico@ifto.edu.br

⁴Docente do Curso Superior de Licenciatura em Ciências Biológicas e Agronomia – Campus Araguatins – IFTO. Orientador. e-mail: mauersdias@ifto.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O sol, estrela central do Sistema Solar oferece condições ideais para a vida de todas as espécies presentes na Terra, localizado a 150 milhões de quilômetros da Terra possui uma natureza ainda questionável, transcendendo seu papel favorável quando ressaltado alguns eventos e fenômenos apontados como imprevisíveis (Valio, 2024). Não sendo só capaz de interagir com a magnetosfera/ionosfera do planeta Terra (com liberações de partículas em forma de energia), o Sol também pode apresentar riscos aos recursos tecnológicos essenciais para vida humana, esses riscos manifestam-se principalmente em condições violentas de ejeções de massa coronal (CMEs), fenômeno esse chamado de tempestades solares ou “solar storms” (Matsuoka *et al.*, 2013).

As CMEs podem atingir a Terra em 2 ou 3 dias (dependendo da intensidade da CME) e ao propagar na direção da Terra com a componente do campo magnético interplanetário (interplanetary magnetic field – IMF) direcionada para o sul ocorre uma reconexão magnética, causando então uma tempestade geomagnética (Ribeiro, 2020). No contexto histórico, muitos registros desde o século XIX até a contemporaneidade demonstram preocupações frente aos incidentes já ocorridos nos sistemas global de comunicações, motivado por falhas generalizadas e interferências críticas na transmissão de ondas de rádio como o memorável Evento Carrington, documentado como um dos maiores eventos solares já registrados até o presente momento (Zancan, 2025).

Em um mundo no qual a sociedade depende integralmente das tecnologias vigentes no cenário atual, estudar os impactos das tempestades solares torna-se imprescindível para evitar situações críticas e futuros riscos que ameaçam a era tecnológica. Nesse sentido, este estudo aponta uma importante reflexão: Se um evento semelhante ao Evento Carrington ocorresse no presente instante, quais seriam as implicações na infraestrutura de comunicação global e quais vulnerabilidades estariam expostas?

2 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo analisar e refletir, de maneira aprofundada, os possíveis efeitos e consequências de um fenômeno solar extremo similar ao Evento Carrington, levando em conta a atual dependência tecnológica na contemporaneidade e a necessidade de estratégias de mitigação,

entendendo como a ionosfera responderia a esse tipo de perturbação atualmente e quais seriam os efeitos diretos e indiretos nos sistemas globais de comunicação e navegação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho tem como ênfase uma abordagem histórico-descritivo, embasado na revisão literatura tanto de trabalhos científicos já elaborados por outros autores quanto de relatórios e fontes de notícias relevantes alinhadas aos principais eventos de tempestades solares já registrados ao longo dos séculos e como escalas semelhantes ao Evento Carrington afetaria na atualidade, além da compreensão desses fenômenos sobre a ionosfera e suas consequências para os sistemas de comunicação no aspecto global com a reunião e sistematização de informações provenientes de diferentes períodos históricos, a fim de demonstrar a relação entre os fenômenos solares intensos, as alterações ionosféricas e os episódios de falhas ou interferências nas comunicações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na atmosfera terrestre, a ionosfera é localizada em torno de 60 a 1000 quilômetros de altitude, cuja camada possui um papel fundamental na interação das ondas de rádio. É importante ressaltar que essa dependência indireta é decorrida pelo fato da camada presente ser a principal responsável pela propagação das ondas, ou seja, funcionando como um espelho natural. A camada é formada principalmente pela influência da radiação ultravioleta e raios-X, processo esse chamado de fotoionização (Matsuoka *et al.*, 2013). Tecnologias como redes de telecomunicações, satélites, e até mesmo GPS utilizam as ondas de rádio para executarem suas devidas funções de forma eficiente, por consequência, as tempestades solares permanecem sendo uma ameaça, embora registradas em escalas menores em comparação ao Evento Carrington ao longo das décadas (Zhang *et al.*, 2024).

O ocorrido do dia 1 a 2 de setembro de 1859 conhecido como Evento Carrington levantou uma das mais importantes discussões para a comunidade científica em relação a atividade solar sobre a ionosfera e os sistemas de comunicação da época, no qual revelou-se magnitudes extremas de tempestades solares, por consequência, os sistemas telegráficos em todo o globo sofreram impactos alarmantes e uma série de falhas na eletricidade com liberação de faíscas, fogo nas linhas de transmissão elétricas, aparelhos danificados e auroras coloridas e brilhantes persistiram por várias horas até mesmo em regiões tropicais (Valio, 2024).

O Incidente de Québec em 1989 e a conhecida Tempestade Halloween no ano de 2003 foram outros eventos solares nos quais provocaram interrupções em comunicações via rádio e falhas em comunicações por satélites, motivado por distúrbios ionosféricos em larga escala e visualmente marcado por expansões de auroras boreais em baixas latitudes (Zhang *et al.*, 2024).

Conforme apontado pela Equipe Editorial NASA Science (2014), uma ejeção de massa coronal (CMEs) que passou pela órbita da Terra registrada no ano de 2012 seria marcado como o episódio em maior escala semelhante ao Evento Carrington caso tivesse atingido diretamente o planeta, servindo como alerta e reacendendo a importância de mais discussões acerca da situação e uma análise mais assídua das políticas de proteção.

