



AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE UM NOVO MÍNIMO SOLAR E DO AUMENTO  
DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NO SISTEMA CLIMÁTICO

Rafael Henrique Oliveira Rangel

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador(es): Luiz Landau

Marcio Cataldi

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2019

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE UM NOVO MÍNIMO SOLAR E DO AUMENTO  
DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NO SISTEMA CLIMÁTICO

Rafael Henrique Oliveira Rangel

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

---

Prof. Marcio Cataldi, D.Sc.

---

Prof. André Luiz Belém, D.Sc.

---

Prof. Edilson Marton, D.Sc.

---

Prof. Luiz Paulo de Freitas Assad, D.Sc.

---

Prof. José Luis Drummond Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2019

Rangel, Rafael Henrique Oliveira

Avaliação do impacto de um novo mínimo solar e do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no sistema climático/  
Rafael Henrique Oliveira Rangel. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XXV, 234 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 198-228.

1. Modelagem climática. 2. Mínimo solar. 3. Impactos no clima. I. Landau, Luiz *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a todos os Professores que tive.  
Desde os que são oficialmente Professores, aos que são ou foram Professores da  
vida.

Professores que me ajudaram e orientaram na construção tanto do conhecimento  
intelectual quanto do conhecimento humano.

## AGRADECIMENTOS

Do meu ponto de vista, a base de qualquer evolução pessoal/profissional é sempre a família, os amigos e o trabalho. Esta é a tríade mais importante. Sou uma pessoa de sorte por ter a oportunidade de ter a minha base bastante sólida, para que pudesse construir nela uma escada rumo ao aprimoramento pessoal e profissional.

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Cândida e Helio, por todo o amor, carinho e força, além do incentivo à leitura, incentivo à curiosidade e aos estudos que recebi desde criança. Sem vocês eu não seria absolutamente nada. Agradeço à minha irmã, Laila, por todo o apoio e compreensão nesses anos que estou relativamente longe. Agradeço também à minha tia, Cristina, que tanto apoio me deu em momentos tão complicados. O apoio dos primos e tio também foram muito importantes.

Agradeço à minha esposa, Gaby, que continua aguentando há tanto tempo todas as reclamações e mudanças de rumo da minha vida, me incentivando e dando forças em todos os momentos, estando ao meu lado na saúde e na doença, na alegria e na tristeza, audaciosamente indo onde nunca estivemos.

Agradeço também ao Bernard e à Magali, por todo o apoio e incentivo ao longo destes anos todos. É sempre bom poder contar com a família!

Ao longo deste tempo de Doutorado, muitos laços de amizade se estreitaram. O sofrimento em conjunto é um fator importantíssimo para fazer aflorar e enriquecer a amizade. Por isso, agradeço muito à Elisa, Lívia, Ian, Régis, Yuri, Priscila, Nilton e Maurício. A amizade de vocês me ajudou demais nestes anos todos. Principalmente a paciência da Lívia e Elisa, sempre dispostas a me ajudar com o Matlab. Muitas vezes vocês foram praticamente um muro de lamentações para mim, mas só o foram porque são pessoas muito fortes, que me deram confiança e me senti seguro para que pudesse me apoiar.

Um agradecimento que não pode faltar é aos amigos André Felipe e Evelyn. Sempre disponíveis para conversar, trocar experiências e comer pizzas!

Agradeço aos amigos, novos e antigos, por estarem ao meu lado! Gilson, Mônica, Diogo, Flávia, Gláucia, Marcos, Waleska, Fabio, Cristiane, dentre outros que me escapam os nomes agora, enfim, muitas amizades que fiz nestes últimos tempos e que sempre me apoiaram com palavras de incentivo nos momentos certos.

Agradeço ao Professor Landau pela confiança, já que isso já vem desde o Mestrado que, aliás, foi um período bastante turbulento e no qual ele me ajudou muito e, mesmo assim, continuou acreditando que o Doutorado seria melhor. Espero ter atendido as expectativas!

Ao grande amigo e também orientador, Professor Marcio Cataldi, a quem devo todo o agradecimento do mundo. Em primeiro lugar pela compreensão que tem e sempre teve para comigo. É um grande exemplo de cientista, de amigo e, o principal, de ser humano. É um grande exemplo que vai fazer parte da minha vida.

Agradeço também às pessoas com quem convivi durante tanto tempo no LAMCE. Carina, Raquel, Douglas, Thiago, Fábio, Luís Fernando, Humberto, Patrick, Diego, Mônica, Sérgio, Rosana. Vocês são pessoas especiais e que fizeram parte de um momento muito importante da minha vida. Agradeço também ao Professor Luiz Paulo, por ter me dado a oportunidade de começar a trabalhar no LAMCE como estagiário e depois pesquisador bolsista. Aprendi muito com cada um de vocês.

Não posso deixar de agradecer todo o carinho e amizade dos alunos que fazem parte do LAMMOC/UFF. Sempre me senti muito bem ao interagir com vocês, tanto aprendendo quanto ensinando.

Outros Professores que são grandes exemplos que tive durante o bacharelado em Meteorologia e que se seguiu ao longo do Mestrado e Doutorado são Luiz Cláudio, Edilson e Ângela. Eles me ajudaram demais em momentos tão complicados, sempre aconselhando, chamando a atenção quando necessário e debatendo assuntos dos mais variados. Cresci muito depois de cada conversa que tivemos.

Agradeço também ao Professor André Belém pelas conversas que tivemos ao longo dos últimos anos. Sempre aprendi muito e me senti incentivado para conduzir este trabalho.

Outra pessoa a quem agradeço é ao Professor José Alves. Tivemos até que pouco contato ao longo destes anos, mas, apesar disso, sempre que eu estava com alguma dúvida sobre métodos computacionais ou outro assunto qualquer, ele sempre esteve disponível e disposto a saná-las.

Algumas pessoas foram muito importantes para o desenvolvimento da parte computacional desta tese. O primeiro foi Jim Edwards, do NCAR, do Community Software Engineering Group do NCAR (desenvolvedor do CESM), que foi meu host quando permaneci por um período de tempo no NCAR em 2018. Eu o incomodei pessoalmente infindáveis vezes e, em absolutamente todas, ele parou o que estava

fazendo para me dar atenção. Sem a ajuda dele, as simulações desta tese não seriam possíveis. Outra pessoa importante no desenvolvimento é o Engº Albino Aveleda, no NACAD/UFRJ, que me ajudou também inúmeras vezes para conseguir finalizar a instalação do modelo no computador de alto desempenho da COPPE/UFRJ.

Agradeço à ANP-PRH-02 pela bolsa de Doutorado entre 2014 e 2017 e incentivos à participação em eventos, e ao CNPq pela bolsa de Doutorado concedida entre 2017 e 2018.

Agradeço também a todos os que estiveram presentes, fisicamente ou não, ao meu lado.

Foram cinco anos de Doutorado ... então foi difícil resumir os agradecimentos em poucas páginas!

*“O sofrimento é o intervalo entre duas felicidades”*

Vinícius de Moraes

*“’Tá difícil, mas vai dar tempo”*

André Felipe de Matos Lopes

## Motivação

O mundo com o qual temos alguma forma de contato é apenas uma pequena parte do que existe na Natureza. Tudo o que observamos ou o que sentimos através do nosso sistema sensorial é limitado pela capacidade dos nossos sensores naturais, que geram sinais posteriormente decodificados pelo cérebro. A isso se dá o nome de "sentidos", que são o tato, olfato, paladar, visão e audição.

Durante o dia, o céu azul sempre nos chama a atenção. Por que as nuvens são brancas e, às vezes, cinzas? Seriam elas realmente brancas? À noite, quando olhamos para o céu, vemos um vazio imenso e grande quantidade de pontos luminosos. Mas isso é o que nossos olhos veem. E o que há além destes pontos de luz? Quais informações nos trazem?

O que existe e está por trás da luminosidade destas estrelas e das cores das nuvens vai além do que enxergamos.

Tomando como exemplo a luz do Sol, apenas percebemos com nossos olhos uma pequena parte do espectro eletromagnético. Esta pequena parte nos é naturalmente subdividida em cores, pois é o que vemos. Entretanto, somos capazes de sentir o aquecimento que o Sol produz em nossa pele e no que nos rodeia, dando uma indicação de que não são apenas as cores que podemos observar, mas também somos capazes de sentir seu aquecimento.

A realidade na qual estamos imersos não pode ser completamente assimilada pelos nossos sentidos. Então, é necessário superar nossas limitações físicas e buscar sempre algo além do que vemos e sentimos. Para isso são construídos sensores capazes de realizar observações da natureza e traduzi-las para informações que possamos entender, dentro de nossas limitações.

GLEISER (2014) diz que "O que define o ser humano é a sua curiosidade, é o querer saber sempre mais sobre o mundo e sobre si mesmo", e isso me motiva a continuar a busca pelo desenvolvimento e compreensão de instrumentos e novas teorias.

A ciência é um ramo de conhecimento em que se valoriza muito a simplicidade. Por incrível que pareça, algumas das equações mais complicadas da Física, por exemplo, podem assumir grafias bastante compactas e que encerram um profundo conhecimento em poucos caracteres. Algo quase hermético e praticamente disponível apenas aos iniciados nas Artes Físico-matemáticas. Um exemplo é a equação mais

famosa do mundo:  $E=mc^2$ . Ou as equações de Maxwell para o eletromagnetismo. Até mesmo as leis da termodinâmica.

É interessante pensar que os grandes avanços da ciência, seja teórica ou experimental, sempre começam de uma maneira extremamente simples, com apenas duas palavras: “E se...?”.

Essas duas palavras movem a ciência desde o tempo mais remotos.

“E se ... a gravidade afetasse a luz?”. Levou Einstein à Relatividade.

“E se ... uma pequena variação nas condições iniciais levasse a uma grande variação nas condições finais?”. Poincarè e, posteriormente, Lorenz, dando início ao que seria chamado posteriormente de Teoria do Caos.

Esta tese de Doutorado teve início com a mesma pergunta. “E se ... ?”.

“E se passássemos novamente por um período de mínima atividade solar, como o Mínimo de Maunder? Quais seriam os impactos no clima?”.

Esta Tese não teve a pretensão de ser um marco científico para a humanidade, mas sim de cumprir seu papel como mais um tijolo na grande construção que é a Ciência, e responder a esta instigante pergunta: "E se...?".

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE UM NOVO MÍNIMO SOLAR E DO AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE CO<sub>2</sub> NO SISTEMA CLIMÁTICO

Rafael Henrique Oliveira Rangel

Dezembro/2019

Orientadores: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Programa: Engenharia Civil

Neste estudo é realizada a investigação, via modelagem computacional, dos efeitos climáticos de um possível cenário de mínima atividade solar prolongada, como foi o Mínimo de Maunder, e do aumento de CO<sub>2</sub> no sistema climático terrestre. Esta investigação é feita utilizando o modelo de sistema terrestre Community Earth System Model (CESM), que é o estado-da-arte em modelagem climática, sendo também um dos sistemas que compõem o CMIP/IPCC. Os resultados obtidos reforçam que um futuro cenário de mínima atividade solar tem maiores impactos climáticos regionais do que globais. Os efeitos de um futuro mínimo prolongado de atividade solar indicam que este cenário é capaz apenas de desacelerar o aumento de temperatura causado pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre. As alterações climáticas causadas nestes cenários sugerem que as regiões mais afetadas na América do Sul, mesmo com a desaceleração do aumento de temperatura, são o norte e nordeste do Brasil.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF THE IMPACT OF A NEW SOLAR MINIMUM AND  
INCREASED CO<sub>2</sub> CONCENTRATION IN THE CLIMATE SYSTEM

Rafael Henrique Oliveira Rangel

December/2019

Advisors: Luiz Landau

Marcio Cataldi

Department: Civil Engineering

This study investigates, through computational modeling, the climatic effects of a possible scenario of prolonged solar minimum of activity, such as the Maunder Minimum, and the increase of CO<sub>2</sub> in the terrestrial climate system. This research is conducted using the Community Earth System Model (CESM), which is the state-of-the-art in climate modeling, and is also one of the CMIP/IPCC models. The results reinforce that a future scenario of a prolonged solar minimum of activity has greater regional climate impacts than global ones. The effects of a future prolonged minimum of solar activity indicate that this scenario is only capable of slowing down the temperature increase caused by the increased concentration of CO<sub>2</sub> in the earth's atmosphere. The climate change caused by these scenarios suggests that the most affected regions in South America, even with the deceleration of temperature increase, are northern and northeastern Brazil.

