

## O FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS COMO AGENTE DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

DANIELA DE SOUZA ONÇA

Geógrafa, aluna de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo  
[danielaonca@usp.br](mailto:danielaonca@usp.br)

**RESUMO:** Em tempos de grande destaque na ciência para teorias sobre o aquecimento global antropogênico, as discussões sobre os forçamentos naturais de mudanças climáticas costumam ser relegadas a segundo plano, apesar de sua importância na detecção de tendências. Um exemplo são as hipóteses solares, que viveram num certo ostracismo até meados da década de 1990, tanto pela rivalidade das hipóteses antropogênicas quanto pelas incertezas envolvidas nesta área. Até então, as investigações sobre a relação entre a atividade solar e o clima se baseavam em correlações estatísticas, não raro contestadas ou rejeitadas por conta da falta de uma explicação física satisfatória e pelo pouco significado estatístico de certos dados. Como correlações sozinhas não provam uma causalidade, é chegada a hora de encontrar mecanismos físicos que expliquem essas correlações. Neste artigo, narraremos o percurso desenvolvido pelas hipóteses solares de mudanças climáticas, destacando a mais recente delas, a da modulação do fluxo de raios cósmicos para a Terra, com seu papel na produção de núcleos de condensação e na variação do albedo planetário através da cobertura de nuvens. Veremos que a hipótese dos raios cósmicos constitui uma explicação plausível para as variações de temperatura observadas no século XX, bem como em períodos anteriores.

**PALAVRAS-CHAVE:** aquecimento global, forçamentos solares, cosmoclimatologia.

### COSMIC RAY FLUX AS A CLIMATE CHANGE DRIVER

**ABSTRACT:** In times when we give great prominence in science for anthropogenic global warming theories, discussions on natural forcings of climate change are commonly relegated to second place, in spite of its importance in detection of trends. Good examples are the solar hypothesis, which lived in a certain ostracism until the mid-1990s, as much for the rivalry of anthropogenic hypothesis as for the uncertainties involved in this area. Until then,

investigations on the relation between solar activity and climate were based in statistic correlations, commonly contested or rejected due to the absence of a satisfactory physical explanation and to the small statistic meaning of some data. As correlations alone don't prove causalities, it is time to find physical mechanisms able to explain these correlations. In this paper, we relate the road made by climate change solar hypothesis, highlighting the most recent of them, cosmic ray flux modulation and its role in cloud condensation nuclei production and planetary albedo variation due to cloud cover. We will see that cosmic ray hypothesis constitutes a plausible explanation for the observed 20<sup>th</sup> century temperatures, just as in previous periods.

**KEYWORDS:** global warming, solar forcings, cosmo-climatology.

**INTRODUÇÃO:** Em 1972, Carl Sagan e George Mullen publicaram um artigo na revista *Science* abordando o conhecido tema do paradoxo solar. Sabemos que a luminosidade solar não foi a mesma ao longo de toda a sua história; Sagan e Mullen estimam que ela tenha aumentado em 30% desde a criação do sistema solar até hoje. Se é assim, a temperatura média do nosso planeta esteve abaixo do ponto de congelamento da água do mar (aproximadamente 270K ou  $-3^{\circ}\text{C}$ ) antes de 2,3 bilhões de anos atrás; entre 4 e 4,5 bilhões de anos atrás a temperatura média do planeta foi de  $-10^{\circ}\text{C}$  (263K), o que torna bastante improvável a existência de grandes quantidades de água líquida durante esses períodos. Entretanto, existem evidências biológicas e geológicas da presença de grandes corpos d'água líquida no planeta, respectivamente, há 3,2 e 4 bilhões de anos atrás (SAGAN; MULLEN, 1972, p. 52). Ou seja, mesmo com um Sol mais fraco, nosso planeta exibia temperaturas que permitiam a existência de água em estado líquido. Como explicar esse fenômeno?

A explicação mais plausível encontrada pelos autores para esta discrepância está relacionada à composição atmosférica naqueles períodos, que exerceria um poderoso efeito estufa. Curiosamente, os autores não consideram o dióxido de carbono como o principal responsável por esse efeito, pois “as bandas de absorção mais fortes estão quase saturadas”. A molécula ideal, para os autores, deve absorver significativamente no infravermelho médio, entre 8 e 13  $\mu\text{m}$ , mesmo em pequenas quantidades. Os autores concluem que a amônia é a candidata mais apropriada, e que nossa atmosfera primordial era composta principalmente dessa substância e de quantidades semelhantes de metano e ácido sulfídrico, sendo que esses dois últimos não constituíam absorvedores tão eficientes. O dióxido de carbono e o vapor d'água, por sua vez,

estariam presentes em quantidades semelhantes às atuais. Posteriormente, nossa atmosfera foi sendo modificada devido ao desenvolvimento da vida e de processos geológicos (SAGAN; MULLEN, 1972, p. 53-54).

Esta hipótese de Sagan e Mullen ganhou grande destaque na academia a partir de então. Não apenas raramente foi contestada ou rivalizou com hipóteses alternativas, como também se tornou uma das peças-chave das hipóteses sobre o aquecimento global antropogênico (que se desenvolveram a olhos vistos a partir da segunda metade da década de 1970), pois sugeria que a composição atmosférica era a grande determinante da temperatura do nosso planeta. Contudo, sabemos que isso não é verdade e que a temperatura de nosso planeta é determinada por um grande conjunto de fatores. Vejamos as teorias que abordam o papel do Sol para o nosso clima.

