Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 40, nº 3, e3312 (2018)
www.scielo.br/rbef
DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342

Artigos gerais
Licença Creative Commons

A irradiância solar: conceitos básicos

Solar Irradiance: basic concepts

J.M. Rodríguez Gómez*[1], F. Carlesso[1], L. E. Vieira[1], L. Da Silva[1]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil

Recebido em 09 de Novembro, 2017. Revisado em 24 de Janeiro, 2018. Aceito em 12 de Fevereiro, 2018.

A radiação solar ou irradiância constitui um importante fator que influencia os processos químicos, físicos e biológicos na Terra. Essa radiação emitida por diferentes camadas da atmosfera solar afeta a atmosfera superior e também o clima da Terra. Neste artigo serão descritos os conceitos físicos sobre a irradiância total e irradiância espectral. Essas medidas são fundamentais para a modelagem do clima da Terra. Também alguns modelos utilizados são descritos. A relação entre a irradiância solar e o clima da Terra será discutido.
Palavras-chave: Sol, Irradiância, Radiação eletromagnética, Fenômenos solares, Clima da Terra.

The solar radiation or irradiance influences chemical, physical and biological processes on the Earth. This radiation emitted from the solar atmosphere through different layers can affect the Earth's upper atmosphere and climate. An overview about the Sun were presented. The physical description of Total Solar Irradiance (TSI) and Solar Spectral Irradiance (SSI) are explained. Some models of irradiance are briefly described. The relationship between the solar irradiance and the Earth's climate were discussed.
Keywords: Sun, Irradiance, Electromagnetic radiation, Solar features, Earth's climate.

1. Introdução

A energia solar esta diretamente relacionada com os processos químicos, físicos e biológicos, ou seja, esta associada com a vida na Terra. As variações dessa energia têm impacto na atmosfera e no clima da Terra em largas escalas de tempo [1]. Além disso, a química da atmosfera superior, da ionosfera e da estratosfera também são influenciadas [2, 3].

A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. Durante muitos anos foi considerada uma constante em torno de 1.365 $\mathrm{Wm^{-2}}$. No entanto, observações contínuas desde o final da década de 70 demonstraram variação em escalas de tempo de minutos até décadas [4]. As medidas de radiação são denominadas como Irradiância Solar Total (TSI - *Total Solar Irradiance*) e Irradiância Solar Espectral (SSI - *Solar Spectral Irradiance*). A Irradiância Solar Total é definida como a potência total da energia proveniente do Sol por unidade de área a 1 UA (distância entre o Sol e a Terra conhecida como Unidade Astronômica). As medidas podem ser realizadas em função do comprimento de onda [$\mathrm{W\ m^{-2}\,nm^{-1}}$] e integradas para determinar a TSI.

A obtenção de valores da irradiância solar com alta precisão são importantes nos modelos climáticos e atmosféricos [5]. Apesar da radiação solar ser a principal fonte de energia da Terra o clima também é influenciado pelo efeito estufa, emissões de vulcões [6, 7], raios cósmicos [8] e energia radiante da supernova [9]. Além disso, mudanças de longo prazo na órbita da Terra modulam a irradiância solar que atinge o topo da atmosfera. As variações nas inclinações orbitais também podem causar pequenas diferenças na TSI [10].

O principal motivo para abordar o estudo da irradiância solar é conhecer qual é a verdadeira influência dela, nas variações do clima da Terra já que elas afetam nossa vida diária. Assim, como determinar qual é a influência dos processos humanos (efeito estufa e emissões de CO_2, por exemplo) no clima e sua variabilidade. Esse trabalho fornece uma visão geral desde os conceitos básicos da radiação solar, a estrutura do Sol, a geração de campo magnético do Sol, a descrição física da irradiância solar, modelos de reconstrução da irradiância e a relação da irradiância solar e o clima da Terra.

2. Conceitos básicos da radiação solar

A radiação eletromagnética está relacionada com cargas elétricas aceleradas que irradiam energia. Em outras palavras, refere-se as variações temporais do campo elétrico (**E**), provocando uma variação do campo magnético (**B**) [11]. Estas variações se propagam radialmente, o campo elétrico oscila perpendicularmente ao campo magnético, e a direção de propagação é dada pelo vetor de Poynting.

A radiação eletromagnética ocorre em diferentes faixas espectrais de acordo com o tipo de interação com a matéria. Todas tem uma característica em comum, são resultados das oscilações do campo elétrico (**E**) e do

*Endereço de correspondência: jemfisi@gmail.com.

Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

campo magnético (**B**). O espectro eletromagnético é classificado em diferentes regiões:

Raios γ, Raios-X, Ultravioleta (UV), Viível (VIS), Infravermelho, Micro-ondas ou Ondas de rádio. O Sol emite radiação eletromagnética, devido ao caráter magnético e elétrico de fenômenos originados pelo dínamo solar.

Por outro lado**,** a radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada radiação térmica. De maneira geral, a forma detalhada do espectro da radiação térmica emitida por um corpo quente depende de algum modo da composição dele. No entanto, há um corpo quente que emite espectros térmicos de carácter universal. Esses corpos são conhecidos como corpos negros [12]. A radiação emitida por um corpo negro é determinada por sua temperatura e pelo comprimento de onda considerado, conforme é descrito na Lei de Planck. A lei de deslocamento de Wien é importante para estimar a temperatura de uma fonte a partir de seu espectro de emissão. Um exemplo é a distribuição espectral da radiação solar, que se assemelha à de um corpo negro a uma temperatura de ∼5.800 K [13] e apresenta variações ao longo do tempo como resultado da dinâmica interna do Sol (Figura 1).

