



Uma andorinha só não faz verão: 160 anos do legado de Richard Carrington

One swallow does not make a summer: 160 years of Richard Carrington's legacy

D. M. Oliveira*^{1,2}

¹NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, USA

²University of Maryland Baltimore County, Goddard Planetary Heliophysics Institute, Baltimore, USA

Recebido em 16 de Agosto de 2019. Revisado em 20 de Setembro de 2019. Aceito em 26 de Setembro de 2019

No dia 1º de setembro de 1859, o astrônomo britânico Richard Carrington observou um comportamento anômalo no Sol. Aproximadamente 17 horas depois, efeitos magnéticos de escalas globais foram observados na Terra: auroras boreais e austrais em regiões de baixas latitudes, e falhas em equipamentos telegráficos na Europa e América do Norte. Hoje, 160 anos depois, sabemos que essa conexão solar-terrestre controla a atividade magnética no espaço próximo da Terra e sua superfície, e seus efeitos são objetos de uma disciplina denominada *clima espacial*. O objetivo principal deste modesto trabalho é apresentar brevemente ao leitor as observações de Carrington e as descobertas que levaram à conexão entre fenômenos magnéticos solares e terrestres. Também são brevemente discutidas as implicações desta descoberta ao clima espacial com ênfase na importância da proteção de aparelhos tecnológicos presentes no geoespaço e no solo, além de uma breve discussão do futuro da disciplina nas próximas décadas.

Palavras-chave: Evento de Carrington, Interações Sol-Terra, Clima espacial.

On 1 September 1859, the British astronomer Richard Carrington observed an anomalous behavior on the Sun. Approximately 17 hours later, magnetic effects of global scales were observed at Earth: aurora borealis and australis in low-latitude regions, and telegraphic equipment failures in Europe and North America. Nowadays, 160 years later, we know that solar-terrestrial connections control the magnetic activity in the geospace and on the ground, and their effects are subject of a discipline named *space weather*. The main goal of this modest work is to briefly present to the reader Carrington's observations and the discoveries that led to the connection between solar and terrestrial magnetic phenomena. Implications of this discovery to space weather with emphasis on the protection of technological systems in the geospace and on the ground, and a brief discussion on the future of the discipline, are briefly presented as well.

Keywords: Carrington's event, Solar-terrestrial interactions, Space weather.

1. O astrônomo Richard Carrington

Richard Christopher Carrington (1826-1875) foi um astrônomo britânico amador interessado em observações solares. Carrington observava diariamente a dinâmica da superfície solar, tomando notas e armazenando dados em detalhes minuciosos. Com o resultado de sua análise de manchas solares [1–3] ele descobriu que tais manchas executam movimentos latitudinais e a contagem destas apresenta números máximos com períodos de aproximadamente 11 anos, o que ficou posteriormente conhecido como ciclo de atividade solar, ou simplesmente ciclo solar. Infelizmente, devido a problemas pessoais e familiares, Carrington não teve a oportunidade de publicar seu trabalho e apresentar seus resultados. A descoberta do ciclo solar é creditada ao astrônomo alemão Gustav Spörer (1822-1895), que executou suas observações independentemente de Carrington. Spörer também descobriu a lei

que leva seu nome, que consiste na observação do aparecimento de novas manchas solares em extensões latitudinais do equador solar, entre 30° e 40° dos dois hemisférios, que diminuem com o avanço do ciclo solar [1, 3, 4]. Devido a sua forma peculiar, os gráficos dos resultados dessas observações são denominados diagramas borboletas [5, 6]. Entretanto, tal fenômeno foi primeiramente observado por Carrington. O livro de Stuart Clark conta a história dos fatos que culminaram na tragédia que consistiu a vida de Richard Carrington [7].

Em geral, Richard Carrington não é conhecido na comunidade científica atual somente pelo não reconhecimento de seus trabalhos em sua época, mas também é conhecido por ser o primeiro a observar claramente uma erupção solar e associá-la, de maneira cuidadosa, a fenômenos magnéticos terrestres. Curiosamente, o evento de Carrington, como é conhecido hoje, não é somente a primeira erupção solar a ser observada, mas é também a erupção solar com as consequências mais intensas ao

*Endereço de correspondência: dennymauricio@gmail.com.

ambiente terrestre observadas e registradas na história. O objetivo deste trabalho é revisar as descobertas que levaram à conexão entre as atividades magnéticas solar e terrestre, e reconhecer a importância do evento de Carrington no avanço do entendimento desta conexão e seu impacto na disciplina denominada clima espacial.

2. Conexões entre efeitos magnéticos solares e terrestres são estabelecidas

As manchas solares foram descobertas por Galileu Galilei (1564-1642) através de observações por telescópios no início do século XVII [8]. Entretanto, houve pouco progresso nas observações de manchas solares no século seguinte, com exceção às observações do astrônomo britânico Alexander Wilson (1714-1786) que associou as manchas solares¹ a “buracos” na superfície do sol [9]. Existem dados de manchas solares colhidos durante o século XVIII, mas estes dados não são confiáveis devido sua esporadicidade e métodos imprecisos utilizados em sua coleta [1, 3, 10].

O estudo de manchas solares teve um impulso considerável graças ao trabalho do farmacólogo alemão Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875), cujos resultados foram divulgados na revista *Astronomische Nachrichten* [11], uma das primeiras revistas científicas dedicadas à astronomia. Em seu trabalho, Schwabe identificou um ciclo de 10 anos associado ao número de manchas solares. Após refinadas observações executadas por Rudolf Wolfe (1816-1893), o período do ciclo solar foi corrigido para o valor mais realístico de 11 anos [12, 13], que consiste na alternância entre dois máximos ou mínimos consecutivos. O trabalho de Schwabe ganhou importância após ser popularizado pelo famoso cientista alemão Alexander von Humboldt em seu livro *Cosmos* [14].