**A HIPÓTESE DAS MANCHAS SOLARES:** A maior parte da energia solar recebida pelo nosso planeta origina-se na fotosfera solar, cuja temperatura de emissão é aproximadamente 6000K. No entanto, o total de energia que chega à Terra não é constante, mas varia em função do nível de atividade solar, que provoca o conhecido ciclo de manchas solares.

O ciclo magnético solar começa quando um campo poloidal fraco e de extensão global é esticado pela rotação não-uniforme da estrela (mais rápida no equador que nos pólos), varrendo linhas de campo em uma configuração azimutal que se fortalece conforme o Sol gira. Movimentos espiralados surgindo da convecção criam pequenas curvas de campo magnético flutuante que entram em erupção nas latitudes médias do Sol no início do ciclo, mais tarde entrando em erupção nas baixas latitudes conforme o campo magnético se fortalece em direção ao pico do ciclo. A persistente difusão de subsuperfície finalmente consegue relaxar o campo e encerra o ciclo, recomeçando novamente com um campo poloidal fraco. Além disso, ocorre uma reversão de polaridade do campo magnético de um ciclo para outro: as manchas no hemisfério norte tendem a exibir uma polaridade durante um ciclo, enquanto a outra polaridade predomina no hemisfério sul. No ciclo seguinte, o padrão é invertido (BALIUNAS, in MICHAELS (org.), 2005, p. 215).

O centro de uma mancha solar típica tem uma temperatura de emissão em torno de 1700K abaixo da média da fotosfera, ou seja, 25% a menos. Seus tamanhos e durações variam de algumas centenas de quilômetros de diâmetro, durando um dia ou dois, até aquelas de dezenas de milhares de quilômetros, que duram vários meses. Em média, elas duram uma semana ou

duas, cobrindo uma área do disco visível do Sol que varia entre 0 e 0,1%. Porém, as manchas solares são acompanhadas por regiões mais brilhantes, chamadas fáculas, que cobrem uma fração de área muito maior que as manchas solares, com as quais elas parecem estar associadas. As fáculas são aproximadamente 1000K mais quentes que a média da fotosfera, e emitem 15% mais energia. No final das contas, as fáculas conseguem compensar e mesmo superar o decréscimo de radiação das manchas, o que faz com que o máximo de irradiação ocorra nos picos de atividade solar (HARTMANN, 1994, p. 289). Através de observações e registros, pudemos descobrir a duração dos ciclos de manchas: sua média é de 11 anos, mas esse valor também varia, com os ciclos menores geralmente produzindo um número maior de manchas. Também são evidentes variações na magnitude do ciclo solar em múltiplos dos ciclos de 11 anos, com uma redução significativa de atividade em diversos períodos, conhecidos como *mínimos*: no século XIII, o mínimo de Wolf; no século XV, o mínimo de Spörer; entre 1645 e 1715, o mínimo de Maunder, quando as manchas estiveram virtualmente ausentes; e no início do século XIX, o mínimo de Dalton (HARTMANN, 1994, p. 289).

Observações a olho nu das manchas solares foram realizadas na China e na Grécia há mais de 2000 anos, com observações sistemáticas registradas na China ao longo de uma boa parte desse período. Como a Igreja Católica na Europa havia declarado o Sol um corpo celeste perfeito e sem mácula, a idéia de registrar as manchas solares requereria uma rebeldia considerável, como no caso de Galileu. No entanto, a invenção do telescópio ajudou a destruir a noção do Sol como uma esfera cristalina perfeita, e assim, começaram as observações sistemáticas no ocidente. O astrônomo Sir William Herschel (1738-1822) notou que o número de manchas aparentes no Sol aumentava e diminuía ao longo dos anos, e estudou sua possível conexão com mudanças climáticas. Herschel supôs que períodos de manchas numerosas “poderiam fazer-nos esperar por abundante emissão de calor e portanto estações suaves”, contrastando com as “estações severas” e “pouca emissão de calor” em épocas de poucas manchas. Herschel examinou cinco longos períodos em que houve poucas manchas e comparou-os ao preço do trigo na Inglaterra como um indicador climático local, na expectativa de que a colheita do trigo fosse adversamente afetada pela baixa atividade solar, porém as evidências em favor de sua hipótese eram muito escassas, o que o fez desistir de tentar encontrar alguma correlação (BALIUNAS, in MICHAELS (org.), 2005, p. 213-214).

Um pouco mais persistente foi Charles Greeley Abbot, do Smithsonian Astrophysical Observatory. Abbot descobriu que a chamada *constante solar* (o total de energia que chega à Terra por área e por tempo) não era tão constante assim, o que ele atribuiu à passagem das

manchas sobre o disco solar. Em períodos de alguns anos, a variação do brilho solar parecia chegar a um por cento. Já em 1913 Abbot anunciou uma forte correlação entre o ciclo de manchas solares e as variações de temperatura na Terra, defendendo sua teoria contra quaisquer objeções e anunciando as potencialidades dos estudos solares para a melhoria da previsão meteorológica. No entanto, muitas dessas previsões falharam, sendo a mais célebre a de uma seca na África na década de 1930, quando o que vivenciamos ali foi um período úmido. Os estudos relacionando as manchas solares e a temperatura, então, perderiam sua boa reputação durante muito tempo (WEART, 2003, p. 16-17). O papel do Sol sobre as mudanças climáticas terrestres seria então cada vez mais relegado a segundo plano, apesar de sua importância na detecção de tendências, tanto pela rivalidade representada pelas hipóteses antropogênicas quanto pelas incertezas envolvidas nesta área.