Por outro lado, a Lei de Stefan-Boltzmann (equação 1) descreve a radiação do corpo negro, a qual é integrada sobre comprimentos de onda específicos, e dela se conclui que corpos com maior temperatura emitem mais energia total por unidade de área comparado com os de menor temperatura. Essas leis são muito importantes para caracterizar a emissão do Sol. Por exemplo, é possível obter o valor aproximado da irradiância solar total (TSI) usando a lei de Stefan-Boltzmann:

$$P = \sigma T^4 A \tag{1}$$

em que P corresponde a irradiância solar total (TSI), T=5.800 K é a temperatura aproximada do Sol [13],

Figura 1: O espectro solar de referência em condições de baixa atividade solar (linha preta ou linha que apresenta variações) [14] e o espectro solar como se o Sol fosse um corpo negro com uma temperatura de ∼5.800 K (linha vermelha ou contínua), adaptado de [13].

σ = 5,67 x 10^{-8} $Wm^{-2}T^{-4}$ é a constante de Stefan Boltzmann, $A = 4\pi R^2$é a área da superfície. Neste caso é necessário usar a relação de áreas entre a superfície do Sol com raio $R_\odot$ = 6,95700 x 10^8 m e a área de uma esfera de raio R_1 =1 UA = 1,496 x 10^{11} m (distância entre o Sol e à Terra).

$$P = \sigma T^4 \left(\frac{R_\odot}{R_1}\right)^2 \tag{2}$$

Assim, é possível obter o valor de P∼ 1.387,6 Wm^{-2}, ou o valor de irradiância solar total (TSI).

A seguir são descritas algumas características do Sol, como sua estrutura, o mecanismo de produção do campo magnético e alguns fenômenos presentes na atmosfera solar**.** Todos influenciam a emissão solar total ou em comprimentos de onda específicos.

3. O Sol

O Sol possui uma estrutura estratificada composta pelo núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa. A energia radiativa proveniente do Sol, especificamente a radiação eletromagnética, é originada no núcleo [15, 16, 17, 18].

O fluxo dessa energia radiativa é emitido pela camada denominada fotosfera. A fotosfera é a camada visível do Sol, geralmente, chamada de superfície do Sol. Essa camada apresenta uma região de temperatura mínima do Sol. A fotosfera apresenta estruturas nomeadas manchas solares [19] e foram observadas por Galileu em 1610. Nessa camada é possível observar o topo das células da camada convectiva, os grânulos e os super grânulos. Também é possível observar pontos brilhantes denominadas fáculas [20]. Esses fenômenos são discutidos em detalhe ao longo desta seção.

A geração do campo magnético é associada com a operação de um dínamo que atua no interior do Sol. O dínamo refere-se a um mecanismo, produzido por uma corrente elétrica seguindo a lei de Ampére, que causa o fenômeno magnético na atmosfera solar [21]. Esse complexo mecanismo ainda precisa ser melhor entendido seja para o Sol ou outras estrelas e planetas. Em geral, o dínamo solar explica importantes fenômenos como: o ciclo de manchas solares com um período de ∼11 anos [22, 19], o diagrama de borboleta relacionado ao desvio equatorial das manchas solares e sua dependência com a latitude é conhecido como a Lei de Joy [23] e a reversão dos campos magnéticos polares de acordo com a lei da Polaridade de Hale [24]. Todos esses fenômenos são apresentados no diagrama de borboleta (Figura 2).

À medida que o ciclo solar progride, as manchas solares se movem para o equador, mas no novo ciclo apresenta-se o reaparecimento das manchas solares em maiores latitudes (lei de Joy). Este padrão de formação de manchas a cada ciclo em latitudes maiores e a migração para menores latitudes constitui um padrão denominado lei

Figura 2: Diagrama de borboleta, adaptado de [22]

de Sporer, representado pelo diagrama de borboleta (Figura 2). A cada 11 anos a polaridade magnética solar se inverte (lei de Hale).

O Sol rotaciona diferencialmente, isto é, rotaciona mais rápido no equador do que nos polos. A rotação diferencial do Sol também é importante na dinâmica do campo magnético solar, pois, auxilia na transformação do campo magnético poloidal em campo magnético toroidal, processo chamado de efeito α. Auxilia igualmente na geração de um campo magnético toroidal a partir de um campo magnético poloidal, efeito Ω [25].

As componentes toroidal e poloidal do campo magnético e a rotação diferencial geram linhas de campo abertas e fechadas (loops ou tubos de fluxo), as quais cruzam a superfície solar (Figura 3). Em geral, acredita-se que os tubos de fluxo tendem a ascender e irromper a superfície solar devida ao processo de empuxo magnético e a rotação diferencial. Quando o tubo irrompe a superfície solar pode formar os fenômenos da atmosfera solar [19]. Esses Fenômenos são as manchas solares, as fáculas, os grânulos e os super grânulos. Todos esses processos são descritos pelo modelo de dínamo solar de Babcock-Leighton [26].

As manchas solares que aparecem na fotosfera são regiões de intenso campo magnético e apresentam coloração escura devido à supressão da convecção pelo campo magnético. A intensidade do campo magnético é maior na parte central, regiões mais escuras denominadas de umbra e menos intensa nas regiões claras, chamadas de penumbra. O tempo de vida das manchas solares pode variar de dias até meses e podem ter diâmetros na faixa de 5 Mm a 50 Mm. Em geral, o aparecimento das manchas solares ocorrem em torno de 35° de latitude e estas vão se movimentando na direção do equador solar. As manchas solares são sempre precedidas e acompanhadas

Figura 3: Imagem composta pelos comprimentos de onda: 21.1 nm, 19.3 nm e 17.1 nm, medidas com o instrumento AIA do satélite SDO. Também, a extrapolação potencial de campo magnético *Field Source Surface (PFSS)*, apresenta linhas de campo magnético abertas e fechadas que atravessam a atmosfera solar no dia 29 de Abril de 2017, fonte: `https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/`.

por fáculas com campos magnéticos na faixa de 100 G até 500 G ou *plage* na cromosfera [27, 28].