O astrônomo e militar britânico Edward Sabine (1788-1883) teve um papel importante na execução das Cruzadas Magnéticas, financiadas pela Coroa Britânica na tentativa de estudar o campo magnético terrestre [15]. Por volta do início do século XIX, era amplamente conhecido que o campo magnético da Terra era altamente variável, e tais variações interferiam na orientação de agulhas magnéticas, produzindo, por exemplo, grande impacto nos instrumentos de navegação [7, 13, 15]. Ao analisar esses dados, Sabine descobriu que as variações magnéticas associadas com movimentos de agulhas magnéticas coincidiam estritamente com os números de manchas solares descobertos por Schwabe e refinados por Wolfe [16]. Como resultado, uma eventual conexão entre fenômenos solares e magnetismo terrestre foi claramente identificada pela primeira vez na história da física solar.

¹Hoje, sabemos que manchas solares são regiões de temperaturas superficiais reduzidas relativamente ao seu entorno, causadas por fluxos magnéticos intensos, que inibem o processo de convecção de plasma (por isso o caráter escuro das manchas). Explosões solares ocorrem devido a um processo denominado *reconexão magnética* que por sua vez lançam grandes quantidades do plasma solar com energia cinética intensa no espaço interplanetário [5].

Entretanto, uma andorinha solitária era necessária para anunciar a chegada do verão.

No dia 1º de setembro de 1859, Carrington observava o Sol com seu telescópio em sua casa, na cidade de Redhill, nos subúrbios de Londres, quando percebeu uma atividade diferente na superfície solar. Carrington observou uma emissão solar extremamente brilhante que hoje é denominada erupção solar. Maravilhado por sua observação e na ânsia de encontrar uma outra pessoa para observar e testemunhar o fenômeno, Carrington deixou seu laboratório momentaneamente. Quando voltou, para sua “mortificação”, o clarão havia desaparecido. Graças as suas habilidades observacionais, Carrington desenhou suas observações e enviou uma discussão dos resultados à revista *Monthly Notes of the Astronomical Society*, publicado em novembro de 1859 [17].

O desenho publicado por Carrington é mostrado na Fig. 1. A descrição do evento, assim como da figura, é traduzida abaixo diretamente do artigo de Carrington [17] (três pontos entre colchetes indicam texto omitido pelo autor e textos entre colchetes foram adicionados pelo autor):

“Enquanto trabalhava na manhã de terça-feira, 1º de setembro [de 1859], durante minhas observações costumeiras da forma e das posições das manchas solares, eu presenciei uma aparição a qual acredito ser extremamente rara. A imagem do disco do Sol era, como sempre, projetada por mim [...] para produzir uma fotografia de aproximadamente 11 polegadas [27.94 centímetros] de diâmetro. Eu tinha diagramas confiáveis de todos os grupos de manchas solares [...] quando dentro da área do grande grupo ao norte [...] duas áreas intensamente brancas e brilhantes surgiram, nas posições indicadas no diagrama anexado [Fig. 1] pelas letras A e B, e das formas dos espaços deixados em branco. Minha primeira impressão foi que por alguma chance um raio

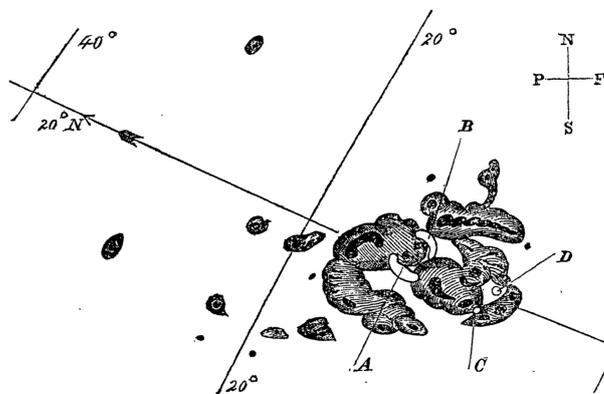


Figura 1: Diagrama esquemático produzido por Carrington mostrando as massivas manchas solares observadas por ele em 1º de setembro de 1859. Extraído da referência [17].

de luz tinha penetrado por um buraco na tela anexada ao objeto, pelo qual a imagem era direcionada à sombra, pois a luminosidade era muito semelhante à luz solar direta; mas, [...] eu presenciei um fenômeno muito diferente. Então eu anotei a hora prontamente pelo cronômetro, e vi a explosão aumentar rapidamente, [...], eu apressadamente corri para buscar alguém para testemunhar a exibição comigo, mas retornando dentro de 60 segundos, eu fui mortificado ao encontrar que [o clarão] tinha mudado e enfraquecido. Muito brevemente depois os últimos traços se foram, e embora eu tenha permanecido assistindo [o aparato] estritamente por aproximadamente 1 hora, nada ocorreu novamente. Os últimos traços ocorreram em C e D, as áreas que viajaram consideravelmente das suas primeiras posições e desaparecendo como dois pontos brilhantes de luz branca. A hora da primeira explosão não foi diferente de 11 h:18 min, hora local de Greenwich, e 11 h:23 min foi anotada como a hora do desaparecimento.”