De acordo com Hartmann, a variação da radiação de alta energia e de partículas associadas às explosões solares efetivamente tem uma influência significativa na alta atmosfera. No entanto, não seria esse o caso em superfície ou na troposfera. O efeito das manchas no saldo total de energia do Sol é desprezível, e sua influência sobre o clima da Terra é pequena. A variação de irradiação entre o mínimo e o máximo de atividade solar nos ciclos de 11 anos é de no máximo  $1,5\text{W/m}^2$ , o que produziria uma oscilação de temperatura menor que  $0,1^\circ\text{C}$ . Além disso, os ciclos de 11 anos seriam muito curtos para a escala climática. Os sistemas naturais, principalmente os oceanos (que, por sua alta capacidade térmica, são grandes reguladores do clima), sofreriam uma mudança irrisória em face de um ciclo tão curto e de magnitude tão pequena. Desse modo, afirma Hartmann, quando tratamos das mudanças climáticas, com exceção das primeiras eras geológicas, podemos tomar o Sol como uma fonte constante de energia (HARTMANN, 1994, p. 287-291).

Entretanto, existem posições divergentes; alguns autores creditam maior importância à atividade solar. Lamb aponta que entre os anos de 1915 e 1964, um período de temperaturas mais altas, a duração média do ciclo foi de 10,2 anos, com um número mais elevado de manchas, o mesmo se dando em outros períodos quentes como o final do império romano e a alta idade média. Ao contrário, o mínimo de Spörer, com um ciclo de duração de 12 anos, e o mínimo de Maunder parecem coincidir com períodos de clima mais frio, aproximadamente a Pequena Idade do Gelo na Europa (LAMB, 1995, p. 320-321). Hoyt e Schatten também acreditam que o Sol possa contribuir com as mudanças climáticas terrestres. Examinam diversos trabalhos sobre as variações climáticas e variações solares de diversos tipos, que, segundo eles, indicam, apesar de não provar, uma relação entre ambos os fenômenos. São

discutidos o nível de atividade solar – quantidade de manchas, os ciclos de onze anos e múltiplos desses ciclos, relacionando o mínimo de Maunder à Pequena Idade do Gelo; variações na duração dos ciclos, relacionando-as à amplitude das variações térmicas; estrutura das manchas solares, cujas regiões mais ou menos escurecidas determinariam menor ou maior irradiação e a rotação do Sol, que seria mais ou menos acelerada em diferentes épocas. Para os autores citados, não seria plausível que todos esses fenômenos solares ocorressem sem nenhuma variação em seu brilho. Os diversos trabalhos citados sugerem não apenas tal variação, mas também uma certa influência sobre as temperaturas da Terra (HOYT; SCHATTEN, 1997). Veja-se como exemplo a figura 1, em que os autores tentam demonstrar alguma correlação entre as temperaturas do planeta e a radiação solar:

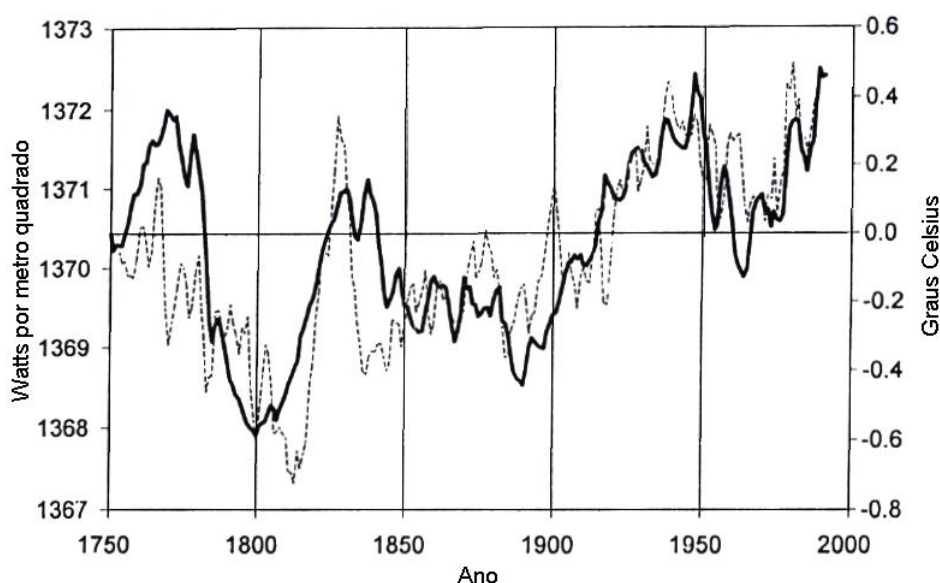


Figura 1 – Variação da temperatura média anual do hemisfério norte (linha mais clara) e a irradiação solar em  $W/m^2$  (Groverman; Landsberg, 1979; Hansen; Lebedeff, 1988; in HOYT; SCHATTEN, 1997, p. 196)

Friis-Christensen e Lassen também tentaram estabelecer, no início da década de 1990, uma correlação entre o número de manchas solares e a temperatura verificada no planeta, ilustrada na figura 2a, mas que foi considerada pouco satisfatória pelos autores. Eles sugerem, dessa forma, um parâmetro de melhor correlação com a temperatura, a duração do ciclo de manchas solares, apresentada na figura 2b. O bom ajuste entre as curvas sugere, apesar de não provar, uma influência direta da atividade solar sobre a temperatura global (FRIIS-CHRISTENSEN; LASSEN, 1991, p. 699).