## SUMÁRIO

1.	Introdução .....	1
2.	Fundamentação teórica .....	6
2.1.	Sistema Solar, o Sol e evolução estelar .....	6
2.1.1.	O Sistema Solar .....	6
2.1.2.	O Sol .....	8
2.1.3.	Irradiância Solar Total .....	13
2.1.4.	Ciclos solares .....	14
3.1.4.1	Ciclo de Schwabe .....	17
3.1.4.2	Ciclo de Gleissberg .....	18
3.1.4.3	Ciclo de Suess / deVries .....	19
3.1.4.4	Ciclos de períodos mais longos .....	19
2.2.	Grandes Máximos .....	21
2.3.	Grandes mínimos recentes .....	21
2.3.1.	Mínimo de Dalton .....	23
2.3.2.	Mínimo de Maunder .....	24
3.3.2.1	TSI durante o Mínimo de Maunder .....	26
2.4.	Previsões de ciclos solares .....	28
2.5.	Componentes do Sistema Climático .....	30
2.6.	Balço de radiação global do sistema climático .....	32
2.7.	Processos de feedback .....	34
2.8.	Variabilidade Climática .....	35
2.9.	Modelagem Computacional, modelos climáticos e de sistema terrestre .....	39
2.10.	Modelo de sistema terrestre CESM .....	42
2.10.1.	Componentes pré-configurados ( <i>COMPSETS</i> ) .....	47
2.10.2.	Resolução espacial .....	48
2.10.3.	Modelo Atmosférico CAM6 e histórico do projeto CAM .....	50
2.11.	Coeficiente de correlação .....	56
2.12.	Reanálises .....	56
2.12.1.	ERA-INTERIM .....	57
2.12.2.	Reanalysis-2 .....	57
3.	Revisão bibliográfica .....	58
4.	Metodologia .....	67
4.1.	Experimentos iniciais (EXPi) .....	67
4.2.	Experimentos com CTRL e GSM, com forçante solar CMIP6 e mínimo solar artificial .....	68

4.2.1.	Geração do novo mínimo de Maunder.....	68
4.2.2.	Configurações dos experimentos CTRL e GSM.....	71
4.3.	Comandos para a execução do CESM.....	73
4.3.1.	Configuração de hardware .....	76
4.4.	Avaliação dos resultados agrupados por trimestres.....	77
4.5.	Avaliação dos resultados nos meses de junho e dezembro .....	78
4.6.	Avaliação dos campos de anomalia .....	78
4.7.	Validação do modelo .....	79
5.	Resultados.....	80
5.1.	Experimentos iniciais de teste (EXPi_CTRL e EXPi_TSI10p) .....	80
5.1.1.	Distribuições médias zonais .....	80
5.1.2.	Distribuição espacial dos campos de anomalias.....	82
5.2.	Validação do experimento CTRL.....	85
5.2.1.	Distribuições médias zonais .....	85
5.2.2.	Feições climáticas experimento CTRL.....	87
5.2.3.	Correlações entre CTRL e GSM .....	92
5.3.	Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (PNMM) .....	94
5.3.1.	Distribuição espacial dos campos de anomalia de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar .....	103
5.4.	Temperatura do ar.....	110
5.4.1.	Perfil vertical de temperatura .....	119
5.4.2.	Distribuição espacial dos campos de temperatura a 2 m de altura .....	122
5.5.	Vento.....	129
5.5.1.	Perfil vertical do vento.....	129
5.5.2.	Distribuição espacial dos campos de anomalia do vento zonal nos níveis de 200, 850 e 1000 hPa.....	136
5.6.	Campo de anomalia de movimento vertical (ômega) .....	144
5.7.	Precipitação .....	148
5.7.1.	Distribuição espacial dos campos de anomalia de precipitação .....	157
5.8.	Precipitação, pressão e temperatura na América do Sul .....	163
5.8.1.	Distribuição espacial regional de anomalias (CTRL_pos – CTRL_pre) .....	163
5.8.2.	Distribuição espacial regional de anomalias (GSM – CTRL_pos) .....	167
5.9.	Oceano .....	169
5.10.	Escoamento superficial.....	176
5.11.	Gelo marinho .....	177
5.12.	Superfície terrestre .....	183
5.13.	Sumário dos resultados.....	192
6.	Conclusões.....	196

7. Referências .....	198
8. Anexo I.....	229
9. Anexo II.....	233

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Representação artística do Sol, separado em camadas e destaques das principais feições. (a) núcleo, (b) região radiativa, (c) região convectiva, (d) fotosfera, (e) cromosfera, (f) coroa, (g) manchas solares, (h) grânulos, (i) flare. Fonte: <https://www.thinglink.com/scene/708663678680956929>. Acesso em 20 de março de 2016..... 9
- Figura 2 - Imagem de grânulos solares e, no detalhe, diagrama de movimento de gás em seu interior. Fonte: <http://spaceplasma.tumblr.com/post/64209316439/granules-on-the-suns-surface-granules-on-the>..... 10
- Figura 3 - Combinação de 33 imagens feitas durante um eclipse Solar, com tratamento digital para destacar as feições de filamentos e ondulações. Fonte: <http://apod.nasa.gov/apod/ap090726.html>. Acesso em 20 de março de 2016. .... 11
- Figura 4 – Diagrama representando o campo poloidal (seta vermelha) e toroidal (seta azul). Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal\\_and\\_poloidal](https://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal_and_poloidal). Acesso em 6 de maio de 2016. .... 12
- Figura 5 - Imagem do Sol, evidenciando a presença de manchas solares em (a). Região com a presença de manchas solares, com destaque para as regiões de umbra e penumbra (b). Fontes: <https://www.weather.gov/fsd/sunspots> e <http://www.spaceweather.com>, acesso em 20 de março de 2016. .... 12
- Figura 6 - Ilustração da produção e efeitos do  $^{10}\text{Be}$  e do  $^{14}\text{C}$  no sistema terrestre. Ambos os radionuclídeos tem formação parecida devido à interação de partículas de raios cósmicos com os gases da atmosfera terrestre. Depois da produção na região superior da atmosfera, cada tipo de radionuclídeo tem um destino diferente no sistema terrestre (efeitos no sistema). O  $^{14}\text{C}$  é oxidado em  $\text{CO}_2$  e entra no ciclo global do carbono, percorrendo a atmosfera, biosfera e oceanos. O  $^{10}\text{Be}$  se liga aos aerossóis e, em alguns anos, é depositado no solo. Adaptado de Stenhilber et al., 2012..... 15
- Figura 7 - Comparação das séries temporais de médias anuais de Wolf (WSN, linha vermelha) e Group (GSN, linha azul). Os números dos ciclos estão indicados na região inferior da figura. .... 16
- Figura 8 – Série temporal de número de manchas solares (HOYT e SCHATEN, 1998). Os números acima próximos aos picos indicam a contagem dos ciclos de Schwabe, introduzida por WALDMEIR (1961). .... 18
- Figura 9 - Periodograma Lomb-Scargle da série temporal de número de manchas solares de SOLANKI et al. (2004), indicando os ciclos de Gleissberg, de Vries e Hallstat e outros dois ciclos sem nome. O ciclo de 1000 anos foi nomeado posteriormente como ciclo de Eddy. As linhas coloridas indicam os intervalos de confiança. O ciclo de Bond não é mostrado nesta figura possivelmente devido à base de dados não ter registrado indícios deste ciclo. Adaptado de KERN et al., 2012..... 20
- Figura 10 - Número de manchas solares anuais (HOYT e SCHATEN, 1998). Em destaque: mínimo de Maunder (1650-1715) e mínimo de Dalton (1790-1830). Dados disponíveis em: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/sunspot-numbers/group/archive/original-files/>. Acesso em 07/12/2017..... 22
- Figura 11 - Registro de número de manchas solares anuais (HOYT e SCHATTEN, 1997). A linha pontilhada azul indica a tendência linear de queda com coeficiente angular maior do que a tendência de crescimento em vermelho. Isto é um indicativo de que o início do Mínimo de Maunder é abrupto e a retomada da atividade solar a partir de 1715 é mais lenta, como descrito por USOSKIN et al. (2000)..... 25

Figura 12 - Fluxos globais de energia a partir de diferentes fontes, que determinam o balanço radiativo da Terra. Adaptado de TRENBERTH et al. (2009). .....	33
Figura 13 - Mapa dos potenciais futuros elementos de inflexão de relevância política no sistema climático sobreposto à densidade populacional. Nos locais demarcados existe a possibilidade de ocorrência de ponto de inflexão devido à forçantes antropogênicos. (Adaptado de LENTON et al. 2008). .....	37
Figura 14 - Esquema ilustrativo da nomenclatura dos experimentos iniciais. Ambos os experimentos são iniciados no ano 2000 e finalizados no ano de 2010. O experimento EXPi_CTRL corresponde ao caso controle, com $1360 \text{ Wm}^{-2}$ fixos ao longo do tempo. O segundo experimento, EXPi_TSI10p corresponde ao experimento cuja irradiância solar total foi fixada em $1496 \text{ Wm}^{-2}$ , ou seja, 10% a mais do que o caso controle. Os ciclos solares apenas são mostrados apenas para comparação e não estão em escala. ....	67
Figura 15 - Em (a), série de irradiância solar total média diária entre os anos de 1850 e 2000 elaborada por MATTHES et al. (2017). Em (b) a mesma série, com o período de grande mínimo solar artificial entre os anos de 1950 e 2000, calculado utilizando a metodologia de MEEHL et al. (2013). .....	70
Figura 16 – Representação dos níveis verticais do CAM6, de acordo com seus índices e níveis de pressão na vertical (hPa). .....	72
Figura 17 – Esquema ilustrativo da nomenclatura dos experimentos. CTRL_pre indica o período do experimento controle compreendido entre os anos de 1850 e 1950. O CTRL_pos indica o período posterior a 1950 e que finaliza no ano 2000. O experimento GSM corresponde apenas ao período entre 1950 e 2000. ....	72
Figura 18 – Concentração padrão de $\text{CO}_2$ do <i>compset</i> BHIST, que deu origem aos experimentos CTRL e GSM. ....	73
Figura 19 - Layout escolhido para a execução das rodadas. Os números entre parênteses indicam a quantidade de núcleos de processamento utilizada por cada modelo. Os modelos de atmosfera (ATM), gelo terrestre (GLC), escoamento superficial (ROF), solo (LND), são executados de maneira concorrente. Os modelos de gelo marinho (ICE) e de ondas (WAV) são executados de maneira concorrente com parte do acoplador, gelo terrestre e atmosfera. Apenas o modelo oceânico necessita ser executado de maneira serial com os demais modelos. ....	76
Figura 20 – Distribuições médias zonais para JFM (painéis à esquerda) e JAS (painéis à direita). Pressão do ar ao nível médio do mar (a) e (b), e temperatura do ar à superfície (c) e (d) do experimento EXPi_CTRL (linha tracejada azul), Reanalysis 2 (linha tracejada preta) e ERA-Interim (linha tracejada verde). ....	81
Figura 21 – Diferenças (EXPi_TSI10p – EXPi_CTRL) de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) do ar a 2 metros de altura para os meses de junho (a) e dezembro (b). ....	82
Figura 22 - Diferenças (EXPi_TSI10p – EXPi_CTRL) de salinidade absoluta (g/kg), proveniente do modelo oceânico, para os meses de junho (a) e dezembro (b). ....	83
Figura 23 - Diferenças (EXPi_TSI10p – EXPi_CTRL) de fração da superfície coberta por gelo (%), proveniente do modelo de gelo marinho, para os meses de junho (a) e dezembro (b). .....	84
Figura 24 – Anomalias (EXPi_TSI10p – EXPi_CTRL) dos campos de escoamento superficial (runoff). Em (a) mês de julho e (b) mês de dezembro do último ano de integração do modelo. ....	84
Figura 25 - Distribuições médias zonais de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) do experimento CTRL (linha tracejada preta), Era-Interim (linha azul) e Reanalysis 2 (linha vermelha), para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON. ....	86

Figura 26 - Distribuições médias zonais de temperatura do ar a 2 m de altura (°C) do experimento CTRL (linha tracejada preta), Era-Interim (linha azul) e Reanalysis 2 (linha vermelha), para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON. ....	87
Figura 27 – Perfis verticais das médias zonais globais de (a) componente zonal (componente vetorial $\mathbf{u}$ ) do vento em $\text{ms}^{-1}$ . Os valores positivos (negativos) indicam o fluxo saindo (entrando) do (no) plano da figura; (b) componente meridional (componente vetorial $\mathbf{v}$ ) do vento em $\text{ms}^{-1}$ . Neste caso, valores positivos (negativos) indicam movimento de sul para norte (norte para sul); (c) temperatura (°C).....	89
Figura 28 – Campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa). Em (a) ERA-INTERIM, (b) CTRL_pre, (c) CTRL_pos, (d) GSM. ....	90
Figura 29 - Campos de temperatura do ar a 2 metros de altura (°C). Em (a) ERA-INTERIM, (b) CTRL_pre, (c) CTRL_pos, (d) GSM. ....	91
Figura 30 - Coeficientes de correlação bidimensionais (latitude e longitude). Em (a) o coeficiente calculado para o campo de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar. Em (b) o coeficiente para o campo de temperatura a 2m de altura. Em (c) o coeficiente para o campo de precipitação. O período de grande mínimo solar artificial se inicia em 1950. Os valores são diferentes de 1 apenas depois de 1950 por ser o período do mínimo artificial de atividade solar. ....	93
Figura 31 – Séries temporais de pressão do ar ao nível médio do mar (hPa). Em (a) experimento CTRL_pre e sua tendência. Em (b) CTRL_pos e GSM e suas respectivas tendências. Em (c) diferença entre GSM e CTRL. ....	94
Figura 32 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para DJF. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000). ....	96
Figura 33 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para JJA. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000). ....	98
Figura 34 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para MAM. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000). ....	100
Figura 35 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para SON. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000). ....	102
Figura 36 - Campo de diferença de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) entre CTRL_pos e CTRL_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000. ....	105

Figura 37– Campo de diferença de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) entre GSM e CTRL_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	107
Figura 38– Campo de diferença de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) entre GSM e CTRL_pos. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	109
Figura 39 – Séries temporais de temperatura do ar a 2 m de altura (°C). Em (a) experimento CTRL_pre e sua tendência. Em (b) CTRL_pos e GSM e suas respectivas tendências. Em (c) diferença entre GSM e CTRL.....	110
Figura 40 - Distribuições zonais de temperatura do ar a 2 m de altura (°C) para DJF. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	112
Figura 41 - Distribuições zonais de temperatura do ar a 2 metros de altura (°C) para JJA. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	114
Figura 42 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para MAM. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	116
Figura 43 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para SON. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	118
Figura 44 – Médias verticais globais zonais de anomalia de temperatura (°C). Em (a) DJF, em (b) MAM, em (c) JJA e em (d) SON. A diferença (CTRL_pos – CTRL_pre) de temperatura é representada pelas cores.....	120
Figura 45 - Médias verticais globais zonais de anomalia de temperatura (°C). Em (a) DJF, em (b) MAM, em (c) JJA e em (d) SON. A diferença (GSM – CTRL_pos) de temperatura é representada pelas cores.....	121
Figura 46– Campo de diferença temperatura do ar a 2 m de altura (°C) entre CTRL_pos e CTRL_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	123
Figura 47– Campo de diferença temperatura do ar a 2 m de altura (°C) entre GSM e CTRL_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	125
Figura 48– Campo de diferença temperatura do ar a 2 m de altura (°C) entre GSM e CTRL_pos. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	127
Figura 49 – Médias verticais globais zonais de temperatura e vento. Em (a), temperatura média anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL_pre. A diferença	

(CTRL_pos – CTRL_pre) de temperatura é representada pelas cores. (b, c, d, e) como em (a), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. Em (f), componente zonal do vento anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL_pre. A diferença (CTRL_pos – CTRL_pre) da componente zonal do vento é representada pelas cores. (g, h, i, j) como em (f), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. ....	131
Figura 50 – Médias verticais globais zonais de temperatura e vento. (a) temperatura média anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL_pre. A diferença (GSM – CTRL_pre) de temperatura é representada pelas cores. (b-e) como em (a), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. (f) componente zonal do vento ( <b>u</b> ) anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL_pre. A diferença (GSM – CTRL_pre) da componente zonal do vento é representada pelas cores. (g-j) como em (f), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente.....	133
Figura 51 – Médias verticais globais zonais de temperatura e vento. (a) temperatura média anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL_pos. A diferença (GSM – CTRL_pos) de temperatura é representada pelas cores. (b, c, d, e) como em (a), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. (f) componente zonal do vento ( <b>u</b> ) anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL_pos. A diferença (GSM – CTRL_pos) da componente zonal do vento é representada pelas cores. (g, h, i, j) como em (f), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. ....	135
Figura 52 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1950 e 1960. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	137
Figura 53 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1960 e 1970. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	138
Figura 54 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1970 e 1980. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	139
Figura 55 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1980 e 1990. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	140
Figura 56 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1990 e 2000. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	141