De acordo com seu relato, Carrington observou a erupção solar entre 11 h:18 min e 11 h:23 min do dia 1º de setembro de 1859. Balfour Stewart (1828-1887) reportou sobre a ocorrência de uma perturbação magnética moderada registrada pelo observatório de Kew, no sudoeste de Londres, “o mais próximo de 11 h:15 min [hora local de Greenwich] possível” [20]. Esta perturbação é mostrada na Fig. 2. Hoje sabemos que essa perturbação, denominada *crochê*² magnético, é uma perturbação da camada superior ionizada da atmosfera terrestre (isto é, a ionosfera) causada por erupções solares intensas [13]. Coincidentemente, outro astrônomo, Richard Hodgson (1804-1872) [21], também observou, ao norte de Londres, a mesma erupção solar em um intervalo de tempo coincidente com as observações reportadas por Carrington [17].

²Esta perturbação tem esse nome por apresentar, quando representada por um gráfico de série temporal, uma semelhança com uma agulha de *crochê*.

3. A andorinha solitária do verão de 1859

O diagrama da perturbação na componente horizontal do campo magnético terrestre reportada por Stewart (Fig. 2) também mostra uma outra perturbação que ocorreu aproximadamente às 05:00 h (hora local de Greenwich), ou 17.6 h depois do *crochê* magnético. A perturbação foi tão intensa que as medidas atingiram e ultrapassaram a escala máxima dos instrumentos, saturando as medições [20]. De fato, de acordo com o nosso conhecimento atual, os únicos instrumentos que forneceram medidas não saturadas durante aquele evento foram os instrumentos da estação magnética Colaba, localizada em Bombaim (hoje Mumbai), Índia [22].

Os efeitos dessa perturbação no campo magnético terrestre, ou tempestade magnética, foram rapidamente notados em escalas globais. Auroras boreais e austrais foram vistas em diversas regiões de baixas latitudes (menores que 60°), incluindo Havaí, Flórida, e Washington, D.C. nos Estados Unidos [23–25], México [26], Colômbia [27], Espanha [28], Austrália [29], Ásia Oriental [30] e Chile, Portugal, leste da Rússia, Austrália e Nova Zelândia [31]. A Fig. 3 mostra um diagrama representando uma aurora austral vermelha observada na cidade de Melbourne, Austrália, no dia 2 de setembro de 1859 [25,32]. Testemunhas reportaram ter visto fios e equipamentos telegráficos em chamas nos Estados Unidos, Canadá e Europa [33]. Em Washington, D.C., populares solicitaram a ajuda de bombeiros porque interpretaram uma aurora vermelha intensamente brilhante como um incêndio de grandes proporções nos arredores da cidade [7,34]. Ainda na mesma cidade, um operador de telégrafo faleceu em resultado de um choque elétrico proveniente das teclas do aparelho, e uma outra fatalidade semelhante também ocorreu na cidade da Filadélfia, nos Estados Unidos [7]. Entretanto, pelo menos com base na ausência de relatos da época, auroras austrais não foram observadas no território brasileiro durante o evento de Carrington devido a latitudes magnéticas extremamente baixas do Brasil durante aquela época [31].

Apesar dessas evidências marcantes representadas pelas atividades magnéticas e seus resultados discutidos

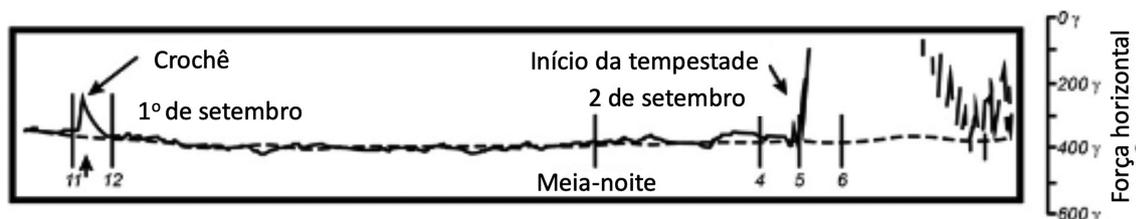


Figura 2: Perturbações da componente horizontal do campo magnético terrestre, ou a soma vetorial de suas componentes nas direções leste e norte, registradas por magnetômetros de solo localizados no observatório magnético Kew (coordenadas geográficas 51°28' N, 359°41.0' L) durante o evento de Carrington (1-2 de setembro de 1859). A tempestade magnética ocorreu devido à intensificação da corrente anelar e à redução severa da componente horizontal do campo magnético terrestre [18, 19]. Este diagrama foi publicado originalmente na referência [20], e aqui adaptado da referência [13].

acima, Carrington foi muito cuidadoso e tentou evitar uma possível conexão entre erupções solares e efeitos magnéticos terrestres. Richard Carrington escreveu em seu artigo *one swallow does not make a summer*, ou uma andorinha só não faz verão [17]. Esse mistério foi então deixado para ser desvendado pelas futuras gerações de físicos solares e geofísicos.