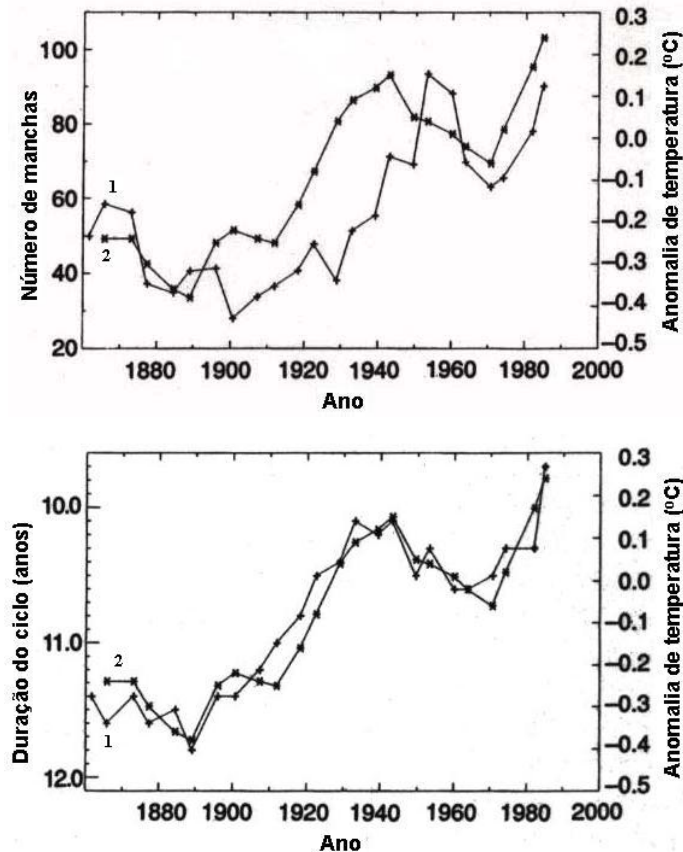


Figura 2 – *a* (acima): número de manchas solares (linha 1) e anomalias globais de temperatura em °C (linha 2). *b* (abaixo): duração do ciclo de manchas solares em anos (linha 1) e anomalias globais de temperatura em °C (linha 2) (FRIIS-CHRISTENSEN; LASSEN, 1991, p. 699-700).

Friis-Christensen e Lassen, assim como seus predecessores no estudo dos forçamentos solares, apenas diagnosticam a correlação, sem fornecer alguma explicação física que pudesse justificar a concordância entre as variáveis estudadas. Mas como pequenas mudanças na luminosidade solar poderiam exercer tão grande influência sobre o clima? Se a variação de energia entre a produção mínima e máxima de manchas é tão pequena, como justificar algumas boas correlações encontradas? Como correlações sozinhas, por melhores que sejam, não provam uma causalidade, as hipóteses solares permaneciam em estágio especulativo. Em meados da década de 1990, porém, outro fator relacionado à atividade solar começava a despontar.

**A MODULAÇÃO DO FLUXO DE RAIOS CÓSMICOS:** Se a variação da radiação solar é pequena e, dessa forma, não parece ser um forçamento significativo de mudanças climáticas, talvez exista algum outro mecanismo regulado pelo ciclo de atividade solar que, de maneira

indireta, interfira no orçamento de energia terrestre. Muitos autores sugerem a modulação do fluxo de raios cósmicos pelo Sol como um importante forçamento climático. Vejamos como ela acontece.

A maior parte da vida das estrelas é passada na chamada *seqüência principal*, quando elas emitem energia através do processo de  *fusão nuclear*, no qual os átomos de hidrogênio de que são compostas são fundidos para formar átomos de hélio. Quando o estoque de hidrogênio do núcleo está próximo do fim, a energia disponível permite iniciar a fusão dos átomos de hélio para formar átomos de carbono. Em estrelas muito massivas, por conta da forte compressão do núcleo pela gravidade, a fusão do hidrogênio é mais intensa e a duração da seqüência principal é menor. Após a formação dos núcleos de hélio e de carbono, a temperatura ali ainda é alta o suficiente para continuar o processo de fusão, formando elementos mais pesados em intervalos de tempo cada vez menores. No entanto, uma vez formado o núcleo de ferro, a estrela já não dispõe de energia para prosseguir a fusão. Não podendo resistir à pressão da gravidade, a estrela sofre uma implosão; seus átomos colapsam, formando nêutrons, e, com a energia concentrada, sofre o que chamamos de *explosão de supernova*, gerando um objeto de brilho bilhões de vezes maior que o nosso Sol durante algumas semanas. Seu núcleo morto será um objeto muito denso e em rápida rotação, a estrela de nêutrons. Já as camadas superiores, impulsionadas pela grande quantidade de energia disponível, entrarão em reações e formarão os diversos elementos químicos encontrados na natureza, além de um sem-número de partículas subatômicas que viajarão pelo espaço a velocidades próximas à da luz. Estes são os chamados *raios cósmicos*.