Figura 57 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde ao período entre 1950 e 2000. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	142
Figura 58 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde ao período entre 1970 e 2000. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL_pos – CTRL_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL_pre.....	143
Figura 59 – Campos globais de anomalia de ômega (Pa/s) no nível de 850 hPa. Os painéis à esquerda correspondem à diferença CTRL_pos – CTRL_pre. Os painéis centrais correspondem à GSM – CTRL_pos e os painéis à direita GSM – CTRL_pre. As figuras (a), (b) e (c) correspondem à década entre 1950 e 1960. (d), (e) e (f) à década entre 1960 e 1970. (g), (h) e (i) à década entre 1970 e 1980.....	145
Figura 60 – Campos globais de anomalia de ômega (Pa/s) 850 hPa. Os painéis à esquerda correspondem à diferença CTRL_pos – CTRL_pre. Os painéis centrais correspondem à GSM – CTRL_pos e os painéis à direita GSM – CTRL_pre. As figuras (a), (b) e (c) correspondem à década entre 1980 e 1990. (d), (e) e (f) à década entre 1990 e 2000.....	146
Figura 61 – Campos globais de anomalia de ômega (Pa/s) 850 hPa. Os painéis à esquerda correspondem à diferença CTRL_pos – CTRL_pre. Os painéis centrais correspondem à GSM – CTRL_pos e os painéis à direita GSM – CTRL_pre. As figuras (a), (b) e (c) correspondem ao período entre 1950 e 2000. (d), (e) e (f) ao período entre 1970 e 2000. ....	147
Figura 62 – Séries temporais de precipitação (mm/mês). Em (a) experimento CTRL_pre e sua tendência. Em (b) CTRL_pos e GSM e suas respectivas tendências. Em (c) diferença entre GSM e CTRL.....	148
Figura 63 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para DJF. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	150
Figura 64 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para JJA. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	152
Figura 65 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para MAM. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	154
Figura 66 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para SON. Em (a) experimento CTRL_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha	

tracejada vermelha e CTRL_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL_pos e CTRL_pre e GSM e CTRL_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).....	156
Figura 67 – Campo de diferença de precipitação (mm) entre CTRL_pos e CTRL_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	158
Figura 68– Campo de diferença de precipitação (mm) entre GSM e CTRL_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	160
Figura 69– Campo de diferença de precipitação (mm) entre GSM e CTRL_pos. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.....	162
Figura 70 – Campos de diferenças entre CTRL_pos e CTRL_pre. As colunas são relativas aos períodos DJF, MAM, JJA e SON. Os campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) são representadas na primeira linha; a temperatura do a 2 m de altura (°C) na segunda linha e precipitação (mm) na terceira. ....	165
Figura 71 – Campos de diferenças entre GSM e CTRL_pos. As colunas são relativas aos períodos DJF, MAM, JJA e SON. Os campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) são representadas na primeira linha; a temperatura do a 2 m de altura (°C) na segunda linha e precipitação (mm) na terceira. ....	168
Figura 72 – Médias mensais do fluxo de calor ( $Wm^{-2}$ ) na superfície do oceano. A linha vermelha representa o fluxo integrado em todo o oceano. A linha verde representa o fluxo integrado no hemisfério norte e a linha azul integrado no hemisfério sul. ....	169
Figura 73 – Série temporal de TSM (°C) integrada no oceano global. A linha vermelha representa o experimento CTRL e a linha azul o experimento GSM.....	170
Figura 74 - Anomalias de TSM entre os experimentos. Em (a, b) CTRL_pos – CTRL_pre; em (c, d) GSM – CTRL_pre; Em (e, f) GSM - CTRL_pos. As figuras à esquerda representam o período DJF e as figuras à direita representam o período JJA. ....	171
Figura 75 - Representação da sazonalidade da confluência Brasil-Malvinas de acordo com o campo de temperatura do primeiro nível vertical a partir dos experimentos CTRL_pre (a, b), CTRL_pos (c, d) e GSM (e, f). As figuras à esquerda representam os campos em DJF e as figuras à direita JJA. O destaque em vermelho representa a região da CBM. Linha tracejada azul indica a isoterma de 17°C e a linha tracejada verde a isoterma de 24°C, como recomendado por WAINER et al. (2000).....	173
Figura 76 – Anomalia de TSM entre os experimentos. (a, b) CTRL_pos – CTRL_pre, (c, d) GSM – CTRL_pre e (e, f) GSM – CTRL_pos. As figuras à esquerda representam os campos no verão (DJF) e as figuras à direita representam os campos no inverno (JJA) do hemisfério sul. O destaque indica a região da CBM (CATALDI, 2010). “Max” e “min” indicam os valores máximo e mínimos das anomalias de TSM. ....	175
Figura 77 - Anomalias descarga direta de água líquida ( $m^3s^{-1}$ ). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente. ....	177
Figura 78 – Anomalias de espessura de gelo (m). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f),	

anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente. ....	179
Figura 79 – Anomalias de fração de área coberta por gelo. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente. ....	180
Figura 80 – Anomalias de taxa de derretimento de gelo (cm/dia). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente. ....	181
Figura 81 - Anomalias de espessura da camada seca (mm) do solo. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. ....	184
Figura 82 - Anomalias de fração do solo coberto por neve. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as anomalias ficassem mais evidentes, sendo avaliadas, portanto, apenas qualitativamente. ....	186
Figura 83 - Anomalias topo de dossel (m). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (b), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (c) e (d), anomalias GSM – CTRL_pre e em (e) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as anomalias ficassem mais evidentes, sendo avaliadas, portanto, apenas qualitativamente. ....	188
Figura 84 – Anomalias PFT relativo à árvores de folhas largas perenes tropicais. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL_pos – CTRL_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL_pos. A escala de cores foi ajustada para que as anomalias ficassem mais evidentes, sendo avaliadas, portanto, apenas qualitativamente. ....	189
Figura 85 - séries temporais com as médias globais (médias calculadas em latitude e longitude) de cada PFT, relativas aos tipos de vegetação do CLM. Em (a), séries temporais prescritas no modelo CLM. Em (b), as anomalias GSM – CTRL, indicando que todas as PFTs se mantêm ao longo das simulações. ....	191
Figura 86 – Ilustrações com a compilação dos resultados das anomalias entre CTRL_pos e CTRL_pre em (a) e GSM e CTRL_pos em (b). As setas indicam o aumento ou decréscimo de Temperatura a 2m de altura (T), Precipitação (Prec), Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (Pres), Espessura da camada seca (ECS) e Descarga direta de água líquida (DAL). A indicação s/d indica que não há diferença entre os experimentos, cuja subtração é igual ou próxima de zero. ....	194
Figura 87 – representação das vazões naturais observadas no Sistema Integrado Nacional (SIN), em %MLT (Média de Longo Termo). Em (a), as vazões entre 1993 e 2012. Em (b), as vazões entre 2013 e 2018. Fonte: ONS .....	195

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de massa do Sistema Solar. Fonte: OLIVEIRA e SARAIVA, 2000.....	7
Tabela 2 - Alguns valores de estimados de TSI para o período do Mínimo de Maunder. ....	28
Tabela 3 - Potenciais elementos de inflexão futuros de relevância política no sistema climático. Fonte: Modificado de LENTON et al. (2008) por SANCHO (2016).....	38
Tabela 4: Tipos funcionais de vegetação – ( <i>Plant Functional Types</i> - PFT), refletância na faixa visível ( $A_{vis}$ ) do espectro eletromagnético e no infravermelho próximo ( $A_{nir}$ ) (Fonte: adaptado de OLESON <i>et al.</i> , 2010). ....	45
Tabela 5 - COMPSETs padrão do CESM e seus modos. ....	48
Tabela 6 – Convenção de nomenclatura das grades suportadas pelo CESM. O código “nn” indica a resolução, “pp” o truncamento, D é a resolução em graus e “n” é a versão da grade. ....	49
Tabela 7 – Coeficientes de correlação ( $r$ ) bidimensional calculados entre os experimentos CTRL e GSM para os campos de pressão, temperatura e precipitação. ..	92
Tabela 8 – Fluxos solares ( $S_{sol-ZH}$ ) e distâncias orbitais para os cenários climáticos catastróficos dos limites da ZH de KASTING et al. (1993). ....	234

## LISTA DE ABREVIACOES

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
HadGEM2-CC	Hadley Centre General Circulation Model with carbon cycle
TSI	Total Solar Irradiance
SSI	Spectral Solar Irradiance
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CAM	Community Atmosphere Model
CLM	Community Land Model
UV	Ultravioleta
CLUBB	Cloud Layers Unified by Binormals
RCP	Representative Concentration Pathway
GSM	Grand solar minimum
POP	Parallel Ocean Program
RTM	River Transport Model
CICE	Community Ice code
CISM	Community Ice Sheet Model
MOSART	Model for Scale Adaptative River Transport
PFT	Plant Functional Types
COMPSET	Component set
CTRL	Caso controle
CBM	Corrente Brasil-Malvinas

## 1. Introdução

A ciência passou por grande evolução entre os séculos XVI e XVII, época de Tycho Brahe, Kepler, Galileu e Newton, na qual foram criados instrumentos de exploração, que expandiram a capacidade da humanidade de enxergar mais detalhadamente os fenômenos da Natureza e quantificá-los.

Desta forma, por exemplo, Newton resumiu em três leis matemáticas os princípios do movimento dos corpos e Kepler organizou, também em três leis, as órbitas dos planetas ao redor do Sol. Avançando mais alguns séculos, a Teoria da Relatividade Geral, de Einstein, foi aplicada ao movimento do planeta Mercúrio, tornando possível a explicação de uma pequena diferença entre as observações de sua órbita e os cálculos efetuados com as leis de Newton (EINSTEIN, 1916).

Um grande passo para a comprovação experimental da Teoria da Relatividade Geral foi dado no Brasil, na cidade de Sobral, no Estado do Ceará. Duas expedições para observações astronômicas durante um evento de eclipse solar foram organizadas por Dyson e Eddington em 1919 (DYSON et. al, 1919). Uma ocorreu em Sobral e a outra na Ilha de Príncipe, próximo à costa da África.

Devido às condições meteorológicas favoráveis, as placas fotográficas obtidas a partir das observações no Brasil apresentaram melhores resultados do que as obtidas na Ilha de Príncipe, sendo utilizadas para efetuar os cálculos do desvio da luz proveniente de estrelas devido ao campo gravitacional do Sol (DYSON et. al, 1919).

Com a observação da Natureza, é possível elaborar explicações dos comportamentos e origens de seus fenômenos. A partir destas observações de fenômenos naturais, registradas com mais detalhes pelos instrumentos, os comportamentos regulares da Natureza passam a ser explicados, ou aproximados, por leis matemáticas.

Com a evolução da tecnologia, essas leis puderam ser aplicadas computacionalmente, auxiliando os pesquisadores com resultados mais rápidos e precisos. A modelagem computacional climática é um desses instrumentos que auxiliam na aplicação das leis da natureza.

A modelagem computacional aplicada ao clima é uma importante ferramenta nos estudos de mudanças climáticas e de previsões sazonais, decadais ou de períodos de tempo bastante longos (IPCC 2013).

O avanço da modelagem climática, em especial dos sistemas que contam com acoplamento entre diversos modelos, possibilita a pesquisa sobre o estado passado, atual e futuro do sistema climático, principalmente com a constante evolução da computação e do entendimento dos processos físicos.

O Sol é a principal fonte de energia para o sistema climático terrestre. A evolução da vida do Sol ocorre em escala de tempo muito longa e obviamente influenciou e influenciará o clima na Terra.

SACKMAN et al. (1993), utilizando um modelo de evolução solar, calcula que nos próximos 1.1 bilhão de anos o Sol aumentará sua luminosidade em 10% de sua luminosidade atual. Seguindo sua evolução natural, no estágio de gigante vermelha, atingirá 2300 vezes a luminosidade e 170 vezes o raio atuais. O pico de luminosidade é atingido na fase anterior à final, quando sua luminosidade chega a 5200 vezes a atual, finalizando sua trajetória evolutiva no estágio de anã branca.

Esta escala de tempo muito longa da trajetória evolutiva solar escapa da utilização dos modelos computacionais climáticos atuais, devido a sua alta complexidade para simular o sistema climático. Entretanto, outras características solares de prazo mais curto e compatível com o tempo de vida do ser humano têm efeitos diretos no estudo sobre o clima.

O estudo dos efeitos do Sol no clima terrestre foi iniciado pelo astrônomo William Herschel em 1801, quando propôs a existência de uma correlação aparente entre o número de manchas solares e o preço do trigo.

Herschel argumentou que a presença de mais manchas solares no período de máxima atividade diminuiria a irradiância solar, resfriando o clima e causando a queda na produção de trigo. Com a diminuição na produção, o preço, por consequência, aumentaria. Apesar desta aparente correlação, na realidade a irradiância aumenta nos períodos de máxima atividade Solar (HAIGH, 2004).

Em comparação à escala de tempo de vida de um ser humano, os próximos estágios de evolução solar estão a uma distância temporal muito grande, mas os padrões dos pontos de inflexão climáticos devido às oscilações de curta escala temporal de atividade solar, por exemplo, podem ser identificados com este tipo de abordagem.

Com a identificação destes pontos, pode-se traçar um paralelo entre estes pontos de inflexão futuros e algum possível padrão que pode estar sendo encontrado atualmente devido a outras forçantes, que também podem ser responsáveis por um possível aquecimento ou resfriamento do planeta, de maneira global ou regional.

Com a identificação destes padrões, a modelagem computacional pode ser utilizada por implementadores de políticas públicas, visando a mitigação dos impactos gerados pelas mudanças climáticas, observadas nas simulações.

É importante salientar que existem muitas forçantes climáticas e que elas não são lineares, podendo reagir de várias maneiras distintas (GRAY, 2010). Entretanto, as mudanças ou variabilidades climáticas por vezes são atribuídas a forçante solar quando periodicidades, tendências, grandes mínimos e máximos, que são características da atividade solar, são detectáveis nos registros climáticos (BEER et al., 2000; BEER e VAN GEEL, 2008).