4. Uma explicação definitiva é fornecida

O progresso do entendimento das relações entre atividades magnéticas solares e terrestres foi relativamente lento durante o final do século XIX e início do século XX. Tal lentidão tem duas explicações: primeiro, os instrumentos de medição eram muito rudimentares e satélites presentes no espaço interplanetário inexistiam na época; segundo, devido a raridade de eventos intensos e a falta de uma amostra estatística com um número razoável de eventos, tal conexão era frequentemente desafiada, como o fez Lord Kelvin (William Thomson, 1824-1907). Lord Kelvin, baseado em cálculos de conservação de energia, concluiu que nosso Sol é incapaz de gerar energia para produzir uma tempestade magnética [13, 35]. Os cálculos de Lord Kelvin estavam corretos quando considerava o espaço interplanetário completamente vazio. No entanto, ele ignorava a existência de um fluxo constante de partículas eletricamente carregadas provenientes do Sol viajando com um campo magnético aprisionado a elas, conhecido hoje como o vento solar [19, 36, 37]. Entretanto, esta conexão começou a ser mais aceita após os trabalhos de E. Walter Maunder (1851-1926), que encontrou uma relação recorrente entre um período de aproximadamente 27 dias (uma rotação de Carrington) e atividade magnética terrestre [38].

Os trabalhos do cientista norueguês Kristian Birkeland (1867-1917) com os “experimentos de terrela” contribuíram com o entendimento da natureza física do vento solar. Ao lançar um feixe de elétrons na direção de uma esfera metálica magnetizada (*terrella*), Birkeland notou o aparecimento de estruturas parecidas com auroras boreais e austrais em ambos hemisférios [39]. Ele atribuiu esses efeitos à natureza de radiação corpuscular do feixe de elétrons. O matemático e geofísico britânico Sydney Chapman (1888-1970) usou a hipótese corpuscular de Birkeland para construir uma teoria de tempestades magnéticas [40], gerando o conceito da estrutura que hoje é conhecida como a magnetosfera terrestre [5, 37, 41].

Com respeito ao evento de Carrington, duas perguntas ainda não tinham sido respondidas: o que foi causado na superfície da Terra, e/ou no ambiente espacial no entorno desta pela erupção solar observada por Carrington? O crochê magnético, a perturbação magnética subsequente, ou ambos? Uma evidência de que perturbações magnéticas, cujas assinaturas são semelhantes ao crochê magnético, podem ser causadas por erupções solares foi fornecida pelo cientista americano J. Howard Dellinger (1886-1962), que explicou que interferências em

ondas de rádio de curto comprimento de onda (10 cm – 10 m) podem ocorrer coincidentemente com erupções solares [13, 42].

A resposta final à questão sobre o evento de Carrington foi finalmente fornecida pelo geofísico e estatístico alemão Julius Bartels (1899-1964). Baseado nas descobertas de Dellinger [42], Bartels [43] conectou o crochê magnético registrado pelo observatório de Kew [20] à erupção solar observada por Carrington [17], e associou a ideia de emissões solares corpusculares de Birkeland [39] e Chapman [40] à perturbação geomagnética intensa registrada pelo mesmo observatório [20]. Portanto, o evento de Carrington era explicado corretamente pela primeira vez na história da geofísica e heliofísica. Depois de duas décadas do trabalho de Bartels, a exploração do geoespaço se iniciava.

5. Atividade solar e clima espacial

A Fig. 4 mostra dados de médias anuais de manchas solares disponíveis no website SILSO (*Sunspot Index and Long-term Solar Observations*, <http://www.sidc.be/silso/datafiles>) [44, 45]. O gráfico (linha preta contínua) mostra dados de manchas solares de 1800 até 2018.

A figura mostra claramente que o registro temporal do número de manchas solares apresenta períodos de alternância entre máximos e mínimos, cujo período, de aproximadamente 11 anos, é definido como o ciclo solar. A figura também mostra um intervalo com aproximadamente 19 ciclos. A linha tracejada vermelha da Fig. 4 indica o evento de Carrington de 1º de setembro de 1859. A média mensal de manchas solares para aquele mês foi de 200.9. As características da erupção solar e da atividade magnética terrestre subsequente, principalmente ao que diz respeito a auroras brilhantes e efeitos em equipamentos telegráficos, têm sido amplamente discutidos na literatura [7, 10, 13, 17, 22, 31, 33, 46].

A tempestade magnética de 4 de fevereiro de 1872 também causou visualizações deslumbrantes de auroras boreais e austrais em regiões de baixas latitudes em áreas diferentes do globo, além de danos consideráveis em sistemas telegráficos [47–49]. A posição desta tempestade magnética na evolução temporal das manchas solares é mostrada na Fig. 4 por uma linha tracejada cinza. A média mensal do número de manchas solares para fevereiro de 1872 é 200.3. A linha tracejada verde indica outra tempestade solar, no dia 25 de setembro de 1909, com média mensal de manchas solares de 64.7. Esta tempestade superintensa³ gerou auroras boreais e austrais observadas na África do Sul, Japão, Austrália, Sudeste Asiático e Oceano Índico [50, 51]. A tempestade magnética de 15 de maio de 1921 (linha tracejada cor de laranja) causou sérios danos a sistemas telegráficos, telefônicos, e ferroviários na cidade de Nova Iorque, nos

³Para mais detalhes sobre critérios de categorização da intensidade de tempestades magnéticas, veja, e.g., a referência [18].



Figura 3: Diagrama de uma aurora austral observada em Melbourne, Austrália, durante o evento de Carrington. Esta figura foi originalmente publicada na referência [32], e mostrada aqui como extraída da referência [25].

Estados Unidos [52]. A média mensal de manchas solares para o mês de maio de 1921 é 146.9.