Não haveria vida na Terra se todos os raios cósmicos que caminham em nossa direção atingissem a superfície do planeta. É o campo magnético solar quem se encarrega de repelir e desviar a trajetória de aproximadamente metade dos raios cósmicos que poderiam nos atingir. Esta esfera de atuação solar é chamada de *heliosfera* e mede aproximadamente  $1,5 \times 10^{10}$  km, extrapolando em muito, portanto, os limites do sistema solar. Seu tamanho varia em função do vento solar (partículas ejetadas pelo Sol, predominantemente prótons e elétrons) nos anos anteriores. Quando a atividade solar é mais intensa, evidenciada por um número mais elevado de manchas, a heliosfera é maior e consegue repelir e desviar um número maior de raios cósmicos, ocorrendo o oposto em períodos de atividade mais fraca (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 45-50).



Após passarem um dia ou dois transitando pela heliosfera, os raios cósmicos remanescentes em nossa direção enfrentam uma outra barreira, a magnetosfera terrestre, que também repele e desvia a trajetória de parte deles. Tal processo é mais eficiente no equador que nos pólos, pois ali as linhas de campo magnético estão paralelas à superfície, o que dificulta a passagem dos raios. Por fim, os raios que atravessam a magnetosfera enfrentam ainda uma terceira barreira, a atmosfera terrestre, que mesmo rarefeita nas altitudes elevadas é muito mais densa do que qualquer coisa que os raios cósmicos encontraram em toda sua trajetória pelo espaço – do contrário, não teriam chegado até aqui. Ao entrar em contato com os átomos de nossa atmosfera, eles produzirão uma chuva de novas partículas, os chamados raios cósmicos secundários, que atingem um pico de produção a cerca de 15 quilômetros de altitude e decrescem a partir daí, com muito poucos conseguindo atingir a superfície terrestre (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 50-54).

Do conjunto de partículas que atingem o nível do mar, 98% são os *muons*, partícula semelhante ao elétron mas com massa 200 vezes maior. Duram apenas dois milionésimos de segundo, decompondo-se então em um elétron e dois neutrinos, mas, por serem pouco reativos e muito velozes, conseguem adentrar os oceanos e ainda as rochas do planeta. Os 2% restantes são predominantemente os poucos prótons e nêutrons que não reagiram com os gases atmosféricos em sua trajetória. 60% dos muons que atingem os 2000 metros de altitude ou menos são produtos de partículas tão energéticas que o campo magnético solar não oferece proteção contra elas. Assim sendo, essa fração não está sujeita a variações, pelo menos não em escalas de séculos ou inferiores. 37% deles são produto de partículas de média energia, sujeitas à atuação da barreira solar e, conseqüentemente, a variações de quantidade de acordo com a atividade magnética do Sol. Finalmente, 3% são produto de partículas de baixa energia, sujeitas primeiro ao controle do Sol e depois da Terra. Svensmark e Calder concluem daí que a variabilidade dos muons disponíveis em baixas altitudes é ditada fundamentalmente pelo magnetismo solar e apenas em menor grau pelo terrestre, ou seja, mesmo grandes variações no campo magnético terrestre resultam em variações climáticas pouco sensíveis, ao passo que variações comparativamente menores do campo magnético solar podem ser traduzidas em efeitos mais notáveis (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 55-56, 59-61).

Vários autores no passado sugeriram possíveis conexões entre a estrutura atmosférica e a incidência de raios cósmicos. Ney especulou sobre alguma conexão entre o nível de ionização da atmosfera e a formação de nuvens de tempestades, com suas conseqüências para a temperatura do planeta. De acordo com o autor, quando a atmosfera apresenta menor

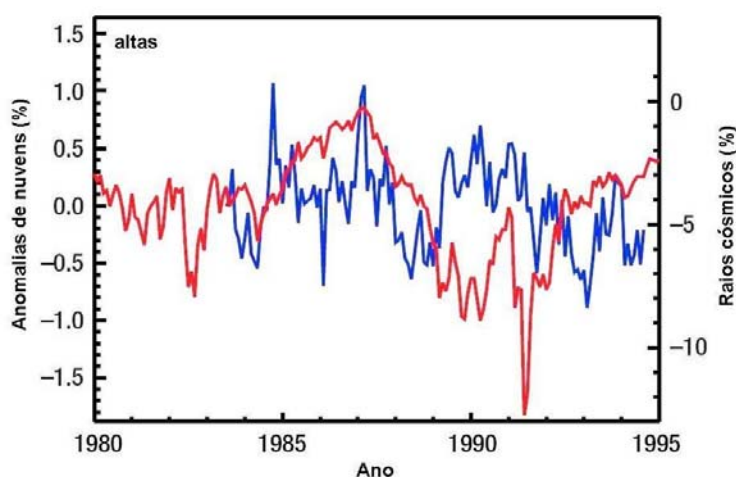
condutividade, aumentam as tempestades e a maior cobertura de nuvens daí resultante resfriaria o planeta; os picos de produção de manchas solares coincidiriam, assim, com períodos mais frios (NEY, 1959, p. 452). Markson e Muir, por sua vez, postulam que os ciclos de atividade solar, ao aumentar a ionização atmosférica, intensificam o campo elétrico terrestre, o que pode aumentar o número e a eletrificação dos cumulonimbus: “O efeito elétrico da atmosfera sobre a eletrificação das nuvens, intensificação das chuvas e dinâmica das nuvens parece a maneira mais provável de a atividade solar influenciar rapidamente as variações espaciais e temporais de energia atmosférica” (MARKSON; MUIR, 1980, p. 988). Para Dickinson, a possível conexão entre a eletricidade atmosférica, tempestades e outros processos meteorológicos merece maior consideração, mas outros mecanismos parecem ser mais promissores. Dickinson também aposta na ionização provocada pelos raios cósmicos na atmosfera, mas agora como um processo auxiliar na formação de gotas. Sabe-se que os íons atmosféricos atuam diretamente na nucleação das gotas das nuvens; porém, o autor aponta que esse mecanismo, sozinho, ainda requer uma supersaturação muito elevada para a formação das nuvens, que nunca ocorre na troposfera por conta da existência dos núcleos de condensação, que permitem a formação de gotas sob saturações pouco elevadas. Dickinson, então, levanta a hipótese de que os íons atmosféricos decorrentes dos raios cósmicos, de alguma forma ainda inexplicada, atuam na formação de aerossóis de ácido sulfúrico, o principal núcleo de condensação atmosférico, e este, por sua vez, atua diretamente na formação das nuvens (DICKINSON, 1975, p. 1246-1247).