O Mínimo de Maunder, ocorrido entre os anos de 1645 e 1715, tem sido associado ao período chamado de pequena era do gelo (“*little ice age*” – EDDY, 1976) e, portanto, oferece a possibilidade de verificar a influência da atividade solar no clima da Terra em escalas de tempo de décadas.

Nos períodos de mínima atividade foram registradas quedas de até 0,6° C na temperatura média do ar no hemisfério norte (LAMB, 1995; LOEHLE e MCCULLOCH, 2008; MANN et al., 2009).

Uma questão que pode ser levantada é qual seria a influência que um novo período prolongado de mínima atividade solar poderia causar no clima atual.

Nas últimas décadas o Sol vem apresentando ciclos cada vez menos intensos, sendo o último (ciclo 24) de menor amplitude do que os anteriores. Além disso, o período de mínima atividade que ocorreu entre os ciclos 23 e 24 foi bastante prolongado e incomum (SOLANKI et al. 2004; ABREU et al. 2008; USOSKIN, 2008; LOCKWOOD, 2010; RUSSEL et al., 2010; SHEPHERD et al., 2014). Alguns dos autores citados consideram o século XX como um período com grande máximo de atividade solar.

Apesar deste período de grande máximo solar, o rápido declínio de atividade entre os ciclos 23 e 24 foi o maior já registrado desde o Mínimo de Maunder superando até mesmo o declínio que deu início ao Mínimo de Dalton, por volta do ano 1800.

Segundo LOCKWOOD (2010), existe a probabilidade de início de um período de mínima atividade solar na sequência de um período de grande atividade.

Diversos trabalhos têm sido publicados sobre a possibilidade de diminuição da atividade solar no século XXI, rumo a um novo patamar de mínima atividade, similar ao Mínimo de Maunder (ABREU et al., 2008; LOCKWOOD et al., 2011; ANET et al., 2013) ou Mínimo de Dalton (NIELSEN e KJELDSSEN, 2011).

De acordo com EGOROVA et al. (2018), dentre os forçantes dos modelos climáticos, o solar é o menos compreendido, mesmo que sua quantificação e correta simulação sejam importantes para compreender sua influência no clima terrestre.

Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de compreender o impacto climático da variabilidade solar, como os de ANET et al. (2013), MEEL et al. (2013), INESON et al. (2015), MAYCOCK et al. (2015), FEULNER e RAHMSTORF (2010), dentre outros que são mais detalhados no item 3, de revisão bibliográfica.

Os resultados destes estudos indicam que mesmo um grande mínimo solar reduziria apenas parcialmente (aproximadamente 0,1 K) a temperatura média global ou então seria capaz de retardar o aumento projetado da temperatura (ANET et al. 2013, MEEHL et al. 2013), devido ao aumento da emissão de gases de efeito estufa (ABREU et al., 2008).

O consenso destes trabalhos é de que uma diminuição da quantidade de energia solar que chega à Terra para níveis próximos ao que se estima para o Mínimo de Maunder cause pequeno impacto na temperatura média global.

Entretanto, os efeitos nas escalas regionais ainda são pouco compreendidos (CHIODO et al., 2016). Além disso, a maioria destes trabalhos investigam os efeitos da variabilidade solar apenas na temperatura média global, e não em outras variáveis meteorológicas, dada a complexidade envolvida na simulação do sistema climático.

O propósito deste trabalho é avaliar, via simulação computacional, os efeitos globais e regionais de um futuro período prolongado de mínima atividade solar, como o Mínimo de Maunder, no sistema climático terrestre. A previsão das alterações climáticas oriundas deste cenário torna-se importante devido à sua probabilidade de ocorrência em um futuro próximo e seu impacto social e econômico.

Para esta avaliação, foi gerado um cenário com um mínimo prolongado de atividade solar, com base no forçante solar disponível do *Coupled Model Intercomparison Project 6* (CMIP6 – MATTHES et al. 2017) para inclusão em um modelo de sistema terrestre. Esta abordagem permite a avaliação controlada de como o prolongamento de mínima atividade solar pode influenciar o clima, tanto global quanto regionalmente. Ou seja, analisando regionalmente os impactos espera-se completar uma lacuna deixada por outros trabalhos, principalmente nas avaliações dos resultados na região da América do Sul.

O primeiro objetivo deste estudo é verificar a capacidade do modelo de sistema terrestre em simular adequadamente as feições climáticas sendo, para isto, gerado um

caso controle sem as alterações no forçante solar. O cumprimento dessa etapa tem grande importância para todas as demais, tendo em vista que a partir da comparação com o caso controle é que serão identificadas as anomalias entre os experimentos.

Posteriormente é gerado um caso com atividade solar com valor muito maior do que o atual, para verificar a resposta climática do modelo a uma grande alteração no forçante solar. Uma vez registradas as alterações esperadas, considera-se que o modelo computacional pode ser utilizado para as próximas etapas.

Na etapa seguinte é gerado o cenário com o mínimo prolongado de atividade solar, com início e fim escolhidos arbitrariamente.

Entre os cenários gerados são comparadas as diferenças entre os campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, temperatura do ar a 2 metros de altura e a média zonal do perfil vertical em toda a atmosfera, precipitação, vento e perfil vertical, movimento vertical, fluxos de calor do oceano, temperatura da superfície do mar, escoamento superficial, altura da camada de gelo, taxa de derretimento de gelo, fração do solo coberto por gelo, altura de topo de dossel, espessura da camada seca do solo e cobertura de vegetação. Desta forma, com esta variedade de características, avaliam-se resultados de todos os componentes do modelo de sistema terrestre.

Esta Tese de Doutorado está dividida em sete capítulos. No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica que norteia este trabalho e no capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica. A metodologia consta no capítulo 4. Os resultados são mostrados no capítulo 5, seguido das conclusões no capítulo 6 e referências no capítulo 7.

Por fim, o trabalho conta com dois anexos, sendo o primeiro um trecho de entrevista concedida por John Eddy a Spencer Weart, no qual explicita os motivos de ter escolhido o nome “Mínimo de Maunder” para se referir ao período de mínima atividade solar entre 1645 e 1715. No segundo anexo consta o tema “zona habitável”, que foi utilizado como justificativa para a geração de um cenário para os primeiros testes do modelo de sistema climático em sua versão mais antiga.

## **2. Fundamentação teórica**

No presente capítulo é apresentada a fundamentação teórica desta tese de Doutorado, iniciando pelo Sol e suas características físico-químicas, com uma breve descrição sobre o sistema solar como um todo. Maior ênfase é dada aos ciclos solares, com seus máximos e mínimos, tanto passados quanto futuros e seus efeitos na irradiância solar total. Em seguida, são apresentados conceitos sobre o clima terrestre e o processo de modelagem computacional do sistema climático. Posteriormente é apresentada a principal ferramenta utilizada neste trabalho, o modelo de sistema terrestre CESM e seus componentes.

### **2.1. Sistema Solar, o Sol e evolução estelar**

#### **2.1.1. O Sistema Solar**

O Sistema Solar é o conjunto de objetos próximos à Terra no espaço, que formam um grupo gravitacionalmente interligado e que orbita em torno de um centro de massa em comum (HARWIT, 2006). O Sol é a estrela que sustenta gravitacionalmente o sistema planetário local, composto pelos planetas Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno, além de planetas anões, asteróides, cometas, satélites naturais e outros objetos.

Desde a antiguidade já eram conhecidos os planetas mais brilhantes, visíveis a olho nu e, depois da invenção do telescópio, outros dois planetas do Sistema Solar foram descobertos. Urano, em 1781 por William Herschel, e Netuno, em 1846, por Johann Gottfried Galle (OLIVEIRA e SARAIVA, 2000). A descoberta de Plutão se deu em 1930 por Clyde William Tombaugh e foi classificado, até agosto de 2006, como o nono planeta do Sistema Solar. A partir de 2006 Plutão foi reclassificado como planeta anão, uma categoria nova, na qual também foram inseridos Ceres, o maior objeto do cinturão de asteróides entre as órbitas de Marte e Júpiter, e Éris, o maior asteróide do cinturão de Kuiper, além de vários objetos deste mesmo cinturão (OLIVEIRA e SARAIVA, 2000).

Todos os planetas do Sistema Solar orbitam em torno do Sol na mesma direção e aproximadamente no mesmo plano, chamado de Eclíptica. A distribuição de massa do Sistema Solar é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição de massa do Sistema Solar. Fonte: OLIVEIRA e SARAIVA, 2000.

Componente	Massa (%)
Sol	99,85
Júpiter	0,10
Demais planetas	0,04
Cometas	0,01 (?)
Satélites e anéis	0,00005
Asteróides	0,0000002
Meteoróides e poeira	0,0000001 (?)

Estrelas são corpos luminosos cuja faixa de massa varia entre  $10^{32}$  a  $10^{35}$  g, cujas temperaturas superficiais podem alcançar de 1000 K a 50.000 K, e são classificadas por uma letra e um número, que descrevem a natureza de suas linhas espectrais e suas temperaturas superficiais. Os tipos de estrelas são denotados pelas seguintes letras, do tipo mais quente para o mais frio: O, B, A, F, G, K e M e os números são as subdivisões das classes (HARWIT, 2006).

Dados observados indicam que as estrelas não nascem de maneira isolada, mas sim em agrupamentos de estrelas, a partir de grandes nuvens moleculares, compostas principalmente por hidrogênio (90% da massa) e hélio (10%), com traços de elementos pesados, geralmente aprisionados em grãos de poeira (1%) (MONTMERLE, 2006, WILLIAMS, 2010). As massas destas nuvens são de, aproximadamente,  $10^6$  a  $10^8 M_{\text{sol}}$ , e podem dar origem a milhões de estrelas. Entretanto, tipicamente as nuvens moleculares não tem a tendência natural a gerar estrelas devido ao equilíbrio entre a gravitação da nuvem e sua pressão interna (MONTMERLE, 2006).

Uma possibilidade de explicação para a formação estelar é que ocorram processos turbulentos induzidos por campos magnéticos no interior da nuvem molecular e que deem início ao processo de formação estelar, assunto que ainda é debatido pela comunidade científica. Posteriormente, uma vez que as estrelas do conjunto estão formadas, o material interestelar circunvizinho restante é dispersado e o conjunto se desprende da sua nuvem original. A partir de então, sua evolução passa a ser regida por efeitos dinâmicos devido à gravitação (MONTMERLE, 2006).

Existem cinco teorias sobre a formação do Sistema Solar: teoria Proto-planetária, teoria da Captura, teoria da Acreção, teoria Laplaciana Moderna e a teoria da Nebulosa Solar, que são abordadas detalhadamente em WOOLFSON (2000).

### 2.1.2. O Sol

O Sol é uma estrela típica de segunda geração, ou G2, com aproximadamente 4.5 bilhões de anos de idade. É composto de 92.1% de hidrogênio e 7.8% de gás hélio, assim como 0.1% de outros elementos como oxigênio, carbono, nitrogênio, silício, magnésio, neônio, ferro, enxofre. Os elementos mais pesados são gerados a partir de processos nucleossintéticos em estrelas, *novas* e *supernovas* (HOYT, 1997). A energia, produzida em regiões próximas ao centro do Sol (Figura 1 a), cria uma temperatura central de aproximadamente 15.000.000 K. Esta energia é transportada do interior por radiação na região radiativa (Figura 1 b) e, posteriormente, por convecção nas camadas mais externas (Figura 1 c), levando a uma deposição de energia nas camadas mais superficiais, como a fotosfera (Figura 1 d) a aproximadamente 6000 K, cromosfera (Figura 1 e) e, posteriormente, a coroa (Figura 1 f). Então, a energia é finalmente irradiada para o espaço e uma fração atinge a Terra (HOYT, 1997).

O processo de dínamo nas camadas mais externas do Sol, ou zonas de convecção, cria o campo magnético, que dá origem das manchas solares (Figura 1 g), dos grânulos (Figura 1 h) e das proeminências ou *flares* (Figura 1 i), ejeções de massa coronal e outros tipos de atividades magnéticas, bem como o ciclo solar. Manchas solares ou grupos de manchas solares (Figura 1 g) são regiões mais frias na superfície solar, que se movem de acordo com a rotação do Sol e nos permite determinar um período de rotação de 27 dias solares. Este período é apenas uma taxa de rotação aparente, vista da Terra (HOYT, 1997).

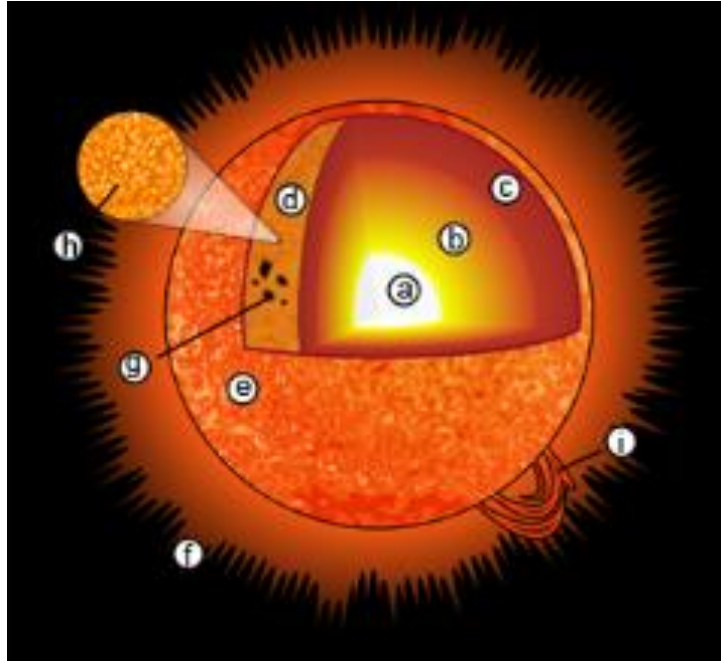


Figura 1 - Representação artística do Sol, separado em camadas e destaques das principais feições. (a) núcleo, (b) região radiativa, (c) região convectiva, (d) fotosfera, (e) cromosfera, (f) coroa, (g) manchas solares, (h) grânulos, (i) flare. Fonte: <https://www.thinglink.com/scene/708663678680956929>. Acesso em 20 de março de 2016.