A região destacada em cinza mostra a época denominada Era Espacial, que se estende do lançamento do satélite soviético *Sputnik* (4 de outubro de 1957) até os dias atuais. *Sputnik* tem uma importância histórica porque, além de ser um marco da aplicação tecnológica na exploração espacial e desenvolvimento educacional [53], o satélite também teve grande importância na corrida armamentista entre os Estados Unidos e a União Soviética durante o período denominado Guerra Fria [54]. Dados do *Sputnik* foram utilizados pela primeira vez para associar decaimentos bruscos de satélites de baixas órbitas à tempestades magnéticas [55, 56]. Com respeito à atividade solar, curiosamente, os números máximos de manchas solares têm sido cada vez menores em cada ciclo solar na Era Espacial, com exceção do número máximo de manchas solares que ocorreu por volta de 1970. Como resultado, a atividade solar tem se reduzido enquanto a dependência tecnológica da sociedade moderna tem aumentado continuamente nas últimas décadas.

A faixa hachurada em amarelo mostra um período solar altamente ativo entre 1989 e 2003, com os conhecidos eventos da tempestade magnética de março de 1989, que causou a destruição de transformadores que levou ao blecaute em Quebec, no Canadá [57], e as conhecidas “tempestades de Halloween” de outubro de 2003 [58], que

causaram o cancelamento e adiamento de diversos voos na América do Norte [59]. Como resultado de erupções solares intensas, partículas solares provenientes do vento solar [19, 36, 37] têm acesso a regiões de altas latitudes das regiões superiores da atmosfera terrestre. Tais partículas altamente energéticas (>500 MeV, or 1.0×10^6 elétron-volts) colidem mais frequentemente com as partículas neutras da atmosfera que por sua vez interagem com aviões, aumentando doses de radiação em passageiros e tripulação, particularmente em voos transpolares [60]. Durante tempestades magnéticas intensas, variações de campos elétricos intensos na atmosfera terrestre ionizada geram correntes elétricas que, por sua vez, se acoplam a condutores artificiais no solo (linhas de transmissão de energia elétrica e transformadores), produzindo as denominadas correntes geomagnéticas induzidas (do inglês *geomagnetically induced currents*, GICs) [60–62]. Além do blecaute em Quebec, GICs de alta intensidade causaram a completa destruição de um transformador de uma usina elétrica no estado de Nova Jersey, Estados Unidos, durante a tempestade magnética de março de 1989 [63, 64].

A linha tracejada roxa da Fig. 4 mostra, dentro do período analisado, a última tempestade magnética de intensidade considerável que ocorreu em 7 de setembro de 2017. Esta é uma das tempestades magnéticas mais intensas do ciclo solar atual, o mais fraco da Era Espacial.

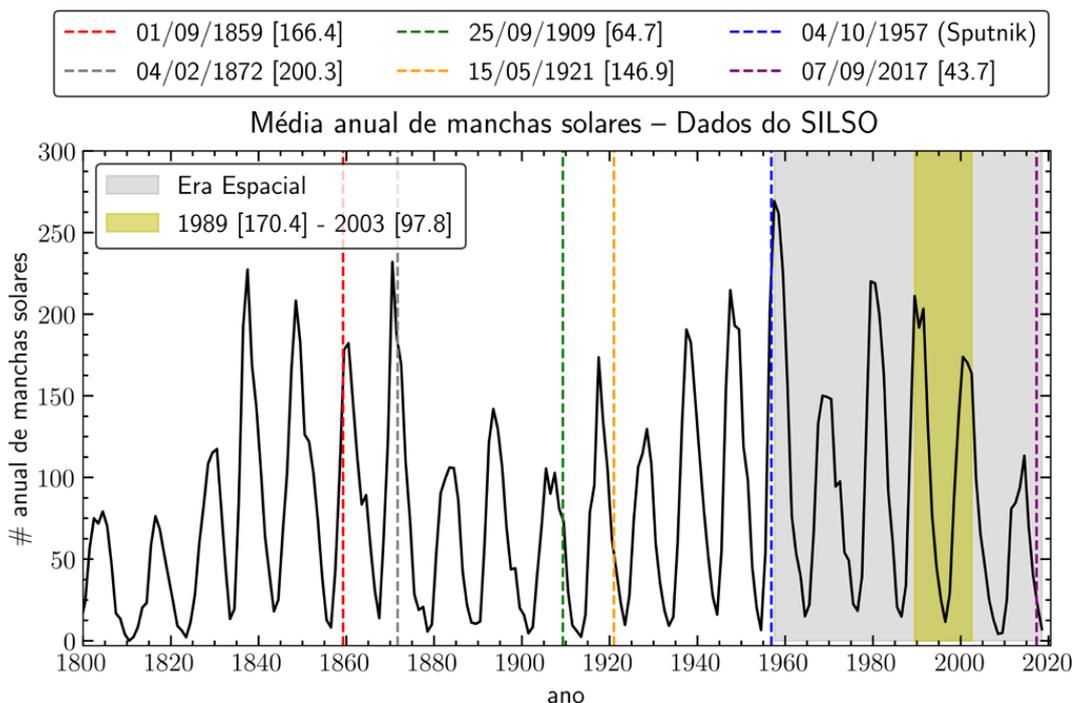


Figura 4: Gráfico mostrando médias anuais de manchas solares no período 1800 a 2018. Os dados foram obtidos do SILSO website, veja seção 5 (*Sunspot Index and Long-term Solar Observations*). As linhas tracejadas mostram tempestades magnéticas conhecidas das quais alguns registros históricos têm sido encontrados recentemente. Os números entre colchetes correspondem às médias mensais de manchas solares registradas para o mês de ocorrência da tempestade magnética. A área hachurada em cinza corresponde ao intervalo conhecido como Era Espacial, que se iniciou com o lançamento do satélite soviético *Sputnik*, enquanto que a área hachurada amarela mostra o intervalo entre a tempestade magnética de março de 1989 e as tempestades magnéticas de 2003 que, por terem ocorrido no final do mês de outubro, foram denominadas como as tempestades de Halloween.