É importante enfatizar que, em um recente contexto, o ano de 2022 teve como notícia a perda de 40 satélites *Starlink* dos 49 lançados pela empresa americana SpaceX em decorrência da passagem de uma tempestade moderada após o lançamento, um prejuízo estimado em 40 milhões de dólares (Freitas, 2022). Dois anos depois, o ciclo solar foi marcado por uma intensa atividade de erupções no qual milhares dos satélites que orbitam a Terra tiveram sua vida útil reduzida no ano de 2024 (G1, 2025). Entre 10 e 15 de maio de 2024, uma supertempestade geomagnética foi registrada como uma das maiores nas duas últimas décadas gerada por uma CME (Fagundes *et al.*, 2025).

Nesse aspecto, evidenciou-se que, se uma tempestade solar em grande escala semelhante ao ocorrido de 1859 atingisse a Terra no presente momento, os danos poderiam tomar uma enorme proporção pela dependência tecnológica de sistemas de comunicações e navegação ser maior comparada ao século XIX. Conforme previsto, as redes elétricas, satélites, Sistema de Posicionamento Global (GPS) e todas as demais tecnologias interconectadas aos exemplos estariam comprometidas pelo mau funcionamento ou inoperantes por longos períodos de tempo, os custos potenciais de todos os danos estariam estimados em 1-2 trilhões de dólares, assim, a modificação drástica na era tecnológica faria a sociedade ser pressionada a buscar novos meios de adaptação ou novas medidas de mitigação (Academia Nacional de Ciências, 2008; Valio, 2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tempestades solares são eventos naturais que podem impactar bastante a tecnologia atual, situação essa difícil de prever com precisão para um preparo adequado dos sistemas elétricos, redes de comunicação e navegação momentos antes da ocorrência de eventos como estes, visto que as tempestades ao interagirem com a camada ionosférica da Terra podem causar sérios problemas e prejuízos estimados em trilhões de dólares, o que tornam-se necessários investimentos em mecanismos de prevenção os quais mostraram ser menos custosos em comparação aos custos em reparos causados por uma única tempestade solar. Eventos passados como o Evento Carrington e entre outros eventos relatados evidenciam o poder destrutivo de fenômenos como esses. Embora existam mecanismos complexos de mitigação, a limitação dos sistemas de proteção presentes além da dependência da tecnologia global a tornam vulnerável a tempestades solares significativas. Por isso, é fundamental a existência de um monitoramento, pesquisas contínuas e um planejamento cuidadoso para diminuição dos impactos no futuro.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq e ao IFTO pelo fomento e apoio na execução do projeto que viabilizou a realização desta pesquisa, bem como pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, além de estendermos nosso agradecimento aos professores e orientadores Dr. Francisco Vieira e Dr. Maukers Dias Além pelas contribuições no aprendizado e incentivo contínuo, tornando esses fatores essenciais durante o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

FAGUNDES, P. R. et al. Equatorial Ionization anomaly disturbances (EIA) triggered by the May 2024 solar Coronal Mass Ejection (CME): The strongest geomagnetic superstorm in the last two decades. **Advances in Space Research**, 2025.

FREITAS, F. **Starlink do Elon Musk perde cerca de 40 satélites devido tempestade magnética.** Mundo Conectado, 2022. Disponível em: <https://www.mundoconectado.com.br/ciencia/starlink-do-elon-musk-perde-cerca-de-40-satelites-devido-tempestade-magnetica/>. Acesso em: 08 jul. 2025.

G1. **Ameaça inesperada afeta milhares de satélites Starlink de Musk.** 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/inovacao/noticia/2025/06/04/ameaca-inesperada-afeta-satelites-starlink-de-elon-musk.ghtml>. Acesso em: 16 jul. 2025.

MATSUOKA, Marcelo Tomio et al. Impacto de tempestade geomagnética na ionosfera e no posicionamento com GNSS: estudo de caso para 20 de novembro de 2003 na região brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, p. 14-33, 2013.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. **Severe Space Weather Events: Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report.** National Research Council. Washington, DC. ISBN: 978-0-309-12769-1. 2008.

NASA Science Editorial Team. **Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012.** NASA, 2014. Disponível em: https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/23jul_superstorm/. Acesso em 10 jul. 2025.

RIBEIRO, B. A. G, **Estudo do sistema ionosfera-termosfera durante eventos extremos de clima espacial (tempestades geomagnéticas), no decorrer da fase descendente do ciclo solar 24 (2013, 2015 e 2017).** Tese (Doutorado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2020.

VALIO, Adriana. Sob a influência do Sol: como o clima espacial afeta nosso planeta. **Cadernos de Astronomia**, v. 5, n. 2, p. 30-45, 2024.

ZANCAN, E. **Explosão solar desta semana reacende alerta: tempestades solares podem paralisar o mundo?.** COSTA NORTE, 2025. Disponível em: <https://costanorte.com.br/meio-ambiente/explosao-solar-desta-semana-reacende-alerta-tempestades-solares-podem-paralisar-o-mundo.html>. Acesso em: 10 jul. 2025.

ZHANG, Jie. *et al.* **Properties of Solar and Interplanetary Drivers of Gannon Superstorm in May 2024.** p. SH11G-2873. In: AGU Fall Meeting Abstracts. 2024.