Em seu centro está o núcleo ( $0 < r < 0.25 R_{\text{sol}}$ ), onde a alta pressão e temperatura causam reações termonucleares, que geram a energia. A energia é então irradiada, principalmente pela difusão de raios gama e raios-x, através da região radiativa ( $0.25 R_{\text{sol}} < r < 0.7 R_{\text{sol}}$ ). Se não interagisse, um fóton poderia cruzar a região radiativa em 2 segundos. Entretanto, os fótons são espalhados, absorvidos e novamente irradiados tantas vezes que sua jornada leva aproximadamente 10 milhões de anos. Sobre a região de transição de  $r = 0.7 R_{\text{sol}}$ , a energia é levada para a superfície por circulações de grande escala através da zona de convecção, conduzida por forças de fluabilidade. Os fluxos ascendentes e descendentes são vistos na superfície com o padrão de grânulos (da ordem de  $10^6$  metros) com material quente mais brilhante do que o material mais frio e que descende nas áreas mais escuras, com diferenças de 400 K (Figura 2) (HIRZBERGER et al 2001).

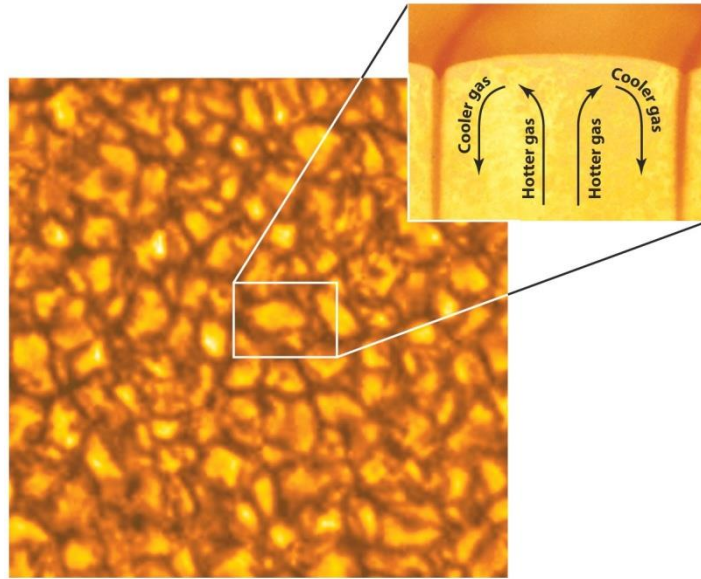


Figura 2 - Imagem de grânulos solares e, no detalhe, diagrama de movimento de gás em seu interior. Fonte: <http://spaceplasma.tumblr.com/post/64209316439/granules-on-the-suns-surface-granules-on-the>

Este padrão cobre toda a área solar, com exceção das regiões com manchas solares. Em média, cada grânulo tem a duração média de 18 minutos. O padrão granuloso é gerado continuamente, enquanto novos grânulos são gerados e os mais antigos se dissipam. De acordo com STEINER et al. (1998), os grânulos são efeitos superficiais e rasos. Os movimentos ascendentes e descendentes são também organizados em células de circulação de grande escala: mesogranulação, com tamanho típico entre 3 a 10 Mm e tempo de vida de 1 hora; supergranulação, com tamanho de 20-30 Mm e tempo de vida de 1 dia; células gigantes, que estendem entre 40-50° de longitude Solar e menos do que 10° em latitude, com tempo de vida de 4 meses (PLONER et al. 2000).

A fotosfera é a parte mais baixa da atmosfera Solar e  $2.5 \times 10^6$  m de espessura ( $R_{sol} < r < 1.004 R_{sol}$ ). A temperatura aumenta consideravelmente na região de transição e é muito alta ( $2 \times 10^6$  K) através da parte principal da atmosfera Solar, a coroa. Como pode ser visto em imagens de eclipses, a coroa não tem um limite externo bem definido (Figura 3), gerando assim a heliosfera, que é a região do espaço dominado pelo fluxo de vento Solar de gás ionizado (plasma) e o campo magnético fraco, também de origem Solar. De acordo com HAIGH (2004), a heliosfera atua como uma região de proteção do Sistema Solar contra eventuais fluxos de radiação provenientes de eventos de fora do Sistema Solar, como Supernovas, por exemplo. Um limite aceito que separa a coroa da

heliosfera é de  $r = 2.5 R_{\text{sol}}$ , depois do qual o fluxo magnético do Sol é aproximadamente constante (SUESS, 1998).

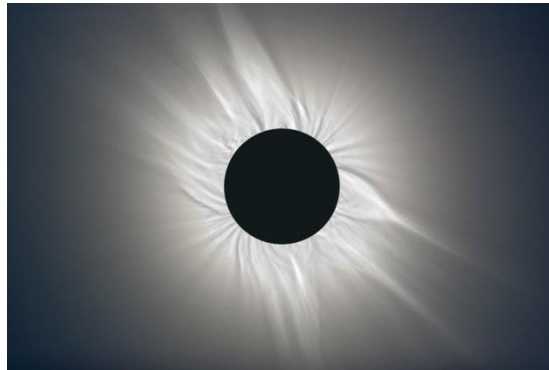


Figura 3 - Combinação de 33 imagens feitas durante um eclipse Solar, com tratamento digital para destacar as feições de filamentos e ondulações. Fonte: <http://apod.nasa.gov/apod/ap090726.html>. Acesso em 20 de março de 2016.

O Sol apresenta um campo magnético geral, sendo, entretanto, menos intenso (10-100 gauss) do que o campo nas manchas solares (2000-3000 gauss). Para comparação, o campo magnético da Terra é de, aproximadamente, 0.3-0.6 gauss. Nos períodos de pouca atividade de manchas solares, o campo magnético geral apresenta uma estrutura de dipolo similar ao campo magnético da Terra. Entretanto, a cada máximo de atividade, ocorre a inversão de polaridade. Como exemplo, pode-se citar o máximo de 2001, quando o pólo norte magnético foi revertido para o hemisfério sul solar (BENESTAD, 2006).

A atividade solar, que abrange fenômenos da fotosfera e da cromosfera, tais como manchas solares, proeminências e distúrbios coronais, é o resultado da ação do dínamo solar, que causa a sequência de transformações do campo magnético solar com formato poloidal em campo toroidal (Figura 4) e, novamente, em poloidal e assim por diante. A cada troca, a polaridade do campo se inverte, de maneira similar a um sistema de oscilador harmônico que transforma energia potencial em cinética e vice-versa. O campo poloidal prevalece durante os períodos de pouca atividade de manchas solares, enquanto que o campo toroidal prevalece durante os períodos de muita atividade de manchas solares (PARKER, 1955, GEORGIEVA et al., 2012).

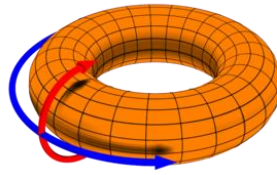
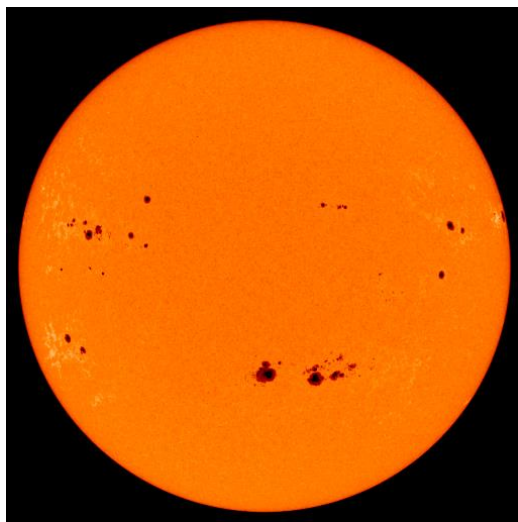
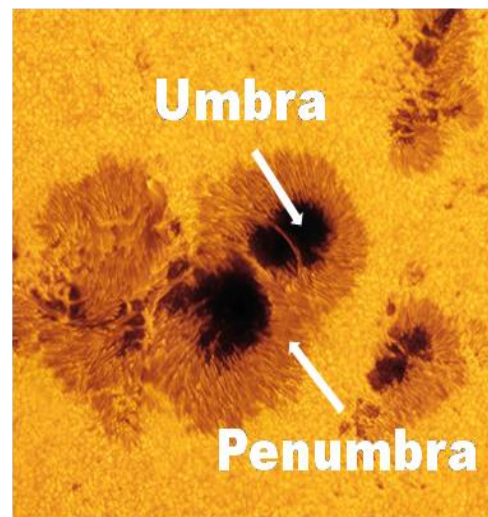


Figura 4 – Diagrama representando o campo poloidal (seta vermelha) e toroidal (seta azul). Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal\\_and\\_poloidal](https://en.wikipedia.org/wiki/Toroidal_and_poloidal). Acesso em 6 de maio de 2016.

As manchas solares (Figura 5) são regiões mais escuras na fotosfera, associadas a fortes campos magnéticos e temperaturas mais baixas quando comparadas com a região circunvizinha. As manchas possuem duas regiões: a umbra, que é a porção escura central; e a penumbra, que é a região mais clara, que envolve a umbra (Figura 5-b). Uma revisão da história de observações de manchas solares está disponível com detalhes em HOYT (1997). As manchas solares são indicadores de intensidade de atividade do Sol. Quanto maior o número de manchas, maior é sua atividade.



(a)



(b)

Figura 5 - Imagem do Sol, evidenciando a presença de manchas solares em (a). Região com a presença de manchas solares, com destaque para as regiões de umbra e penumbra (b). Fontes: <https://www.weather.gov/fsd/sunspots> e <http://www.spaceweather.com>, acesso em 20 de março de 2016.

### 2.1.3. Irradiância Solar Total

A irradiância solar total (*Total Solar Irradiance* - TSI), fluxo solar, ou constante solar ( $S_{sol}$ ), é definida como a energia total irradiada pelo Sol em todos os comprimentos de onda, que atravessa uma unidade de área perpendicular, situada à distância média da órbita da Terra que é de 1 unidade astronômica. Uma unidade astronômica equivale a aproximadamente 150 milhões de km (JOHNSON, 1954).

Apesar de o termo “constante solar” ser comumente utilizado para designar esta grandeza, não existe justificativa física para que seja considerada uma constante, pois se sabe que varia de acordo com os ciclos de atividade solar (HOYT, 1997).

Destaca-se que diversos autores discordam ligeiramente sobre o valor da constante solar, tais como HOYT (1997) que utiliza  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ , KASTING et al. (1993), que utiliza  $1360 \text{ Wm}^{-2}$ , KOPP e LEAN (2011), que utilizam  $1360,8 \text{ Wm}^{-2}$ , entre outros (TRENBERTH et al., 2009, STEPHENS et al., 2012, WILD et al., 2012, NEALE, et al., 2013) havendo, assim, uma resolução da União Astronômica Internacional (*International Astronomical Union* - IAU 2015) em que é sugerido  $1361 \text{ Wm}^{-2}$  como valor nominal apenas, e não como o valor real.

WILSON (1981) aponta que a quantificação da TSI depende do tipo de instrumento utilizado para sua medida. Para isto, recorreu às informações disponíveis à época, tais como balões, foguetes de sondagem e satélite. Em 1969 foi realizado um experimento com um balão que alcançou 36 km de altitude e mediu a TSI de  $1366 \text{ Wm}^{-2}$ . Em 1976 foram lançados diversos foguetes de sondagem, medindo  $1368,1 \text{ Wm}^{-2}$ . Em 1978 a campanha de medição foi repetida, medindo  $1367,6 \text{ Wm}^{-2}$ . Em 1980, novos foguetes foram lançados e mediram  $1367,8 \text{ Wm}^{-2}$ . Nas campanhas utilizando os foguetes de sondagem, a diferença estava nos sensores utilizados. Em cada campanha os foguetes carregavam instrumentação ligeiramente diferente da campanha anterior. Em 1980, foi lançado o satélite Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM), cuja medida (média dos primeiros cinco meses de medida) de TSI foi de  $1367,7 \text{ Wm}^{-2}$ . Maiores informações sobre os experimentos podem ser encontradas em WILSON (1981).

Atualmente, as variações na TSI e SSI tem sido medidas através de sobreposição de medidas de instrumentos a bordo de satélites (WILLSON e HUDSON, 1988; BRUECKNER et al., 1993, WOODS et al., 1996; FROHLICH, 2006; KRIVOVA et al., 2007; GRAY et al., 2010), pelos radiômetros ERB no satélite NIMBUS7, ACRIM1 no

satélite SMM, ERBE no ERBS, ACRIM2 no UARS, VIRGO no SOHO, ACRIM3 no ACRIMSAT e TIM no satélite SORCE (FROHLICH, 2006; sítio [www.acrim.com](http://www.acrim.com), acesso em 01/07/2018).

#### 2.1.4. Ciclos solares

Para o estudo da variabilidade Solar, os registros observados mais antigos e longos são os de quantidade de manchas solares (no inglês “sunspot number”), que são uma indicação direta da atividade solar. A presença de muitas manchas solares indica grande atividade solar; poucas manchas indicam pouca atividade solar.

Estas observações diretas e regulares tiveram início em 1749, no Observatório de Zurique. Entretanto, existem registros observacionais esparsos que datam da época da utilização dos primeiros telescópios, por volta de 1610 (GLEISSBERG, 1945; EDDY, 1976; FOUKAL, 1991; CLETTE et al., 2014), além de registros feitos por astrônomos chineses da Antiguidade (HOYT e SCHATTEN, 1998, OGURTSOV, 2002) e registros de observações de auroras (EDDY, 1976). Maiores detalhes históricos são encontrados nos trabalhos de EDDY et al., 1976, NESME-RIBES et al., 1993 e RIBES e NESME-RIBES, 1993.

Para os períodos anteriores ao século XVII, recorre-se aos registros da presença de radioisótopos cosmogênicos, que são produzidos na interação entre partículas de raios cósmicos provenientes do Sol com átomos de nitrogênio e oxigênio da atmosfera terrestre (BEER et al., 1990; RAISBECK et al., 1990, 2006; FOUKAL, 1990; BARD et al., 2000).

Os dois radioisótopos mais utilizados para este fim são  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$  (Figura 6), que são encontrados em camadas do subsolo e em anéis de árvores (RAISBECK e YIOU, 1990; BEER et al., 1983). O  $^{14}\text{C}$  sofre processo de oxidação com o  $\text{CO}_2$  da atmosfera e acaba por se misturar às reservas naturais de carbono, como a atmosfera, biosfera e oceano.

O  $^{10}\text{Be}$  se fixa aos aerossóis, que são removidos da atmosfera principalmente pela precipitação. A concentração de  $^{10}\text{Be}$  é então fortemente influenciada por transporte local, processos de deposição e a latitude do local (BEER et al., 1990; HEIKKILÄ e SMITH, 2003), enquanto o  $^{14}\text{C}$ , por sua vez, se torna homogeneizado com a atmosfera e então reflete a taxa de produção global média (BEER et al., 1990).