No final do ano de 1995, Henrik Svensmark, do Instituto Meteorológico Dinamarquês, comparando as médias mensais de chegada de raios cósmicos à Terra obtidas pela Estação John Simpson (Colorado) com registros mensais de cobertura de nuvens oceânicas obtidos de satélites geoestacionários equatoriais dos EUA, Europa e Japão, notou uma correlação muito boa entre as variáveis. Entre os anos de 1984 e 1987, mais raios cósmicos chegaram à Terra e a cobertura de nuvens aumentou em 3%. A partir de então, a quantidade de raios cósmicos declinou até 1990 e a cobertura de nuvens também declinou, em cerca de 4%. Tais resultados, embora ainda não explicados fisicamente, pareciam sugerir que as variações na cobertura das nuvens estão relacionadas à incidência de raios cósmicos, com óbvias conseqüências para as variações da temperatura média global (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 69-71).

As reações à descoberta de Friis-Christensen e Svensmark (agora trabalhando em conjunto), como era de se esperar, não foram de forma alguma amigáveis. De há muito a comunidade climatológica vinha consolidando mais e mais a hipótese do aquecimento global

antropogênico, de modo que qualquer fator de mudança climática não relacionado a gases estufa industriais era no mínimo recebido com forte desconfiança. Entre as muitas críticas recebidas, os autores citam Bert Bolin, um dos principais autores do IPCC até sua morte em dezembro de 2007, que deu sua opinião em um jornal dinamarquês em 1996: “Eu acho a proposta desses dois extremamente ingênuo e irresponsável cientificamente”. Obtenção de financiamento e aceitação de publicações tampouco constituíram sagas menores (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 73-75).

De acordo com Svensmark e Calder, satélites da NASA lançados na década de 1980 fizeram reveladoras medições sobre os totais radiativos terrestres. Concluiu-se que, de fato, as nuvens são agentes fortemente resfriadores. 60% do total dessa atuação é de responsabilidade das *nuvens de baixos níveis*, pois além de barrar a radiação solar, seus topos relativamente quentes irradiam eficientemente a energia para o espaço. Destas nuvens, as mais importantes são os stratocumulus, que comumente se estendem por cerca de 20% da superfície terrestre, em especial sobre os oceanos. Em 1998, a equipe de Friis-Christensen e Svensmark, dando prosseguimento à investigação, concluiu que, conforme ilustrado nos gráficos abaixo, são justamente as nuvens de baixos níveis as mais suscetíveis às variações na quantidade de raios cósmicos, exibindo uma correlação de 0,92. A explicação mais simples para este fato é a de que, por conta da permanente menor quantidade de raios cósmicos em baixos níveis, ali as variações serão mais significativas (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 67, 76-77).