As fáculas são áreas mais brilhantes e também estão relacionadas com as linhas de campo magnético mais intensas confinadas em áreas menores. Os grânulos são as estruturas dominantes da superfície solar e apresentam

dimensões em torno de ∼1 Mm e tempo de vida de ∼10 min. Os grânulos são gerados pelo topo das células de convecção de gás quente proveniente do interior do Sol. Os Super Grânulos são um padrão de fluxo celular muito maior comparado com os grânulos com ∼30 Mm e tempo de vida de ∼1 dia (Figura 4) [31, 32].

Acima da fotosfera está a cromosfera. Nesta camada há um aumento na temperatura entre 10.000 K até 20.000 K. Esta camada é observada geralmente no comprimento de onda correspondente ao Hα (656,28 nm). Neste comprimento de onda é possível observar plages, filamentos e proeminências. As *plages* são regiões brilhantes ao redor das manchas solares e estão associadas com campos magnéticos intensos. Os filamentos são estruturas mais frias e densas que seu ambiente e as proeminências são nuvens densas de material suspenso acima da superfície do Sol por loops de campo magnético (Figura 5) [20, 35].

A região de transição é uma camada fina que separa a cromosfera e a coroa solar. Nesta região a temperatura cresce rapidamente até alcançar temperaturas de milhões de Kelvin. Essa camada emite na região ultravioleta do espectro solar que só é acessível a partir do espaço [36]. No entanto, os comprimentos de onda UV (ultravioleta) gerados na região de transição são absorvidos pela atmosfera da Terra. Assim a região de transição não pode ser observada desde a superfície da Terra.

A coroa é a camada mais externa da atmosfera solar e apresenta temperaturas entre 2 e 4 milhões de Kelvin. Geralmente esta camada é observada durante os eclipses ou usando um coronógrafo [37], dispositivo que esconde a fotosfera do Sol. A coroa exibe uma variedade de fenômenos, incluindo *Helmet streamers*, *plumes* nos polos do Sol e loops ou linhas de campo fechadas, linhas de campo aberto ou buracos coronais (*Coronal Holes - CHs*) Figura 6.

Os *Helmet streamers* são estruturas coronais de grande escala que geralmente superam o tamanho das manchas solares e as regiões ativas. Muitas vezes se encontram proeminências ou filamentos na base dessas estruturas. As

Figura 5: Fenômenos na cromosfera solar: (a) Filamentos em 7 de Setembro de 2012 [33], (b) *plages* observadas pelo Telescópio Óptico Devasthal (DOT) em 23 de Setembro de 2006 [33], (c) Proeminências apreciadas pelos satélites STEREO-B (esquerda) e STEREO-A (direita) em 28 de Fevereiro de 2010 [34].

Figura 4: Fenômenos na fotosfera solar: (a) Mancha solar medida na banda G [27], (b) Fáculas perto das regiões ativas AR 0464 em 2003 e AR 0095 em 2002 [20], (c) Grânulos observados com o telescópio aberto Holandês (DST) na banda G [29], (d) Super Grânulos descritos usando a velocidade radial obtida de uma simulação tridimensional de convecção compressível realizada em camadas esféricas que permite modelar a dinâmica e estruturas presentes no interior do Sol [30].

Figura 6: Fenômenos na coroa solar: Linhas de campo fechadas (loops), buracos coronais (CHs), *Helmet streamers*, *plumes* nos polos do Sol. Adaptado da imagem do instrumento AIA no comprimento de onda 21,1 nm, no dia 21 de setembro de 2017.

 DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342

plumes são estruturas longas e finas que se projetam para fora dos polos norte e sul do Sol, elas estão associadas a pequenas regiões magnéticas na superfície solar.

Os buracos coronais (CHs) são regiões onde a coroa está escura e estão associados a linhas abertas de campo magnético e são frequentemente encontradas nos polos do Sol [38]. Em geral, a coroa muda com o ciclo das manchas solares em outras palavras com a evolução do campo magnético ao longo do ciclo solar [20, 39].

Nesse cenário, as variações na irradiância podem estar correlacionadas com os fenômenos da atmosfera solar que por sua vez são modulados pela evolução do campo magnético solar. A descrição física destas variações é apresentada a seguir.

4. Irradiância solar: descrição física

Alguns mecanismos têm sido propostos para explicar a origem e variações da irradiância solar. O mais aceito está relacionado com os fenômenos magnéticos que ocorrem na superfície solar. Esses fenômenos representam o campo magnético na superfície do Sol e frequentemente são descritos pelo modelo do tubo de fluxo [40].

Em geral, esses tubos de fluxo ascendem e irrompem na superfície solar. As aberturas dos tubos de fluxo estão relacionadas com as manchas solares e os fenômenos atmosféricos solares. Esses fenômenos são aquecidos pela radiação que flui das paredes densas e quentes dos tubos de fluxo tornando-os mais brilhantes. No caso das manchas solares a energia é bloqueada e redistribuída através da zona de convecção. Essa energia é reemitida em longas escalas de tempo como a escala de Kelvin-Helmholtz ($\sim$30 milhões de anos).