Maiores detalhes sobre a geração destes radionuclídeos são encontrados em SONNET et al. (1990). Estes radionuclídeos cosmogênicos foram utilizados para confirmar a existência de ciclos de períodos mais longos do que o ciclo de Schwabe, tais como os ciclos de DeVries ou Suess, Hallstat, Eddy e Bond (GRAY et al., 2010), que serão mostrados mais adiante.

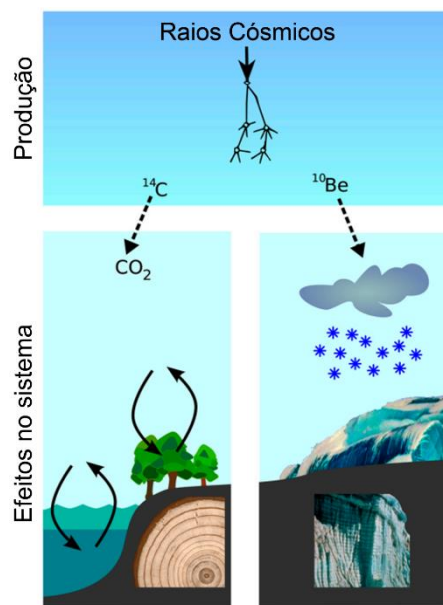


Figura 6 - Ilustração da produção e efeitos do  $^{10}\text{Be}$  e do  $^{14}\text{C}$  no sistema terrestre. Ambos os radionuclídeos tem formação parecida devido à interação de partículas de raios cósmicos com os gases da atmosfera terrestre. Depois da produção na região superior da atmosfera, cada tipo de radionuclídeo tem um destino diferente no sistema terrestre (efeitos no sistema). O  $^{14}\text{C}$  é oxidado em  $\text{CO}_2$  e entra no ciclo global do carbono, percorrendo a atmosfera, biosfera e oceanos. O  $^{10}\text{Be}$  se liga aos aerossóis e, em alguns anos, é depositado no solo. Adaptado de Stenhilber et al., 2012.

Em 1849, Johann Rudolf Wolf, diretor do Observatório de Zurique, criou procedimentos para a observação e registro das manchas solares, dando início ao “número de Wolf” (WSN - do inglês “*Wolf Sunspot Number*”; WOLF, 1851, 1856), que corresponde à quantidade de manchas solares observadas e seus respectivos grupos.

Como os procedimentos criados por Wolf são fortemente dependentes do observador e das condições meteorológicas no horário da observação, a acurácia e validade do número de Wolf foram questionadas, principalmente após a criação do *American Sunspot Number*, por Alan Shapley (SHAPLEY, 1949; CLETTE et al., 2014).

HOYT e SCHATTEN (1998a, 1998b) criaram o *Group Sunspot Number* (GSN), que leva em consideração apenas a contagem dos grupos de manchas solares. Quando comparadas, a GSN apresenta valores aproximadamente 30% menores do que a WSN no período anterior ao ano de 1885, mostrado na Figura 7 (CLETTE et al., 2016), e em ambas está presente uma tendência de aumento nos últimos 150 anos.

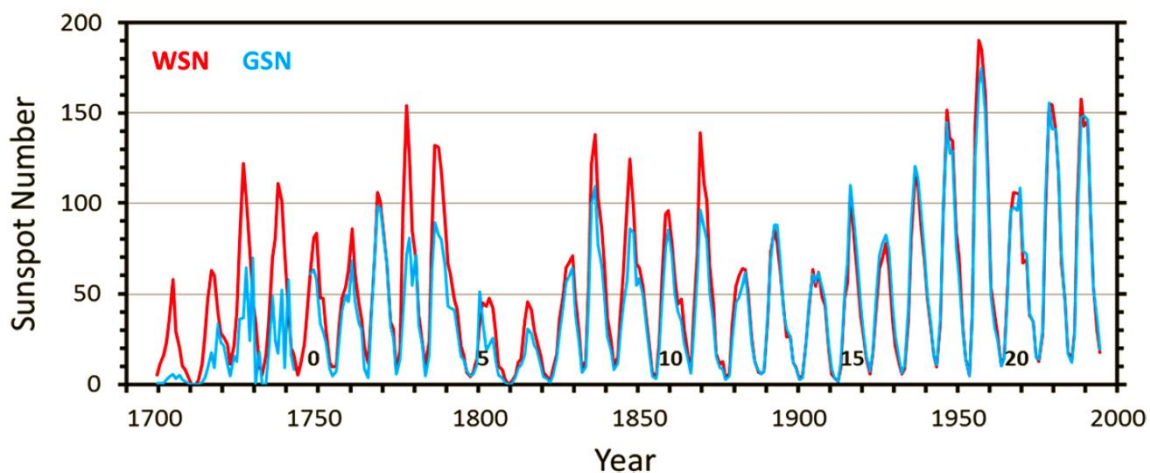


Figura 7 - Comparação das séries temporais de médias anuais de Wolf (WSN, linha vermelha) e Group (GSN, linha azul). Os números dos ciclos estão indicados na região inferior da figura.

Com a constante evolução do conhecimento da física Solar e da instrumentação observacional e computacional, diversos grupos se dedicaram à correção da série de manchas solares, tais como KOPECKY et al. 1980; LETFUS 1993; VAQUERO et al. 2011; LEUSSU et al. 2013; LOCKWOOD et al. 2014, além da criação de novas séries de dados, como CLETTE e LEFÈVRE (2016), SVALGAARD e SCHATTEN (2016), USOSKIN et al. (2016) e FRIEDLI (2016, 2017).

Para uniformizar o conhecimento da comunidade científica sobre as séries de dados de manchas solares, foram organizados diversos workshops sobre o assunto em 2011 (CLIVER, CLETTE, e SVALGAARD, 2013; CLIVER et al., 2015; CLETTE et al., 2014). Desde 2015 está disponível no website do Observatório Real da Bélgica ([www.sidc.be/silso](http://www.sidc.be/silso)) uma nova série de dados totalmente revisada do WSN, designada  $S_N$  (CLETTE et al., 2016).

### 3.1.4.1 Ciclo de Schwabe

Os registros de quantidade de manchas solares feitos desde o século XVIII indicam claramente um perfil cíclico, com média de 11 anos, de atividade solar (Figura 8).

O primeiro a registrar esta variação cíclica na quantidade de manchas solares foi o astrônomo dinamarquês Christian Horrebow na década de 1770, baseado em suas observações feitas entre 1761 e 1776 (GLEISSBERG, 1952; VITINSKY, 1965; HOYT e SCHATTEN, 1998). Especula-se que Horrebow, na verdade, descobriu a existência do ciclo e, no entanto, nunca chegou a publicar a descoberta, deixando apenas comentários de que seria necessário mais tempo de observações sistemáticas para que se confirmasse a existência de um ciclo aproximadamente decadal. Com a morte de Horrebow, em 1776, foi finalizada a iniciativa de observações e registros de manchas solares no observatório Rundetaarn (Copenhague – Dinamarca), deixando o trabalho de Horrebow esquecido (HOYT e SCHATTEN, 1998) durante anos.

Quase 70 anos depois o ciclo de 11 anos foi então publicado por SCHWABE (1843), com base em seus 17 anos de registros de observações do Sol. O trabalho permaneceu obscuro por anos até que foi trazido à luz em 1851, quando o naturalista Alexander Humboldt publicou o livro “Cosmos”, em que é citado o trabalho de Schwabe (HOYT e SCHATTEN, 1998; USOSKIN, 2017). Desde então, o ciclo Solar de 11 anos recebe o nome de Ciclo de Schwabe.

A cada ciclo de 11 anos o dipolo magnético Solar se inverte em ambos os hemisférios, levando 22 anos para voltar ao estado original (HALE et al., 1919; HALE e NICHOLSON, 1925; BABCOCK, 1959). Este ciclo é conhecido como ciclo de Hale.

Uma característica importante do ciclo de Schwabe é que possui também uma variação tanto na amplitude quanto no comprimento (duração) de cada ciclo (HOYT e SCHATTEN, 1998; JAVARAIAH, 2005).

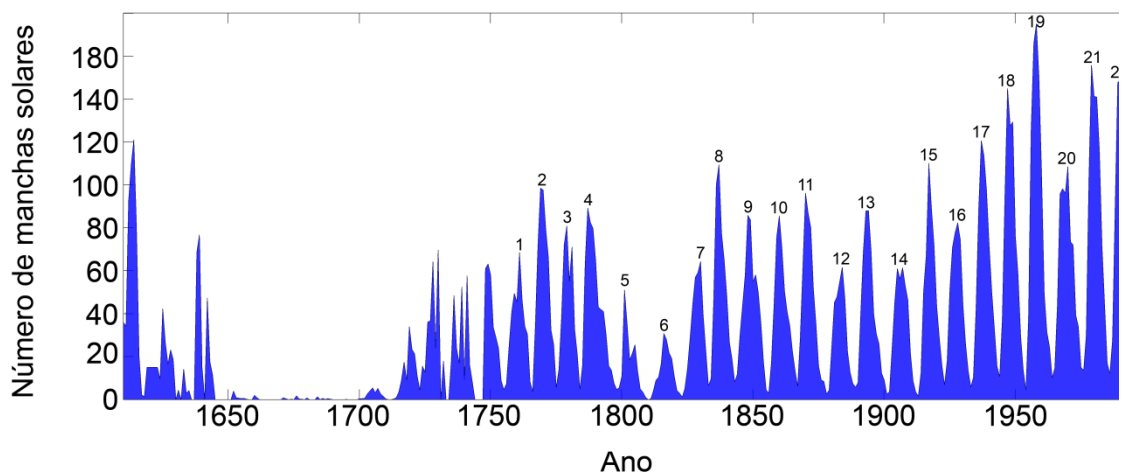


Figura 8 – Série temporal de número de manchas solares (HOYT e SCHATEN, 1998). Os números acima próximos aos picos indicam a contagem dos ciclos de Schwabe, introduzida por WALDMEIR (1961).

### 3.1.4.2 Ciclo de Gleissberg

O ciclo de Gleissberg é uma modulação do ciclo de Schwabe, ou seja, uma tendência de oscilação da amplitude e não um ciclo propriamente dito (GLEISSBERG 1939, 1944, 1965; OGURTSOV, 2002, JAVARAIAH et al. 2005; USOSKIN, 2017). O ciclo de Gleissberg possui dois modos de oscilação: 50-80 anos e 90-140 anos de período (GLEISSBERG, 1971; OGURTSOV, 2002, JAVARAIAH et al. 2005).

O termo “Ciclo Centenário de Gleissberg” (*Centennial Gleissberg Cycle* – FEYNMAN e RUZMAIKIN, 2011) tem sido utilizado para distinguí-lo de outras modulações do ciclo de 11 anos, como o ciclo duplo e Hale (*double Hale Cycle* - FEYNMAN e RUZMAIKIN, 2014).

Os ciclos mais longos não podem ser estudados usando observações solares diretas devido ao relativamente curto período de disponibilidade de dados, mas apenas por meio de indicadores proxies tais como isótopos cosmogênicos. Estudos estatísticos utilizando técnicas de análise de Fourier e Wavelet (OGURTSOV, 2002) aplicadas em dados de proxy também indicam a presença do ciclo centenário de Gleissberg. Entretanto, as questões de sua origem e persistência permanecem abertas (FEYNMAN e RUZMAIKIN, 2014).

Este ciclo tem sido estudado extensivamente, inclusive utilizando outras fontes de dados, tais como o período de rotação do equador Solar (JAVARAIAH et al. 2005), registros de manchas solares, registros de auroras e isótopos cosmogênicos (FEYNMAN e RUZMAIKIN, 2014; PERISTYKH e DAMON 2003).

#### **3.1.4.3 Ciclo de Suess / deVries**

SUESS (1980) buscou registros de  $^{14}\text{C}$  em amostra de anéis de árvores, tendo disponíveis informações de até 7000 anos atrás. Utilizando técnicas de análise espectral (Fourier), encontrou um pico de energia no espectro relativo ao período de 202 anos. De VRIES (1958) também encontrou variações nas taxas de produção dos isótopos cosmogênicos  $^{10}\text{Be}$  e  $^{14}\text{C}$ .

OGURTSOV et al. (2002), utilizando transformadas de Fourier e wavelet, analisou dados de proxy e de observações históricas (durante a era pré-telescópica) feitas a olho nu, buscando indícios dos ciclos solares de longo período. Para isso, além dos registros históricos feitos por astrônomos orientais da antiguidade, utilizou dados de  $^{10}\text{Be}$  obtidos por BARD et al. (1997), que cobre o período de tempo posterior a 850 a.C e dados de  $^{14}\text{C}$  provenientes do trabalho de STUIVER e PEARSON (1993), que cobre o período de 7950 BP. Como resultado, encontrou evidências de que o ciclo de Suess não possui apenas o período de 203 anos, mas que pode ter períodos que variam entre 160 e 260 anos.

#### **3.1.4.4 Ciclos de períodos mais longos**

Além dos ciclos de período relativamente curto, como os descritos anteriormente, o Sol também apresenta oscilações de período mais longo (Figura 9), tais como os Ciclos de Eddy, com período entre 600 e 700 anos e entre 100 e 1200 anos (VITINSKY et al. 1986; SONETT e FINNEY 1990; VASILIEV e DERGACHEV 2002; STEINHILBER et al. 2012; ABREU et al. 2012); Ciclo de Bond, cuja periodicidade é de aproximadamente 1500 anos (BOND et al., 1997, 2001), sendo que seus picos ocorreram em torno de 400, 1400, 2800, 4300, 5900, 8100, 9400, 10300 e 11100 a.p. (anos antes do presente – WANNER e BÜTIKOFER, 2008) e Ciclo de Hallstat, com periodicidade de aproximadamente 2300 anos (DAMON e SONNETT, 1991; CHARVÁTOVÁ, 2000; VASILIEV e DERGACHEV, 2002). De acordo com

USOSKIN (2017), os períodos de mínimo e máximo de atividade solar tendem a ocorrer próximo aos picos e vales do ciclo de Hallstat.