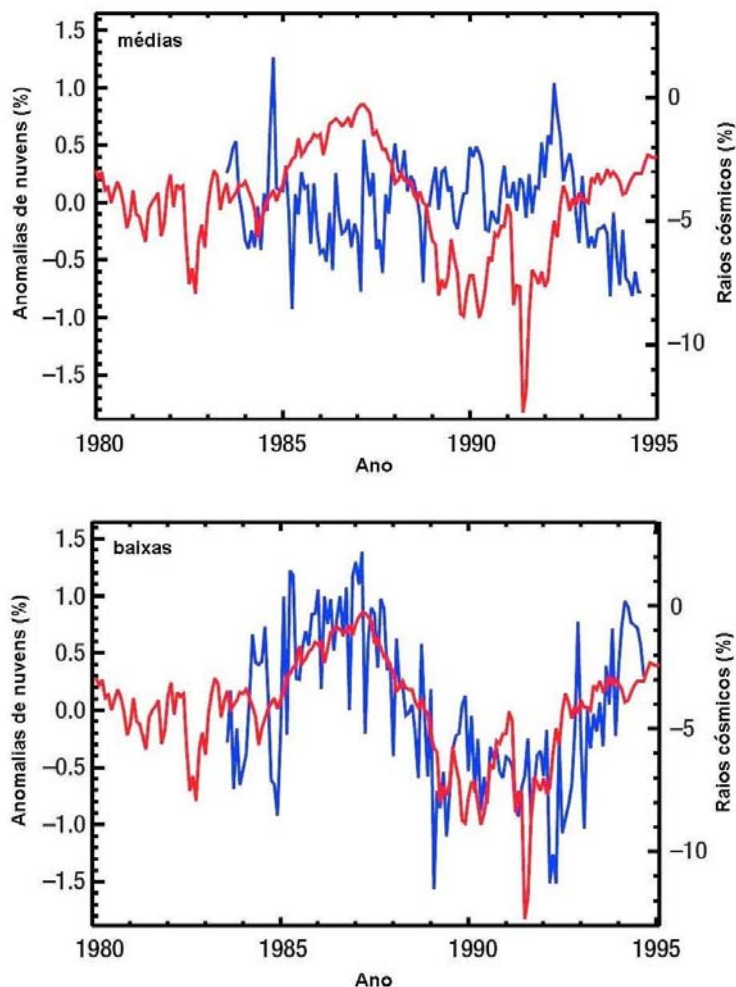


Figura 3 – Anomalias de nuvens de altos, médios e baixos níveis (linha azul) e o fluxo de raios cósmicos na Terra (linha vermelha) (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 77)

Os autores então dedicam alguns parágrafos à discussão sobre o fraco tratamento dispensado às nuvens mesmo nos modelos climáticos mais avançados e às incertezas que tal fato impõe à previsão climática de longo prazo (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 63-66). Neste ponto, acreditamos não ser sequer necessário recorrer aos céticos do aquecimento global para tecer uma crítica. Qualquer leitura rasteira dos relatórios mais recentes do IPCC revelará qual o nosso estágio de conhecimento sobre as nuvens e as dificuldades envolvidas.

O campo magnético solar, de maneira geral, aumentou ao longo do século XX, embora não de maneira regular. Elevou-se durante a primeira metade do século, depois diminuiu entre as décadas de 1960 e 1970, voltou a se elevar até cerca de 1980 e, apesar de ter parado de crescer, não diminuiu significativamente após essa data. Curiosamente, sabemos que as temperaturas globais seguiram aproximadamente esse mesmo padrão, elevando-se na primeira metade do século, diminuindo nas décadas seguintes e voltando a se elevar nas décadas finais.

No total, a intensidade do campo magnético solar experimentou um aumento de 131% (ou seja, mais que dobrou) entre os anos de 1901 e 1995. A conseqüente redução no fluxo de raios cósmicos no período foi de 11%, o que se traduziu numa redução de 8,6% na cobertura global das nuvens de baixos níveis, resultando num forçamento radiativo para o sistema climático de  $+1,4 \text{ W/m}^2$ . Coincidência ou não, é um valor muito próximo ao  $+1,46 \text{ W/m}^2$  creditado pelo IPCC no relatório de 2001 ao aumento de dióxido de carbono na atmosfera resultante das atividades humanas a partir da Revolução Industrial (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 79-82, 94).

Os autores descrevem cuidadosamente os experimentos controlados desenvolvidos para investigar como os raios cósmicos atuam na formação das nuvens, bem como a imponente saga para a obtenção de financiamentos para a pesquisa. Os experimentos conduziram a uma conclusão muito semelhante à hipótese já levantada por Dickinson, a de que os elétrons liberados pela desintegração dos muons atuam como *catalisadores* na formação primordial de aerossóis de ácido sulfúrico. Ligado a uma molécula de oxigênio, um único elétron é suficiente para torná-la atrativa para as moléculas de água. Várias delas se juntam, formando um aglomerado. Ativado pelo ozônio e abastecido com dióxido de enxofre, o aglomerado de água se torna um centro onde o ácido sulfúrico é produzido e acumulado. Quando o aglomerado já estocou algumas moléculas do ácido e se torna estável, o elétron inicial pode sair, encontrar outra molécula de oxigênio e reiniciar todo o processo (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 112-116, 127-129).

A variabilidade dos raios cósmicos em função da atividade solar descrita até agora fornece uma explicação para as pequenas mudanças climáticas ocorridas durante o século XX. Mas o que dizer das extraordinárias mudanças ocorridas em milênios e períodos geológicos passados? De acordo com os trabalhos do astrofísico Nir Shaviv, do Racah Institute of Physics da Universidade Hebraica de Jerusalém, citado pelos autores, a incidência de raios cósmicos também pode ser a responsável por esses fenômenos. No entanto, não será mais o Sol o grande regulador das mudanças, mas sim os braços da Via-Láctea e nossas passagens por eles (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 136).

As hipóteses galácticas de explicação de mudanças climáticas também não são novas. Frakes comenta rapidamente a possibilidade de nossa translação em torno do centro da Via-Láctea estar envolvida nas glaciações do pré-cambriano, porém sem deixar claro de que maneira esta translação afetaria o balanço de energia da Terra (FRAKES, 1979, p. 48). Shaviv usará o mecanismo da hipótese de Copenhague para explicar as mudanças de períodos remotos, mas



com a quantidade de raios cósmicos agora determinada por nossas passagens pelos braços da Via-Láctea: quando adentramos um deles, ficamos mais próximos de aglomerados de estrelas e, portanto, mais expostos aos raios cósmicos, o que faz a temperatura média subir; ao contrário, ao sairmos dos braços, ficamos menos expostos a eles e as temperaturas se elevam (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 138).