A temperatura na atmosfera solar varia com a altitude, conforme mostrado na Figura 7, aumentando de baixo para cima. Na fotosfera e na cromosfera a temperatura é da ordem de $\sim 1\text{x}10^3$ K. Enquanto, na região de transição a temperatura aumenta abruptamente até a ordem de $\sim 1 \text{ x } 10^6$ K na coroa solar. Isso faz com que diferentes regiões da atmosfera com temperaturas distintas tenham seu máximo de emissão em diferentes comprimentos de onda, como foi descrito na seção 2. Regiões na cromosfera e a região de transição emitem no ultravioleta (UV) e no extremo ultravioleta (EUV). A coroa apresenta emissão EUV e raios X. A fotosfera apresenta temperaturas menores e emite na faixa do visível. A intensidade de emissão em diferentes comprimentos de onda depende da temperatura de cada camada que compõe a atmosfera solar [2, 5, 35].

A complexa dinâmica da atmosfera solar influencia na variação da irradiância solar em diferentes escalas temporais. As variações em períodos entre minutos e horas são atribuídas às oscilações p-mode, granulações e super granulações. As oscilações p-mode são ondas sonoras produzidas por flutuações da pressão no interior do Sol. À medida que as ondas se movem para fora refletem na fotosfera [41].

Figura 7: Densidade (linhas contínuas) e temperatura (linhas tracejadas) em diferentes camadas da atmosfera solar, adaptado de [39].

As variações em períodos de horas a dias são atribuídas as manchas solares, fáculas e também devido às evoluções das regiões ativas. As mudanças na TSI em períodos de um ciclo solar de 11 anos são atribuídas a evolução das regiões ativas, redistribuição do campo magnético na superfície solar ou modificações na temperatura do Sol [5, 42].

A irradiância solar espectral (SSI) e total (TSI) têm sido medidas desde 1978 usando diferentes instrumentos no espaço, mas estas medidas apresentam discrepâncias. As medidas da irradiância solar em longas escalas de tempo são importantes para entender sua influência no clima da Terra, para isto são necessários modelos que permitam reconstruir séries temporais de irradiância total e espectral. Na seguinte seção se apresenta uma visão geral dos modelos.

5. Modelos de reconstrução da irradiância solar

Instrumentos têm sido desenvolvidos para medir a irradiância solar no espaço e observa-se diferenças nos valores obtidos devido às incertezas na calibração entre os instrumentos e a degradação em ambiente espacial (Figura 8). O desenvolvimento de modelos busca a obtenção de séries temporais da TSI e SSI em longas escalas de tempo.

As reconstruções da irradiância são utilizadas como parâmetros de entrada nos modelos de clima da Terra. Esses modelos avaliam como a atmosfera da Terra responde às mudanças de forças externas e dos gases de efeito estufa. Portanto, ajudam a entender as relações entre essas variações e o clima. Alguns modelos climáticos como o *Chemistry-Climate model (CCM)*, o *General Circulation Models (GCMs) e o Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* [1] mostram como as variações da irradiância solar afetam a atmosfera e o clima da Terra [2].

[1] `https://cmip.llnl.gov/cmip5/`

Figura 8: O registro de medidas da irradiância total (TSI) nos últimos 38 anos. As medidas de irradiância total apresentam diferenças devido à calibração dos instrumentos (radiômetros) e degradação dos radiômetros no espaço, adaptado de [43].

Progressos consideráveis foram alcançados na modelagem da irradiância solar total (TSI) e espectral (SSI). Em geral, assumiu-se que as variações na irradiância estão fortemente relacionadas às mudanças no campo magnético do Sol. Os primeiros modelos desenvolvidos foram chamados de modelos proxy. Esses modelos utilizaram índices como o campo magnético solar para reconstrução de séries temporais da irradiância empregando as áreas das manchas solares para obter mudanças na irradiância solar total [44, 45, 46].

Outros modelos têm sido desenvolvidos utilizando características da atmosfera solar e códigos de transferência radiativa. Esses códigos computam espectros estelares sintéticos usando bancos de dados de opacidade para modelagem de atmosferas estelares.

Por exemplo, o código *COde for Solar Irradiance (COSI)* [47], o *Solar Radiation Physical Modelling (SRPM)* [48], o programa *A Computer Program for Calculating Model Stellar Atmospheres (ATLAS)* [49] e *Spectral And Total Irradiance REconstructions (SATIRE)* [50, 51, 1, 52, 53, 54, 55]. Esses modelos possuem como componentes a área de superfície coberta de fenômenos magnéticos solares na fotosfera e sua evolução no tempo e o brilho desses fenômenos (manchas solares, fácula, grânulos, etc) em função da posição no disco solar e do comprimento de onda.

Uma reconstrução da irradiância total em tempo quase real, encontra se disponível no sítio web do Estudo e Monitoramento Brasileiro Do Clima Espacial (EMBRACE) no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)[2]. Nesta abordagem a TSI é estimada utilizando um modelo de rede neural *artificial Layer-Recurrent Network (LRN)*. O modelo baseia-se na relação da variabilidade da irradiância e na evolução do campo magnético solar. Os parâmetros de entrada são determinados a partir das observações. Assim as estruturas magnéticas são identificadas e classificadas de acordo com a área coberta do disco solar[3].

Um novo modelo, o CODET [25] pode modelar a irradiância solar espectral na banda EUV durante os dois últimos ciclos solares (Figura 9), a partir do campo magnético na fotosfera, extrapolações do campo magnético potencial (PFSS), desde a fotosfera até a coroa solar.

Através do desenvolvimento de modelos que permitam reconstruir a irradiância em longos períodos de tempo é possível analisar como ela pode influenciar o clima da terra em longas escalas de tempo. A seguir se apresenta

[2] `http://www2.inpe.br/climaespacial/SpaceWeatherTSIViewer/pt/inicio`
[3] `http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/tsi-sobre/`

Figura 9: Irradiância solar espectral na banda Ultravioleta Extremo nos comprimentos de onda 19,5 nm, 21,1 nm e 33,5 nm, nos dois últimos ciclos solares usando o modelo CODET (linha verde tracejada) e dados observados pelo satélite TIMED/SEE (linha azul) [25].

uma breve discussão sobre a influência de fatores como a emissão solar, gases de efeito estufa no clima da Terra.