A média mensal de manchas solares durante o mês de setembro de 2017 foi a mais baixa (43.7) das tempestades magnéticas representadas na Fig. 4. Apesar disso, diversos efeitos de clima espacial têm sido associados àquela tempestade, como, por exemplo, o aumento considerável do fluxo de partículas carregadas no geoespaço [65], interferência em sinais de sistemas de satélites de GPS [66], e efeitos de GICs em transmissões elétricas e oleodutos na Finlândia [67].

Uma análise cuidadosa da Fig. 4 mostra que tempestades solares superintensas tendem a ocorrer em torno de números máximos de manchas solares, ou durante as fases de declínio e ascensão do número de manchas solares. Os números anuais e mensais de manchas solares associados a essas tempestades são geralmente altos, com exceção da tempestade magnética de setembro de 2017. Entretanto, esta última tempestade não satisfaz condições bem estabelecidas para a classificação da intensidade de tempestades magnéticas como superintensas, como por exemplo a variação abrupta da componente horizontal do campo magnético terrestre medida em solo [68].

De acordo com a Fig. 4, as manchas solares apresentam outro comportamento periódico peculiar. As amplitudes máximas de cada ciclo solar, quando observadas em longo prazo (alguns ciclos solares), apresentam períodos mais longos que correspondem a 77-88 anos, ou 7-8 ciclos

solares regulares. Tal fenômeno é denominado *ciclo de Gleissberg* [10, 69, 70], descrito claramente por Wolfgang Gleissberg (1903-1986) após análises dos dados de manchas solares de Wolfe. Há evidências de que esse padrão tem se repetido nos últimos 12000 anos, como mostram resultados de análise de ^{14}C das variações de isótopos cosmogênicos associados à atmosfera terrestre [71]. Efeitos do ciclo de Gleissberg têm sido notados recentemente em registros históricos de auroras boreais no período de 1600-2015 [70].

6. Conclusão

Neste trabalho, as observações de Richard Carrington foram brevemente apresentadas e reconhecidas como a primeira tentativa, embora de forma extremamente cautelosa, em conectar fenômenos solares com os subsequentes fenômenos de atividade magnética na Terra. Foi mostrado que após as observações de Carrington, a compreensão de tal conexão começou a progredir, embora de forma modesta, graças a descoberta da correlação estreita entre atividade solar e atividade magnética terrestre. Na primeira metade do século XX, ao associar os resultados experimentais obtidos por Birkeland e Dellinger, juntamente com os resultados teóricos de Chapman, Bartels foi capaz de explicar o evento de Carrington pela primeira

vez de maneira clara e conclusiva. De acordo com Bartels, o crochê magnético foi causado pela erupção solar (observada por Carrington), enquanto que a tempestade magnética foi causada pela interação da “radiação corpuscular” (hoje conhecida como plasma) com a magnetosfera terrestre. O evento de Carrington foi um dos primeiros sinais da concepção da disciplina de clima espacial, e claramente abriu o caminho para o desenvolvimento da disciplina, a qual decolou após o início da Era Espacial (1957 em diante) [72]. A história da exploração do espaço interplanetário não faz parte do escopo deste artigo, mas certamente é um assunto interessante para um trabalho futuro.

Atualmente, o clima espacial e seus efeitos têm grande importância devido ao impacto que eles podem causar em nossa sociedade moderna e altamente tecnológica. Danos a satélites de comunicações e astronautas no geoespaço causados pelo aumento excessivo de radiação, danos a redes e sistemas de transmissão elétrica causados por GICs, as quais também causam corrosão de oleodutos, são alguns exemplos [59, 60]. Como resultado, o governo dos Estados Unidos tem recentemente reconhecido os efeitos de clima espacial como ameaças naturais que podem causar sérios impactos econômicos e sociais na sociedade contemporânea [73, 74]. Esses relatórios também enfatizam o estudo de condições extremas durante eventos de clima espacial, no qual o evento de Carrington desempenha um papel importante como evento base para análise de dados e simulações numéricas [75–77]. A combinação de análises de dados fornecidos por plataformas espaciais localizadas na vizinhança do nosso planeta, bem como de dados de instrumentos de solo aliadas a análises de modelagens computacionais aprimora o entendimento de clima espacial e suas consequências através de previsões de tais eventos em curto, médio e longo prazos [77].

De volta à Fig. 4, é possível ver claramente dois ciclos de Gleissberg, cujos mínimos estão nos intervalos aproximados de 1810-1885 e 1930-2010. Tendo em vista o ciclo de Gleissberg (e as manchas solares da Fig. 4), é razoável argumentar que nas próximas décadas a atividade solar tem grande probabilidade de aumentar. Portanto, com a dependência de tecnologias em níveis ainda maiores, pode-se concluir que o estudo de clima espacial, suas aplicações e previsões terão grande importância e impacto no futuro de uma sociedade altamente tecnológica. Como resultado, não é difícil imaginar que, assim como previsões diárias do tempo (meteorologia), previsões periódicas de clima espacial marcarão presença constante nos meios de comunicação do futuro.