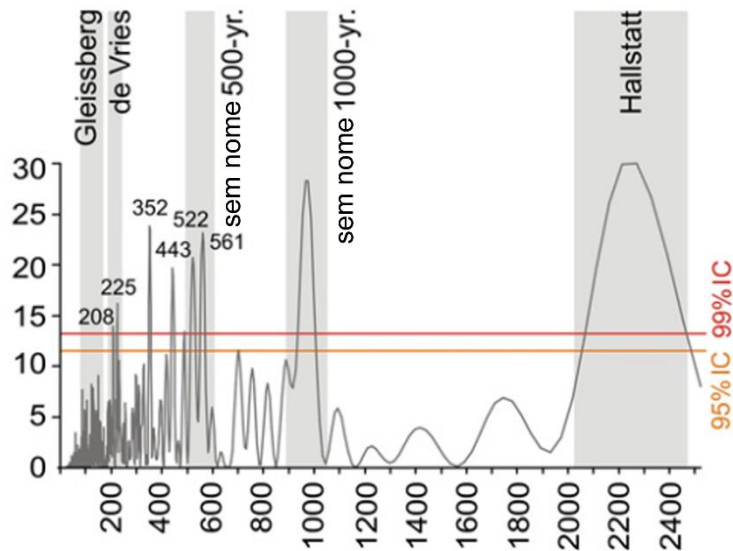


Figura 9 - Periodograma Lomb-Scargle da série temporal de número de manchas solares de SOLANKI et al. (2004), indicando os ciclos de Gleissberg, de Vries e Hallstat e outros dois ciclos sem nome. O ciclo de 1000 anos foi nomeado posteriormente como ciclo de Eddy. As linhas coloridas indicam os intervalos de confiança. O ciclo de Bond não é mostrado nesta figura possivelmente devido à base de dados não ter registrado indícios deste ciclo. Adaptado de KERN et al., 2012

## 2.2. Grandes Máximos

Em comparação com os últimos séculos, em que se tiveram observações diretas do Sol, as últimas décadas tem sido um período de grande atividade solar. O período compreendido entre 1750 e 1900 teve, em média,  $35 \pm 9$  registros de grupos de manchas solares, enquanto que no período da década entre as décadas de 1940 e 1950 até 2000, o nível foi de  $75 \pm 3$  (USOSKIN, 2017). Desta forma, este último período é considerado o Grande Máximo Moderno (ABREU et al., 2008; USOSKIN, 2017). Além disso, outros autores, que utilizaram proxies, também concluíram que as últimas décadas apresentaram atividade solar não-usual (SOLANKI et al. 2004; VONMOOS et al. 2006; MUSCHELER et al. 2007; STEINHILBER et al. 2008).

ABREU et al. (2008) sugeriu que o final do período do Grande Máximo Moderno ocorreria em não mais do que dois ciclos de Schwabe a partir de 2008. Esta previsão foi confirmada com a ocorrência do fraco mínimo de atividade solar ocorrido entre 2008 e 2009 (transição entre os ciclos 23 e 24) e, posteriormente, o retorno ao nível de atividade moderada no ciclo 24 (GIBSON et al., 2011).

Em uma análise de série temporal de 10.000 anos de dados *proxy*, ABREU et al. (2008) encontraram 66 grandes máximos, sendo que apenas 2 duraram menos do que 80 anos e o maior período de grande máximo ocorreu no ano 300 d.C.

## 2.3. Grandes mínimos recentes

Os períodos denominados de Grandes Mínimos são intervalos prolongados de tempo com atividade solar bastante reduzida (p.ex., EDDY, 1976; STUIVER e QUAY, 1981; SOLANKI et al., 2004; USOSKIN, 2008). A causa destes períodos ainda é amplamente discutida na comunidade científica, tanto entre grupos que defendem a teoria do dínamo solar (CHOUDHURI 1992; SCHÜSSLER et al. 1994; SCHMITT et al. 1996; OSSENDRIJVER 2000; WEISS e TOBIAS 2000; MININNI et al. 2001; CHARBONNEAU 2001; SOKOLOFF 2004; MIYAHARA et al. 2006b; MOSS et al. 2008; CHARBONNEAU 2010; KÄPYLÄ et al. 2016) quanto grupos que defendem a hipótese planetária (WOLF, 1859; JOSE, 1965; CHARVÁTOVÁ, 1997, 2000, 2009; JAVARAIAH, 2005; SHIRLEY, 2006; WOLFF e PATRONE, 2010; PERRYMAN e SCHULZE-HARTUNG, 2011) que é a hipótese de que a gravitação dos planetas do sistema solar tem algum tipo de influência na atividade do Sol .

Trabalhos como o de VOSS et al. (1996), EDDY (1977), SOLANKI et al. (2004), STEINHILBER et al. (2012), entre outros, detectaram grande quantidade de períodos de mínima atividade utilizando dados do radioisótopo  $^{14}\text{C}$  e  $^{10}\text{Be}$ .

Os períodos de grandes mínimos mais estudados são o Mínimo de Maunder (1645-1712) e Mínimo de Dalton (1790-1830) (Figura 10), sendo que o por muitas décadas, muita atenção tem sido dedicada ao Mínimo de Maunder como, por exemplo, nos trabalhos de SCHOVE (1955); EDDY (1976); SCHRODER (1979); LEGRAND et al. (1992); RIBES e NESME-RIBES (1993); HOYT e SCHATTEN (1998); LETFUS (2000); NAGOVITSYN (2001); USOSKIN e MURSULA (2001); OGURTSOV et al. (2003); SOKOLOFF (2004); KOVALTSOV et al. (2004) e OGURTSOV (2018).

Nestes períodos foram percebidas quedas de até  $0,6^\circ\text{C}$  na temperatura média do ar no hemisfério norte, que foram registradas tanto por observadores (LAMB, 1995) quanto por reconstrução de *proxies* (LOEHLE e MCCULLOCH, 2008; MANN et al., 2009).

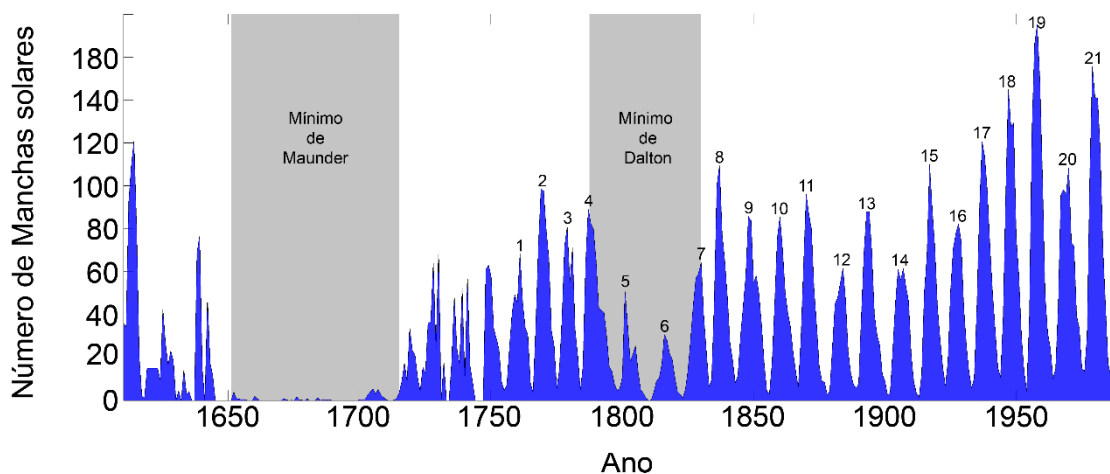


Figura 10 - Número de manchas solares anuais (HOYT e SCHATTEN, 1998). Em destaque: mínimo de Maunder (1650-1715) e mínimo de Dalton (1790-1830). Dados disponíveis em: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/sunspot-numbers/group/archive/original-files/>. Acesso em 07/12/2017.

O trabalho estatístico feito por USOSKIN et al. (2014) indica que, em períodos de atividade solar moderada, o número de manchas solares varia entre 20 e 67. Portanto, o número de manchas solares de 20 unidades pode ser considerado um limite indicativo

de período de grande mínimo de atividade solar (USOSKIN et al., 2014; OWENS et al., 2017).

### **2.3.1. Mínimo de Dalton**

O período conhecido como Mínimo de Dalton ocorreu entre 1790 e 1820. Apesar de ser considerado um grande mínimo (USOSKIN, 2017), a atividade solar não foi completamente suprimida como no Mínimo de Maunder (USOSKIN, 2017; WAGNER, 2004), apresentando o ciclo de Schwabe com menor amplitude com os ciclos 5 e 6. Em termos de irradiância solar, de acordo com as reconstruções feitas por HOYT e SCHATEN (1993) e LEAN et al. (1995), os níveis atingidos durante o Mínimo de Dalton não foram tão baixos quanto os do período do Mínimo de Maunder.

O trabalho de SCHUSSLER et al. (1997) levanta a hipótese de que este é um período de transição entre dois estados do dínamo solar, entre um estado de mínima atividade e a atividade normal. Outra hipótese é a ocorrência de uma “tentativa” malsucedida de transição de atividade solar para um período de grande mínimo (FRICK et al., 1997; SOKOLOFF 2004) como o Mínimo de Maunder.

Nesta época foi registrada grande atividade vulcânica como, por exemplo, a erupção do Monte Tambora (Indonésia) em 1815. A ejeção de gases e material particulado causou o resfriamento em diversos lugares do planeta, tais como no centro-oeste da América do Sul, noroeste dos Estados Unidos, Europa, parte da Rússia, Tibet e Nova Zelândia (HOYT e SCHATEN, 1993). Além disso, os anos seguintes foram caracterizados por temperaturas baixas nos verões (BRIFFA et al., 1998). De acordo com (HOYT e SCHATEN, 1993), existem indícios de que estas alterações de temperatura podem ter sido amplificadas pela presença do Mínimo de Dalton.

### 2.3.2. Mínimo de Maunder

SPÖRER (1887 e 1889) chamou a atenção para o período de 70 anos, entre 1645 a 1715, em que a atividade Solar apresentou um período prolongado de mínima atividade, com pouco ou nenhum registro de manchas solares (EDDY, 1976). O Astrônomo E. W. Maunder, em 1890, compilou as descobertas de Spörer e relatos de outros Astrônomos sobre a ausência de manchas solares e denominou o período como “*prolonged sunspot minimum*” (EDDY, 1976), que foi posteriormente nomeado por EDDY (1976) e aceito pela comunidade científica como “Mínimo de Maunder”, mesmo tendo sido Spörer o primeiro a perceber tal fenômeno.

Em entrevista a Spencer Weart, do American Institute of Physics, John Eddy explica o motivo da escolha do nome “Mínimo de Maunder” (Anexo I).

EDDY (1976) produziu extensa pesquisa indicando a correlação entre os registros de manchas solares com dados de  $^{14}\text{C}$  provenientes de anéis de crescimento de árvores, registros escritos de ocorrência de auroras e dados climatológicos e, com isso, foi demonstrada a ocorrência do Mínimo de Maunder. Também RIBES e NESME-RIBES (1993), HOYT e SCHATTEN (1998) e LETFUS (2000) chegaram à conclusão de que o período do Mínimo de Maunder foi caracterizado pela praticamente total ausência de manchas solares. Desta forma, baseado em dezesseis reconstruções da atividade solar utilizando dados de isótopos cosmogênicos, OGURTSOV (2018) conclui que a atividade durante o Mínimo de Maunder foi consideravelmente mais profunda do que o Mínimo de Dalton.

A autenticidade deste período prolongado de pouca atividade Solar foi questionada (maiores detalhes em CLIVER (1994) e LETFUS (2000)), pois seu registro ocorreu pouco tempo após a descoberta da existência das manchas, e sua quase ausência poderia ser atribuída à falta de metodologia e observações sistemáticas (WILSON, 1994).

Trabalhos como os de OGURTSOV (2013), ZOLOTOVA e PONYAVIN (2015) e SVALGAARD e SCHATTEN (2016) sugerem que a atividade solar durante o Mínimo de Maunder pode ter sido subestimada. As observações feitas na época do Mínimo de Maunder eram realizadas em poucos observatórios da Europa utilizando telescópios recém-construídos (EDDY, 1976; SVALGAARD e SCHATTEN, 2016; OGURTSOV, 2013 e 2018), e também observações a olho nu no oriente, principalmente na China (EDDY, 1983; NAGOVITSYN, 2010). Estas observações

eram registradas através de desenhos em papel e posteriormente analisadas (EDDY, 1976; SVALGAARD e SCHATTEN, 2016; OGURTSOV, 2013 e 2018), existindo a possibilidade de erros de observação devido aos fenômenos atmosféricos, calibração dos instrumentos, etc.

Apesar da discussão em torno da quantidade exata de manchas solares existentes durante o período de 1645 a 1715, o consenso é de que o Mínimo de Maunder foi uma realidade.

Diversos autores mostram evidências de que outras estrelas também possuem períodos de mínima atividade do tipo Mínimo de Maunder (BALIUNAS e JASTROW, 1990; BALIUNAS et al., 1995) ou ciclos de atividade estelar em estrelas mais frias (WILSON, 1978), estrelas anãs frias (SHAPIRO et al. 2015; KAROFF et al. 2018), estrelas jovens e de rotação rápida (RADICK, 2018), estrelas mais velhas e de rotação lenta (EGELAND et al. 2017), apenas para citar alguns exemplos. As escalas de tempo dos ciclos estelares podem variar entre poucos anos e uma década (OLÁH et al., 2016).

De acordo com USOSKIN et al. (2000), uma característica do Mínimo de Maunder é que seu início é abrupto e o final é sucedido por lento retorno aos níveis normais de atividade (Figura 11).