6. A irradiância solar e o clima da Terra

O Sol é a fonte mais importante de energia da Terra. No entanto, outros fatores também influenciam o clima. A emissão de gases de efeito estufa é considerada uma fonte do aquecimento global [56]. Assim, outras fontes ou forçantes naturais como os oceanos, os vulcões e as de origem astronômica (Sol, raios cósmicos e radiação da supernova) podem influenciar o clima da Terra. Quantificar os níveis de aquecimento devido a esses gases e conhecer todas as fontes que contribuem é fundamental para entender o complexo sistema do clima da Terra e suas mudanças.

Observações dos parâmetros atmosféricos e oceânicos sugerem que o clima da Terra tem experimentado, constantemente, alterações globais e regionais durante a evolução do planeta [58, 59]. Esta variabilidade pode receber contribuições de fatores internos e externos. No entanto, a era industrial (~1760-1870) é caracterizada por um aumento global da temperatura (Figura 10), considerado excepcional [57]. Devido ao surgimento das fábricas e usinas termelétricas movidas a carvão mineral, as sociedades industriais passaram a liberar no ar dióxido de carbono CO_2 e outros gases de efeito estufa. Nesse cenário, a era industrial é responsável pelo acúmulo de gases na atmosfera e também sua influência na temperatura da Terra. Dessa forma, existem grandes incertezas sobre a evolução das forçantes naturais, por exemplo, a atividade solar. Além disso, os diversos elementos que compõem o sistema acoplado oceano-atmosfera respondem de maneira diferenciada aos forçantes.

O aumento da temperatura superficial do planeta é a manifestação mais evidente das mudanças climáticas ocorridas no último século. A Figura 10 mostra que grande parte do aumento da temperatura global ocorreu nos últimos 30 anos, sendo uma tendência de ~0,27°C por década. Entretanto, o aumento da temperatura não foi distribuído uniformemente no globo, como mostra a Figura 11, algumas regiões não apresentaram essa ten-

Figura 10: Anomalias de temperatura global média anual do ar a superfície em relação à climatologia de 1961-1990 obtidas a partir de quatro versões diferentes de dados (*Global Historical Climatology Network - GHCN, Climatic Research Unit temperature database - CRUTEM, Goddard Institute of Space Studies - GISS and Berkeley Earth Project*). Fonte: [57].

dência. Isso ocorre devido à resposta diferenciada dos diversos sistemas atmosféricos em escala regional. Outros parâmetros atmosféricos e oceânicos também registram alterações dos padrões climáticos. Por exemplo, é observado o derretimento das geleiras[4] [60], o aumento do nível do mar[5] [61], a diminuição da espessura do gelo no Ártico[6] [62] e um incremento na frequência de precipitação extrema em diferentes regiões [63].

O sistema climático terrestre é influenciado por uma complexa combinação de fatores, que envolvem desde a dinâmica até a composição química atmosférica. As suas variações são determinadas por muitas interações complexas entre a própria atmosfera e os oceanos, a criosfera e a biosfera. Além disso, existem grandes incertezas quanto à evolução dos forçantes naturais do sistema. Neste contexto, a quantificação das influências naturais e antrópicas nas mudanças globais do clima não é uma tarefa simples e requer compreender como cada subsistema responde aos diversos forçantes [65, 66].

A irradiância solar é a principal fonte de energia do sistema terrestre, sua variabilidade afeta os componentes neutros e ionizados da atmosfera. A variabilidade da irradiância solar em algumas regiões do espectro tem chamado atenção devido à sua importância para a química e a dinâmica da atmosfera terrestre. Enquanto, a TSI varia cerca de 0,1% [4] entre o máximo e o mínimo solar, as emissões no Ultravioleta variam de 3-4% em 200-300 nm até 100% próximo a linha de emissão Lyman-alpha (121,6 nm) [67, 68].

A importância das forçantes de origem solar na variabilidade climática regional são cada vez mais evidentes [69, 70]. Embora, ainda existam muitas incertezas, em relação aos mecanismos de transferências de energia no sistema Sol-Terra, tem-se observado um melhoramento na repre-

[4] https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/big-thaw/

[5] https://oceanservice.noaa.gov/facts/sealevel.html

[6] http://socientifica.com.br/2016/11/estudo-da-nasa_mostra_a_diminuicao_do_gelo_do_artico/

Figura 11: Anomalia de temperatura média decadal em relação ao período base de 1951 - 1980. O código de cores indica as tendências calculadas em cada região. Fonte: [64].

sentação destes forçantes do ponto de vista regional [71]. Em relação à escalas globais, recentemente, o 4.° relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* mostrou que a variabilidade solar representa cerca de 8% da influência no clima da Terrestre [2].

As relações entre a atividade solar e o clima têm sido amplamente estudadas nas últimas décadas. Dois eventos extremos no clima da Terra ocorreram: o mínimo de Maunder e o mínimo de Dalton (Figura 12). O mínimo de Maunder está relacionado com um grande mínimo na atividade solar, ou seja, o número de manchas solares alcançou um registro mínimo histórico. Esse fenômeno é associado com a Pequena era glacial na Terra [75, 76, 77]. Essa era está associada ao intervalo que ocorreu no entre 1645 até ~1715. Período em que as temperaturas médias anuais, em todo o hemisfério norte, decresceram. Um segundo evento foi relatado e é conhecido como o Mínimo de Dalton. Esse evento também é coincidente com registros de baixas temperaturas em algumas regiões, por exemplo, Inglaterra [78]. Isto caracteriza uma provável relação entre a baixa atividade solar e mudanças climáticas regionais. No entanto, até o momento ainda não há registro desse tipo de evento em outras regiões.