As variações no fluxo de raios cósmicos que surgem da nossa trajetória pela galáxia são dez vezes maiores do que as variações devidas à atividade solar, nos raios cósmicos de alta energia responsáveis por ionizar a baixa atmosfera. Se o Sol é responsável por variações na temperatura global de cerca de 1°C, o efeito da passagem pelos braços da espiral deve ser de cerca de 10°C. É mais que o suficiente para deslocar a Terra do ‘modo quente’, onde climas temperados se estendem até as regiões polares, para o ‘modo frio’, com capas de gelo sobre os pólos, como é o caso hoje. Na verdade, acredita-se que o efeito dos braços da espiral são o condutor dominante de mudanças climáticas em períodos de centenas de milhões de anos (SHAVIV 2005, citado por SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 138).

Os autores, então, correlacionam ocorrências climáticas e biológicas a partir do Cambriano às passagens de nosso sistema solar pelos braços da Via-Láctea, num ciclo de cerca de 143 milhões de anos (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 141-147). Além da órbita pela galáxia, nosso sistema solar também executa um movimento de subida e descida em relação ao disco galáctico, semelhante a um golfinho, com um período de aproximadamente 34 milhões de anos. Novamente, quanto mais próximos do disco, maior a incidência de raios cósmicos e menor a temperatura (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 152).

Grandes acontecimentos cósmicos, conjecturam os autores, também podem estar relacionados ao clima terrestre. Colisões de galáxias provocam ondas de choque que comprimem nuvens de gás e poeira, transformando-as em estrelas. Se numa galáxia “isolada” a taxa média de formação de estrelas é de duas por ano, em momentos de colisão esse número pode ser 50 ou 100 vezes maior. Se esses *baby-booms* estelares criarem muitas estrelas massivas (que, conforme já vimos, têm vida mais curta), corresponderão também a um aumento na formação de raios cósmicos. Sabemos que o período entre 2,4 e 2 bilhões de anos atrás correspondeu a um baby-boom estelar em nossa galáxia, e que este é um período de ocorrência de fortes glaciações. Resta-nos saber se esta é apenas uma feliz coincidência ou mais uma relação entre o fluxo de raios cósmicos e as mudanças climáticas em nosso planeta (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 160-166).

Por fim, a teoria dos raios cósmicos fornece uma explicação alternativa ao *paradoxo solar*, descrito no início deste trabalho. Sabemos que o jovem Sol tinha uma rotação pelo menos dez vezes mais rápida que a atual, sua atividade magnética era muito vigorosa e o vento solar era

mais denso. Como resultado, pouquíssimos raios cósmicos conseguiam atingir a Terra, mantendo assim as temperaturas elevadas (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 166-169).

**CONSIDERAÇÕES FINAIS:** As potencialidades da hipótese dos raios cósmicos para explicar as mudanças climáticas são notórias. Contudo, há e certamente continuará havendo forte resistência da ala *global warmer* da comunidade climatológica em compreender a importância dos raios cósmicos para o clima de nosso planeta ou ao menos aceitar a necessidade de aprimoramento dessa teoria. Diante deste estado de coisas, de uma climatologia que de há muito não reconhece suas limitações e encontra certezas quando ainda não formulou sequer sólidas hipóteses, talvez seja útil ouvir um singelo conselho dos autores: “deve-se ser paciente com esses cientistas da Terra que ainda imaginam que o terceiro planeta de uma estrela indistinta é grandioso demais para ser influenciado de alguma maneira significativa por tolas particulazinhas do espaço sideral” (SVENSMARK; CALDER, 2007, p. 45).

## REFERÊNCIAS

BALIUNAS, Sallie. Possible effects of solar variability on the Earth's ecosystems. In: MICHAELS, Patrick J. (org.). **Shattered consensus: the true state of global warming**. Oxford, Rowan & Littlefield Publishers, 2005.

DICKINSON, Robert E. Solar variability and the lower atmosphere. In: **Bulletin of the American Meteorological Society** 56, nº 12, dez/1975, p. 1240-1248.

FRAKES, Lawrence A. **Climates throughout geologic time**. New York, Elsevier, 1979.

FRIIS-CHRISTENSEN, Eigil; LASSEN, Knut. Length of the solar cycle: an indicator of solar activity closely associated with climate. In: **Science** 254, 1/nov/1991, p. 698-700.

HARTMANN, Dennis L. **Global physical climatology**. San Diego, Academic Press, 1994.

HOYT, Douglas V; SCHATTEN, Kenneth H. **The role of the sun in climate change**. New York, Oxford; Oxford University Press, 1997.

LAMB, Hubert H. **Climate, history and the modern world**. London, New York; Methuen, 1995.

MARKSON, Ralph; MUIR, Michel. Solar wind control of the Earth's electric field. In: **Science** 208, nº 4447, 30/mai/1980, p. 979-990.

NEY, Edward P. Cosmic radiation and the weather. In: **Nature** 183, 14/fev/1959, p. 451-452.

SAGAN, Carl; MULLEN, George. Earth and Mars: evolution of atmospheres and surface temperatures. In: **Science** 177, 7/jul/1972, p. 52-56.

SVENSMARK, Henrik; CALDER, Nigel. **The chilling stars: a new theory of climate change**. Cambridge, Icon Books, 2007.

WEART, Spencer R. **The discovery of global warming**. Harvard, Harvard University Press, 2003.