7. Uma nota pessoal

De acordo com o website www.academictree.org, Julius Bartels (*Universität Göttingen*, Alemanha) orientou o Ph.D. de Walter Kertz (*Universität Göttingen*, Alemanha), que orientou o Ph.D. de Fritz Manfred Neubauer (*TU Braunschweig*, Alemanha), que orientou o Ph.D. de

Joachim Raeder (*Universität zu Köln*, Alemanha), que orientou o Ph.D. do autor deste trabalho na *University of New Hampshire*, Estados Unidos. A descoberta desta conexão entre o autor deste trabalho e Julius Bartels, o cientista que claramente explicou a conexão entre eventos magnéticos solares e terrestres, trouxe uma satisfação pessoal e especial ao autor.

Agradecimentos

O autor agradece a NASA (agência espacial norte-americana) pelo apoio financeiro através dos projetos 13-SRITM132-0011 e HSR-520 MAG142-0062 sob contrato com a UMBC. O autor também agradece ao Dr. Marcos Silveira (NASA/GSFC) e ao professor Alexandre Emygdio (Colégio Exatus) pela cuidadosa leitura do manuscrito e pelos valiosos comentários e sugestões. Finalmente, o autor agradece a dois árbitros anônimos pela revisão do manuscrito e pelas sugestões fornecidas (principalmente com respeito ao idioma Português) visando o aprimoramento deste trabalho.

Referências

- [1] J.A. Eddy, *Science* **192**, 1189 (1976).
- [2] E. Echer, N. Rodolfo Rigozo, D.J.R. Nordemann, L.E.A. Vieira, A. Prestes e H.H. De Faria, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 157 (2003).
- [3] J.M. Vaquero, *Advances in Space Research* **40**, 929 (2007).
- [4] E.W. Maunder, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **50**, 251 (1890).
- [5] C.T. Russell, J.G. Luhmann e R.J. Strangeway, *Space Physics: An Introduction* (Cambridge University Press, Cambridge, 2016).
- [6] B.M. Morris, J.R.A. Davenport, H.A.C. Giles, L. Hebb, S.L. Hawley, R. Angus, P.A. Gilman e E. Agol, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **484**, 3244 (2019).
- [7] S. Clark, *The Sun Kings – The Unexpected Tragedy of Richard Carrington and the Tale of How the Modern Astronomy Began* (Princeton University Press, Princeton, 2007).
- [8] G. Galilei, *Sidereus Nuncius* (Thomam Baglionum, Venice, 1610).
- [9] A. Wilson, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **64**, 1 (1774).
- [10] D.H. Hathaway, *Living Reviews in Solar Physics* **12**, (2015).
- [11] S.H. Schwabe, *Astronomische Nachrichten* **21**, 233 (1844).
- [12] R. Wolfe, *Mitth. Natur. Ges. Bern* **245**, 179 (1852).
- [13] E.W. Cliver, *Advances in Space Research* **38**, 119 (2006).
- [14] A. von Humboldt, *Cosmos: Sketch of a Physical Description of the Universe* (Wilson and Ogilvy, London, 1852), v. III.
- [15] J. Cawood, *Isis* **70**, 492 (1979).
- [16] E. Sabine, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **142**, 103 (1852).