Para o estudo detalhado do clima da Terra são necessárias séries de fluxo magnético em escalas de tempo de anos até milênios. A Figura 12 apresenta variações no fluxo magnético desde o ano -5000 até o ano 2000. O modelo de campo aberto apresenta registro de variações na atividade solar. Então, verifica-se a importância de séries longas de fluxo magnético para entender como essas variações podem afetar o clima da Terra. O fluxo magnético solar que chega à Terra, depende da mudança das condições da superfície do Sol. Consequentemente, ao monitorar a taxa de produção de isótopos cosmogênicos (como C14) em nossa atmosfera, pode-se obter um histórico temporal de condições de mudança da superfície do Sol. As árvores, através da assimilação de dióxido de carbono, estabelecem um registro de C14 que fornece pistas sobre às mudanças na taxa de produção e variações no fluxo magnético [79].

Diferentes modelos foram desenvolvidos para tentar descrever as mudanças climáticas e a influência de diversos fatores como a irradiância (atividade solar) e gases de efeito estufa. Os *General Circulation Models (MCG)* fornecem uma simulação climática. Esses representam os processos físicos na atmosfera, oceano, criosfera e superfície terrestre e são capazes de simular a resposta do sistema climático global em relação ao aumento da

Figura 12: Reconstrução de fluxo magnético total a longo prazo a partir de dados do C14. A linha azul (desde o ano -5000 até 2000) é a reconstrução baseada no fluxo aberto obtido por [72] usando dados paleo-geomagnéticos [73]. A linha verde (marcado com um oval) é a reconstrução do fluxo magnético total com base no número de manchas solares desde 1700 dC. Adaptado de [74].

concentração dos gases de efeito estufa[7]. Também o *Coupled Chemistry-Climate Models (CCMs)* faz previsões das mudanças na estratosfera e como essas variações influenciam as mudanças climáticas[8]. De outro modo, o *the Chemistry-Climate Model Validation (CCMVal)* avalia como os modelos respondem às mudanças de forças externas de gases de efeito estufa e das substâncias que destroem o ozônio, portanto, ajudam a entender as relações entre a camada de ozônio e o clima [80].

[81] estimaram a climatologia da temperatura na baixa estratosfera usando os dados obtidos pelo radiômetro *Microwave sounding Units* (MSU) (Figura 13 a). Uma clara diminuição de temperatura entre 1979-1996 é apresentada, assim como, fortes aquecimentos causados pelas erupções dos vulcões El Chichon - México (1982) e do Mt. Pinatubo - Filipinas (1991). Para verificar possíveis relações entre o clima estratosférico e forçantes de origem solar, estes resultados são comparados com as observações da TSI realizadas por [4] (Figura 13 b), observando que as séries parecem estar em fase, concordando com a sugestão de [82] que descreve que a temperatura global na baixa estratosfera está aproximadamente em fase com a irradiância solar ultravioleta.

A irradiância solar espectral (SSI), em alguns comprimentos de onda, está relacionada às características de absorção na atmosfera terrestre e há uma correlação entre comprimento de onda e a altitude. É importante destacar que a absorção de UV e EUV e a sua relação com a química e a dinâmica da atmosfera da Terra podem afetar o clima. Em geral, dois mecanismos para a radiação solar influencia o clima da Terra: efeito da irradiância na faixa de UltraVioleta (UV) e o efeito da TSI. A TSI varia cerca de 0,1% ao longo do ciclo solar. Por outro lado, a maior variação na SSI ocorre na banda UV e afeta as bandas de absorção de ozônio [2].

As mudanças de circulação na estratosfera, na baixa atmosfera e na superfície estão relacionadas com a influência solar [83, 84]. De fato, as simulações de MCG são capazes de reproduzir o aquecimento troposférico e descrever a relação entre clima e variabilidade solar. No entanto, existem algumas incertezas, devido aos efeitos regionais. A relação entre a irradiância UV, o máximo

[7] http://www.ipcc\discretionary{-}{}{}data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
[8] https://doi.org/10.1175/BAMS-86-8-1117

Figura 13: As variações da temperatura na estratosfera desde 1979 até 2008 são apresentadas. (a) Anomalia de temperatura global na baixa estratosfera e sua relação com as erupções dos vulcões El Chichon e Mt. Pinatubo, a linha verde (ou linha contínua) indica tendência de longo período. (b) Observações da irradiância TSI no mesmo período. Fonte: [81].

solar e o aumento das temperaturas estratosféricas foram descritas por [2]. Essas relações ainda estão sendo estudadas e estão em debate.

7. Discussão

A era espacial oferece uma oportunidade importante para estudar a interações Sol - Terra graças ao uso de satélites. Eles observam constantemente o Sol e a atmosfera da Terra. Por outro lado, o estudo da emissão ou irradiância solar total e espectral são de grande importância, já que constituem uma ferramenta para estudar as relações com o clima da Terra. Apesar da relação entre irradiância total e clima da Terra não ser completamente entendida o IPCC estimou essa relação em $\sim$8%. De outro lado, é importante notar que muitos fatores afetam o clima da Terra e ainda estão em discussão e estudo. Além disso, essas relações podem ser estendidas para compreender estrelas semelhantes ao Sol, seus atmosferas e planetas.

Agradecimentos

Este trabalho é parcialmente apoiado pelo CNPq/Brasil no. 300596/2017-0 e 140503/2017-0.

Referências

[1] L.E.A. Vieira, S.K. Solanki, N.A. Krivova, and I. Usoskin, Astronomy & Astrophysics **531**, A6 (2011).
[2] I. Ermolli, K. Matthes, T. Dudok de Wit, N.A. Krivova, K. Tourpali, M. Weber, Y.C. Unruh, L. Gray, U. Langematz, P. Pilewskie, *et al.*, Atmospheric Chemistry & Physics **13**, 3945 (2013).
[3] M. Kretzschmar, J. Lilensten and J. Aboudarham, Astronomy and Astrophysics **419**, 345 (2004).
[4] C. Frohlich, Space Science Reviews **125**, 53 (2006).
[5] S.K. Solanki, N.A. Krivova and J.D. Haigh, Annual Review of Astronomy and Astrophysics **51**, 311 (2013).
[6] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, *et al.*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres **110**, D18 (2005).
[7] M.P. McCormick, L.W. Thomason and C.R. Trepte, Nature, **373**, 399 (1995).
[8] N,J. Shaviv, Physical Review Letters **89**, 051102 (2002).
[9] H. Svensmark, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **423**, 1234 (2012).
[10] L.E.A. Vieira, A. Norton, T. Dudok de Wit, M. Kretzschmar, G.A. Schmidt and M. Cheung, Geophysical Research Letters **39**, L16104 (2012).
[11] R. Resnick, D. Halliday, K. Krane, *Física* (Grupo Editorial Patria, México, 2008), p. 883.
[12] R. Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica, Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas* (Editora Campus, São Paulo, 1985), p. 19.
[13] K.L. Yeo, ArXiv 2014arXiv1412.3935Y (2014).
[14] T.N. Woods, P.C. Chamberlin, J.W. Harder, R.A. Hock, M. Snow, F.G. Eparvier, J. Fontenla, W.E. McClintock and E.C. Richard, Geophysical Research Letters **36**, L01101 (2009).
[15] J.R. Costa, J.R. Simões, F.R. Cardoso and M.V.O. Alves, Rev. Bras. Ensino Física **33**, 2302 (2011).
[16] K.S. Oliveira Filho e M,F.O. Saraiva, *Astronomia e Astrofísica* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2004).
[17] R. Mitalas and K.R. Sills, Astrophysical Journal **401**, 759 (1992).
[18] M. Stix, *The Sun: An Introduction* (Springer, Berlin, 2004), 2nd ed, p. 6.
[19] E. Echer, N. Rigozo, D. Nordemann, L.E. Antunes Vieira, A. Prestes e H. De Faria, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 157 (2003).
[20] J.L. Jenkins, *The Sun and How Observe It* (Springer, New York, 2009), p. 7.
[21] C.J. Schrijver and C. Zwaan, *Solar and Stellar Magnetic Activity* (Cambridge University Press, New York, 2000).
[22] D.H. Hathaway, Living Reviews in Solar Physics **7**, 65 (2010).
[23] P. Charbonneau, Living Reviews in Solar Physics **7**, 3 (2010).
[24] K. Petrovay, Living Reviews in Solar Physics **7**, 6 (2010).
[25] J.M. Rodríguez Gómez, *Modelling Density and Temperature Profiles in the Solar Corona Based on Solar Surface Magnetic Field Observations During the Solar Cycle 23 and 24.* Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.
[26] M. Dikpati and P.A. Gilman, Space Science Reviews **144**, 67 (2009).
[27] S. Solanki, The Astronomy and Astrophysics Review **11**,153 (2003).
[28] S. Solanki, in: *ASP Conference Proceedings 248*, edited by G. Mathys, S.K. Solanki and D.T. Wickramasinghe (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco, 2001), p. 45.
[29] J.C. Hall, Living Reviews in Solar Physics **5**, 532, (2008).
[30] M.S. Miesch, A.S. Brun, M.L. DeRosa and J. Toomre, Astrophysical Journal **673**, 557 (2008).
[31] M. Rieutord and F. Rincón, Living Review Solar Physics **7**, 82 (2010).
[32] A. Hart, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **116**, 38 (1956).
[33] M. Ryutova, *Physics of Magnetic Flux Tubes* (Springer-Verlag, Berlin, 2015).
[34] A. Bemporad, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **73**, 1117 (2011).
[35] A. Valio, *Nossa Estrela o Sol* (Livraria da Física, São Paulo, 2006).
[36] J.T. Mariska, Journal of the British Astronomical Association **103**, 138 (1993).
[37] L. Golub and J.M. Pasachoff, *The Solar Corona* (Cambridge University Press, Cambridge, 2009).
[38] S.R. Cranmer, Living Reviews in Solar Physics **6**, 66 (2009).
[39] M.J. Aschwanden, *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions* (Praxis Publishing Ltd., Chichester, 2005), 2nd ed.
[40] S.K. Solanki, Space Science Reviews **63**, 1 (1993).
[41] S.L. Bi and H.Y. Xu, Astrophysics and Space Science **279**, 191 (2002).
[42] S.K, Solanki, in: *35th COSPAR Scientific Assembly.* Paris, p. 318.