- [17] R.C. Carrington, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **20**, 13 (1859).
- [18] W.D. Gonzalez, J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani e V.M. Vasylunas, *Journal of Geophysical Research* **99**, 5771 (1994).
- [19] E. Costa Jr., F.J.R. Simões, F.R. Cardoso e M.V. Alves, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 4301 (2011).
- [20] B. Stewart, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **151**, 423 (1861).
- [21] R. Hodgson, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **20**, 15 (1859).
- [22] B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, G.S. Lakhina e S. Alex, *Journal of Geophysical Research* **108**, A09227 (2003).
- [23] D.S. Kimball, *A study of the Aurora of 1859*, disponível em <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/3607>.
- [24] J.L. Green e S. Boardsen, *Advances in Space Research* **38**, 130 (2006).
- [25] H. Hayakawa, Y. Ebihara, D.P. Hand, S. Hayakawa, S. Kumar, S. Mukherjee e B. Veenadhari, *The Astrophysical Journal* **869**, 1 (2018).
- [26] J.A. González-Esparza e M.C. Cuevas-Cardona, *Space Weather* **16**, 593 (2018).
- [27] F.M. Cárdenas, S.C. Sánchez e S. Vargas Domínguez, *Advances in Space Research* **57**, 257 (2016).
- [28] A.M.M. Farrona, M.C. Gallego, J.M. Vaquero e F. Domínguez-Castro, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* **46**, 370 (2011).
- [29] J.E. Humble, *Advances in Space Research* **38**, 155 (2006).
- [30] H. Hayakawa, K. Iwahashi, H. Tamazawa, H. Isobe, R. Kataoka, Y. Ebihara, H. Miyahara, A.D. Kawamura e K. Shibata, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **68**, 1 (2016).
- [31] H. Hayakawa, Y. Ebihara, D.M. Willis, S. Toriumi, T. Iju, K. Hattori, M.N. Wild, D.M. Oliveira, I. Ermolli, J.R. Ribeiro et al., arXiv:1908.10326 (2019).
- [32] G. Neumayer, *Results of the meteorological observations taken in the Colony of Victoria during the years 1859-1862; and of the nautical observations collected and discussed at the Flagstaff Observatory, Melbourne, during the years 1858-1862* (John Ferres Government Printer, Melbourne, 1864).
- [33] E. Loomis, *American Journal of Science* **32**, 318 (1861).
- [34] S. Odenwald, *Solar Storms: 2000 Years of Human Calamity!* (CreateSpace Independent Publishing Platform, San Bernardino, 2015).
- [35] L. Kelvin, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **5**, 44 (1893).
- [36] E. Echer, M.V. Alves e W.D. Gonzalez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 51 (2006).
- [37] D.M. Oliveira e M.V.D. Silveira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, 1305 (2016).
- [38] E.W. Maunder, *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **55**, 538 (1905).
- [39] K. Birkeland, *The Norwegian aurora polaris expedition, 1902-1903* (H. Aschehoug & Co., Copenhagen, 1908), v. 1.
- [40] S. Chapman, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **95**, 61 (1919).
- [41] E. Echer, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 2301 (2010).
- [42] J.H. Dellinger, *Phys. Rev.* **50**, 1189 (1936).
- [43] J. Bartels, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity* **42**, 235 (1937).
- [44] F. Clette, E.W. Cliver, L. Lefèvre, L. Svalgaard, J.M. Vaquero e J.W. Leibacher, *Solar Physics* **291**, 2479 (2016).
- [45] F. Clette e L. Lefèvre, *Solar Physics* **291**, 2629 (2016).
- [46] S. Clark, *Endeavor* **31**, 104 (2007).
- [47] J. Meldrun, *Nature* **5**, 392 (1872).
- [48] S.M. Silverman, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **70**, 1301 (2008).
- [49] H. Hayakawa, Y. Ebihara, D.M. Willis, K. Hattori, A.S. Giunta, M.N. Wild, S. Hayakawa, S. Toriumi, Y. Mitsuma, L.T. Macdonald et al., *The Astrophysical Journal* **862**, 1 (2018).
- [50] H. Hayakawa, Y. Ebihara, E.W. Cliver, K. Hattori, S. Toriumi, J.J. Love, N. Umemura, K. Namekata, T. Sakaue, T. Takahashi et al., *Monthly Notes of the Royal Astronomical Society* **484**, 4083 (2019).
- [51] J.J. Love, H. Hayakawa e E.W. Cliver, *Space Weather* **17**, 37 (2019).
- [52] J.J. Love, H. Hayakawa e E.W. Cliver, *Space Weather* **17**, 1281 (2019).
- [53] C. Wissehr, J. Concannon e L.H. Barrow, *School Science and Mathematics* **111**, 368 (2011).
- [54] C. Peoples, *Cold War History* **8**, 55 (2008).
- [55] L.G. Jacchia, *Nature* **183**, 1662 (1959).
- [56] D.M. Oliveira e M.V.D. Silveira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3305 (2017).
- [57] J. Allen, H. Sauer, L. Frank e P. Reiff, *Eos Transactions American Geophysical Union* **70**, 1479 (1989).
- [58] R.E. Lopez, D.N. Baker e J. Allen, *Eos Transactions American Geophysical Union* **85**, 105 (2004).
- [59] National Research Council, in *Severe Space Weather Events - Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report* (The National Academies Press, Washington, 2008).
- [60] C.J. Schrijver, K. Kauristie, A.D. Aylward, C.M. Denardini, S.E. Gibson, A. Glover, N. Gopalswamy, M. Grande, M. Hapgood, D. Heyndericx et al., *Advances in Space Research* **55**, 2745 (2015).
- [61] A. Viljanen, *IEEE Transactions on Power Delivery* **13**, 1285 (1998).
- [62] R. Pirjola, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28**, 1867 (2000).
- [63] J. Kappenman, Report Meta-R-319, Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid, Metatech Corp., California (2010).
- [64] D.M. Oliveira e C.M. Ngwira, *Brazilian Journal of Physics* **47**, 552 (2017).
- [65] A. Bruno, E.R. Christian, G.A. de Nolfo, I.G. Richardson e J.M. Ryan, *Space Weather* **17**, 419 (2019).
- [66] H. Sato, N. Jakowski, J. Berdermann, K. Jiricka, A. Heßelbarth, D. Banyś e V. Wilken, *Space Weather* **17**, 816 (2019).
- [67] A.P. Dimmock, L. Rosenqvist, J.O. Hall, A. Viljanen, E. Yordanova, I. Honkonen, M. André e E.C. Sjöberg, *Space Weather* **17**, 989 (2019).
- [68] X. Meng, B.T. Tsurutani e A.J. Mannucci, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **124**, 3926 (2019).
- [69] W. Gleissberg, *Solar Physics* **2**, 231 (1967).
- [70] M. Vázquez, J.M. Vaquero, M.C. Gallego, T. Roca Cortés e R.L. Pallé, *Solar Physics* **291**, 613 (2016).
- [71] A.N. Peristykh e P.E. Damon, *Journal of Geophysical Research* **108**, 1 (2003).

- [72] W.B. Cade III e C.P. Christina, *Space Weather* **13**, 99 (2015).
- [73] National Space Weather Strategy, disponível em https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/final_nationalspaceweatherstrategy_20151028.pdf.
- [74] National Space Weather Action Plan, disponível em https://www.sworm.gov/publications/2015/swap_final__20151028.pdf.
- [75] C.M. Ngwira, A. Pulkkinen, M.L. Mays, M.M. Kuznetsova, A.B. Galvin, K. Simunac, D.N. Baker, X. Li, Y. Zheng e A. Gloer, *Space Weather* **11**, 671 (2013).
- [76] C.M. Ngwira, A. Pulkkinen, M.M. Kuznetsova e A. Gloer, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **119**, 4456 (2014).
- [77] N. Buzulukova, *Extreme Events in Geospace - Origins, Predictability, and Consequences* (Elsevier, Amsterdam, 2018), 1^a ed.