[43] G. Kopp, Journal of Space Weather and Space Climate **6**, 11 (2016).
[44] P. Foukal and J. Lean, Astrophysical Journal **302**, 826 (1986).
[45] L. Oster, K.H. Schatten and S. Sofia, Astrophysical Journal **256**, 768 (1982).
[46] P. Foukal and J. Vernazza, Astrophysical Journal **234**, 707 (1979).
[47] A.I. Shapiro, W. Schmutz, M. Schoell, M. Haberreiter and E. Rozanov, Astronomy and Astrophysics **517**, 13 (2010).
[48] J.M. Fontenla, J. Harder, W. Livingston, M. Snow and T. Woods, Journal of Geophysical Research (Atmospheres) **116**, D20 (2011).
[49] R.L. Kurucz, Kurucz CD-ROM No. 13 (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, 1993).
[50] K.L. Yeo, W.T. Ball, N.A. Krivova, S.K. Solanki, Y.C. Unruh and J. Morrill, Journal of Geophysical Research (Space Physics) **120**, 6055 (2015).
[51] W.T. Ball, N.A. Krivova, Y.C. Unruh, J.D. Haigh and S.K. Solanki, Journal of Atmospheric Sciences **71**, 4086 (2014).
[52] N.A. Krivova, S.K. Solanki and W. Schmutz, Astronomy and Astrophysics **529**, A81 (2011).
[53] N.A. Krivova, S.K. Solanki, M. Fligge and Y.C. Unruh, Astronomy and Astrophysics **399**, L1 (2003).
[54] M. Fligge, S.K. Solanki and Y.C. Unruh, Astronomy and Astrophysics **353**, 380 (2000).
[55] Y.C. Unruh, S.K. Solanki and M. Fligge, Astronomy and Astrophysics **345**, 635 (1999).
[56] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge University Press, New York, 2017) p. 996.
[57] J. Hartmann, D.L. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brnnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling , A. Kaplan, *et al.*, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* , editado por T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Cambridge University Press, Cambridge, 2013).
[58] J.H. Jungclaus, S.J. Lorenz, C. Timmreck, C.H. Reick, V. Brovkin, K. Six, J. Segschneider, M.A. Giorgetta, T.J. Crowley, J. Pongratz, *et al.*, Climate of the Past Discussions **6**, 723 (2010).
[59] D.T. Rodbell, G.O. Seltzer, D.M. Anderson, M.B. Abbott, D.B. Enfield and J.H. Newman, Science **283**, 516 (1999).
[60] S. O'Neel, E. Hood, A. Arendt and L. Sass. Climatic Change **123**, 329 (2014).
[61] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), in: NOAA Technical Report NOS CO-OPS 053, disponível em `www.tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech_rpt_53.pdf`.
[62] A. Lang, S. Yang and E. Kaas, Geophysical Research Letters **44**, 409 (2017).
[63] M. Donat, A. Lowry, M. Alexander, P. O'Gorman and N. Maher, Nature Climate Change **6**, 508 (2016).
[64] J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato and K. Lo, Reviews of Geophysics **48**, RG4004 (2010).
[65] J, Hansen, Mki Sato, P. Kharecha, G. Russell, D.W. Lea and M. Siddall, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **365**, 1925 (2007).
[66] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G.A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, *et al.*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres **110**, D18 (2005).
[67] L. Floyd, G. Rottman, M. Deland and J. Pap, in: *International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium* (ESA Publications Division, Noordwijk, 2003), SP-535.
[68] N.A. Krivova, S.K. Solanki and L. Floyd, Astronomy and Astrophysics **452**, 631 (2006).
[69] L.J. Gray, J. Beer, M. Geller, J.D. Haigh, M. Lockwood, K. Matthes, U. Cubasch, D. Fleitmann, G. Harrison, L. Hood, *et al.*, Reviews of Geophysics **48**, RG4001 (2010).
[70] A. Seppälä, K. Matthes, C.E. Randall and I.A. Mironova, Progress in Earth and Planetary Science **1**, 24 (2014).
[71] K. Matthes, Nature Geoscience **4**, 735 (2011).
[72] I.G. Usoskin, S.K. Solanki and G.A. Kovaltsov, Astronomy and Astrophysics **471**, 301 (2007).
[73] M. Korte and C.G. Constable, Geochemistry, Geophysics, Geosystems **6**, 2, (2005).
[74] L.E.Vieira and S.K. Solanki, Astronomy and Astrophysics **509**, A100 (2010).
[75] I.G. Usoskin, S.K. Solanki and G.A. Kovaltsov, in: *IAU Symposium, 286*, ed. C.H. Mandrini and D.F. Webb (Cambridge University Press, Mendoza, Argentina, 2012), p. 372-382.
[76] J. Luterbacher, R. Rickli, E. Xoplaki, C. Tinguely, C. Beck, C. Pfister and H. Wanner, Climatic Change **49**, 441 (2001).
[77] W. Schröder, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity **44**, 119 (1992).
[78] W. Schröder, *Beiträge zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik* 6. (AKGGP, Potsdam, 2005).
[79] M. Stuiver and T. Braziunas, Nature **338**, 405 (1989).
[80] O. Morgenstern, M.A. Giorgetta, K. Shibata, V. Eyring, D.W. Waugh, T.G. Shepherd, H. Akiyoshi, J. Austin, A.J.G. Baumgaertner, S. Bekki, *et al.*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres **115**, D3 (2010).
[81] L.A. Da Silva, P. Satyamurty, L.R. Alves, V.M. Souza, P.R. Jauer, M.V.D. Silveira, M.S. Echer, R. Hajra, C. Medeiros, J.P. Marchezi, *et al.*, Advances in Space Research **58**, 2090 (2016).
[82] J.L. Lean, D. Rind and P. Lonergan, in: *American Geophysical Union, Fall Meeting 2007*, abstract GC41B-01, 2007.
[83] K. Matthes, B. Funke, M.E. Anderson, L. Barnard, J. Beer, P. Charbonneau, M.A. Clilverd, T. Dudok de Wit, M. Haberreiter, A. Hendry, *et al.*, Geoscientific Model Development **10**, 2247 (2017).
[84] S. Ineson, A.A. Scaife, J.R. Knight, J.C. Manners, N.J. Dunstone, L.J. Gray and J.D. Haigh, Nature Geoscience **4**, 753 (2011).