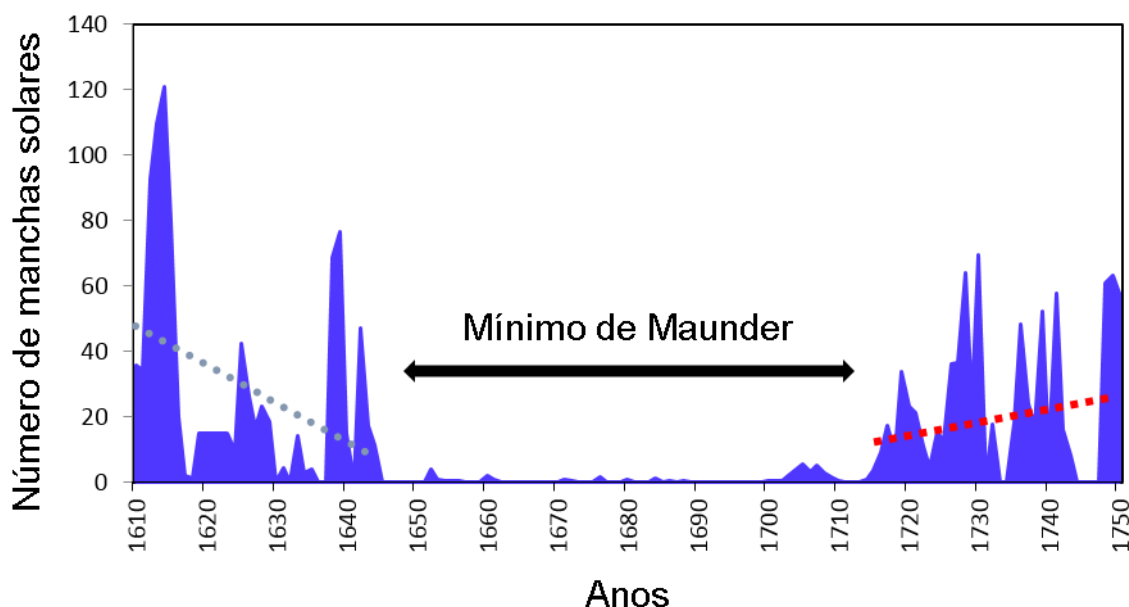


Figura 11 - Registro de número de manchas solares anuais (HOYT e SCHATTEN, 1997). A linha pontilhada azul indica a tendência linear de queda com coeficiente angular maior do que a tendência de crescimento em vermelho. Isto é um indicativo de

que o início do Mínimo de Maunder é abrupto e a retomada da atividade solar a partir de 1715 é mais lenta, como descrito por USOSKIN et al. (2000).

O Mínimo de Maunder é, muitas vezes, associado ao termo “*Little Ice Age*” (Pequena Era do Gelo). A Pequena Era do Gelo foi um período de temperaturas globais mais baixas, ocorrido entre os séculos 1500 e 1800, aproximadamente (LAMB, 1965 e 1977; FLOHN, 1978; MIKAMI, 1992). O período exato de início e término da “*Little Ice Age*” não é determinado com precisão. Alguns autores indicam os seguintes períodos de tempo: 1500 a 1750 (BARD et al., 2000), 1500 a 1800 (VASILIEV e DERGACHEV, 2002), 1450 a 1800 (WAGNER e ZORITA, 2005), entre os séculos XV e XVII (SHINDELL et al., 2001), início do século XVI e fim do século XIX (KANE, 2002).

### **3.3.2.1 TSI durante o Mínimo de Maunder.**

A diminuição da TSI associada à diminuição da atividade solar pode ter contribuído para o evidente resfriamento em regiões da Terra durante a *Little Ice Age* (EDDY, 1976; MEEHL et al., 2013). Não existem indícios de que esta redução de temperatura tenha ocorrido globalmente, e tampouco de maneira homogênea (EDDY, 1976). No entanto, os valores de TSI durante o mínimo de Maunder podem ser apenas estimados devido à existência somente de registros de observações de manchas solares ao invés de medições propriamente ditas de TSI, devido à falta de instrumentação adequada à época.

A estimativa dos valores de TSI em épocas anteriores ao início do lançamento de satélites em 1978 é realizada a partir de métodos indiretos, utilizando proxies com registros de isótopos cosmogênicos, de atividades geomagnéticas, além de diferentes abordagens com modelos de atividade solar (FRÖHLICH e LEAN, 2004).

Existem, basicamente, quatro tipos de modelos de atividade solar para estimar a quantidade de energia emitida pelo Sol: modelo do Sol quieto (*constant quiet Sun*), modelo do diâmetro solar (*solar diameter model*), modelo de atividade do envelope (*activity envelope model*) e modelo de variação umbra/penumbra (*umbra/penumbra variation model*) (HOYT e SCHATTEN, 1993).

O modelo do Sol quieto faz uma simplificação da atividade solar, considerando apenas o ciclo de 11 anos, inclusive tornando todos os mínimos de atividade sempre os mesmos FOUKAL e LEAN (1990) e SCHATTEN e OROSZ (1990).

O modelo do diâmetro solar utiliza o diâmetro do Sol ou a taxa em que ocorrem suas variações como um proxy para as variações da irradiância solar (NESME-RIBES et al., 1993) sendo, entretanto, desconsiderado por outros autores (RAPP 2014; FOUKAL et al., 2006 e ROZELOT et al., 2009) pela falta de indícios de que o diâmetro do Sol tem algum tipo de influência na irradiância solar.

De acordo com o modelo de atividade do envelope, as variações de longo período da irradiância acompanham o “envelope” de uma onda com período longo (ciclo de Gleissberg), de maneira que os mínimos do ciclo de Schwabe variem ao longo do tempo (REID, 1991; HOYT e SCHATTEN, 1993).

O modelo de variação de umbra-penumbra (NORDO, 1955 e HOYT, 1979) utiliza a razão entre as áreas de umbra e as áreas de penumbra como um *proxy* para a medição da irradiância solar.

Segundo EGOROVA et al. (2018), alguns trabalhos têm estimado o valor de TSI durante o Mínimo de Maunder, entretanto, sem um consenso quanto a este valor (Tabela 2). Quando comparado ao valor do último mínimo do ciclo de Schwabe ocorrido em 2009, de aproximadamente  $1360,5 \text{ Wm}^{-2}$ , a estimativa a que chegaram estes trabalhos pode variar entre 0,1 e  $6 \text{ Wm}^{-2}$ . Estas estimativas foram feitas seguindo diferentes metodologias, como em WANG et al. 2005, TAPPING et al. 2007, STEINHILBER et al. 2009, KRIVOVA et al. 2007, VIEIRA et al. 2011, SHAPIRO et al. 2011 e EGOROVA et al., 2018.

Tabela 2 - Alguns valores de estimados de TSI para o período do Mínimo de Maunder.

Referência	TSI (%)	TSI ( $\text{Wm}^{-2}$ )	Valor de referência
Lean et al., 1992	0,24	1364,28	1367,6 Período entre 1980 e 1986
Steinhilber et al., 2009		0.9 $\text{Wm}^{-2}$	1365,9 do ciclo solar 22 1986-1996
Song et al., 2010	0,2	1367,0	Valor em 1998
Feulner e Rahmstorf, 2010	0,08 e 0,25	1366,0	Valor em 1950
Shapiro et al., 2011	6 $\pm$ 3 $\text{W m}^{-2}$		
Foukal et al., 2011	0,15 - 0,3		Mínimo de 2009 (PMOD)
Shapiro et al., 2011	0,4	6 +- 3	1365,5 (mínimo de 1996)
Jones et al., 2012	0,08 e 0,25	1366,0	Valor em 1950
Anet et al., 2013	0,3 e 0,45	4 e 6	1333,3
Meehl et al., 2013	0,25	1360,7	Valor do último período de mínimo
Ineson et al., 2015	0,12	1366,2	CMIP5 RCP8.5
Maycock et al., 2015	0,12	1366,2	CMIP5 RCP8.5

Apesar complexidade envolvida na estimativa dos valores de TSI durante o período do Mínimo de Maunder, seja utilizando modelos ou proxies, além da ausência de consenso sobre a quantidade definitiva de energia, é considerada pequena a diferença percentual entre os valores dos mínimos de atividade solar mais atuais e o Mínimo de Maunder. Em termos absolutos, a diferença mais extrema seria de 6  $\text{Wm}^{-2}$ , o que corresponderia a 0,44% do valor de referência de 1360,5  $\text{Wm}^{-2}$ .

Em termos percentuais, a diferença mais extrema, de 6  $\text{Wm}^{-2}$ , corresponderia a 0,44% do valor de 1360,5  $\text{Wm}^{-2}$ .

#### 2.4. Previsões de ciclos solares

Ao longo de vários anos, diferentes grupos de cientistas têm trabalhado com previsões dos próximos ciclos solares. Mais especificamente os ciclos de Schwabe, por serem os ciclos de menor período, pois isso possibilita o teste relativamente mais rápido das diferentes técnicas de previsão.

Um levantamento bastante extenso de previsões de manchas solares foi feito por PESNELL (2016), que verificou 105 previsões para o ciclo 24 (considerado um ciclo

fraco), cujo início se deu em 2008 e previsão de término em 2019, publicadas na literatura científica até aquele ano. O autor separou as previsões em 6 grandes grupos, de acordo com as técnicas utilizadas: previsões baseadas em uma climatologia recente de quantidade de manchas, técnicas espectrais, redes neurais, modelos de dínamo solar, climatologia de prazo mais extenso e técnica de precursores, como a intensidade do campo magnético nos polos solares. A média do conjunto de previsões foi de  $106 \pm 31$  manchas, ou seja, com um grande espalhamento de resultados. O número realmente registrado para o pico de atividade do ciclo 24 foi de aproximadamente 80 manchas. Além disso, existe uma considerável similaridade entre o ciclo 24 e o ciclo 16, que ocorreu entre 1923 e 1934.

Trabalhos como o de DANI e SULISTIANI (2019), utilizam técnicas de aprendizado de máquina para prever o ciclo 25. De acordo com os autores, o ciclo 25 seria um pouco mais intenso do que o ciclo 24. Esta conclusão é diferente de parte dos outros trabalhos sobre o mesmo tema, que preveem o ciclo 25 com menor amplitude do que o ciclo 24 (HAZRA e CHOUDHURI, 2019; SINGH e BHARGAWA, 2019; SHEPHERD et al., 2014), sendo que SHEPHERD et al (2014) conclui que os ciclos 25 e 26 serão, respectivamente, 20% e 60% menores do que o ciclo 24. Outros trabalhos como o de PESNELL (2018) especulam que o ciclo 25 pode ser similar ao ciclo 24.

O Sol apresentou atividade muito pequena no ciclo 24 quando comparado aos ciclos anteriores, do 21 ao 23, particularmente devido ao seu período muito longo e incomum de mínima atividade entre os ciclos 23 e 24, que durou mais de dois anos entre 2008 e 2010, em que não foram registradas quaisquer quantidades de manchas ou variações do campo magnético, modulação do campo magnético, ou até mesmo ejeção de massa (LOCKWOOD, 2010; RUSSEL et al., 2010; SHEPHERD et al., 2014). Além disso, este período de mínimo prolongado entre os ciclos é incomum, pois os cinco ciclos anteriores foram extremamente ativos, sendo até mesmo considerado por ABREU et al. (2008); SOLANKI et al. (2004); USOSKIN (2008); USOSKIN et al. (2008); SOLANKI e KRIVOVA (2011); JONES et al., (2012) como um período de grande máximo solar.

Apesar deste período de grande máximo solar, o rápido declínio de atividade entre os ciclos 23 e 24 foi o maior já registrado desde o Mínimo de Maunder, superando até mesmo o declínio que deu início ao Mínimo de Dalton, por volta do ano 1800. Este declínio leva a especulações sobre a futura atividade solar e pode ser um indicativo de início de um novo período de grande mínimo solar prolongado (LOCKWOOD et al.

2010, LOCKWOOD et al. 2011, Barnard e al 2011). Diversos trabalhos têm sido publicados sobre a possibilidade de diminuição da atividade solar no século 21, rumo a um novo patamar de mínima atividade, similar ao Mínimo de Maunder (ABREU et al., 2008, LOCKWOOD et al., 2011, Anet et al., 2013) ou Mínimo de Dalton (NIELSEN e KJELDSSEN, 2011).

Segundo LOCKWOOD (2010), nos anos subsequentes ao período de grandes máximos, existe uma chance de 8% de que nos próximos 40 anos após este período o Sol entre em um estado similar ao Mínimo de Maunder. Entretanto, de acordo com JONES et al. (2012), a probabilidade aumenta para 50% para os 100-200 anos seguintes. ABREU et al. (2010) também calcula que um novo período de grande mínimo solar possa ocorrer nos próximos 100 anos.

Desde 1989 são organizadas reuniões de cientistas na sede do National Centre for Atmospheric Research (NCAR). Na primeira reunião, em 1989, foram discutidas as previsões do ciclo 22. Em 2019, a reunião foi organizada para discutir as previsões para o ciclo 25 (Solar Cycle 25 Prediction Panel).

Nestes eventos, os especialistas discutem sobre os modelos de previsão de ciclos solares e seus resultados, votando, ao final, nas previsões de intensidade, período de mínimo e máximo. Os resultados da reunião de 2019 indicam uma variação entre 95 a 130, que seria um ciclo considerado fraco como o ciclo 24. Além da intensidade do ciclo, também são votados os períodos de mínimo e máximo do ciclo, indicando os meses entre julho e setembro de 2019 como o mínimo e o máximo ocorrendo entre 2023 e 2026 (SCOLES, 2019).

A previsão dos próximos ciclos solares ainda é um tema em aberto e sem consenso na ciência, dependendo cada vez mais dos avanços teóricos e tecnológicos. Os avanços permitem elaborar modelos cada vez mais complexos de previsão não apenas dos ciclos de manchas solares, como também das demais características físico-químicas do Sol.

## **2.5. Componentes do Sistema Climático**

Os sistemas climáticos são divididos em cinco componentes (STOCKER, 2011; PEIXOTO e OORT, 1992):

Atmosfera: camada majoritariamente gasosa sobre a superfície terrestre, composta por substâncias gasosas, líquidas e sólidas. Inclui os balanços de radiação, formação de nuvens e precipitação, fluxos atmosféricos, reservatórios de gases emitidos

naturalmente e antropogênicos, além do transporte de calor, vapor d'água, poeira e aerossóis.

**Hidrosfera:** está relacionada a todas as formas de água sobre e sob a superfície da Terra, que inclui todos os oceanos e o ciclo hidrológico global, após a água tocar a superfície. Inclui a distribuição global e mudanças na injeção de água em diferentes bacias oceânicas, transporte de massa d'água nos oceanos, transporte de calor nos oceanos, troca de vapor d'água e outros gases entre oceanos e atmosfera e é o mais importante reservatório de carbono e calor.

**Criosfera:** todas as formas de gelo do sistema climático, incluindo massas de gelo sobre continente, plataformas de gelo, gelo marinho, glaciais e *permafrost*. São reservatórios de longo período de água e influenciam na salinidade em regiões do oceano.

**Litosfera:** inclui os continentes, cuja topografia afeta os movimentos do ar e o assoalho oceânico. Existe uma interação entre a litosfera e a atmosfera através da transferência de massa, momento angular e calor sensível, assim como a dissipação da energia cinética pela fricção na camada limite atmosférica. Além disso, também inclui a transformação de radiação de onda curta em radiação de onda longa.

**Biosfera:** vegetação terrestre, fauna continental, fauna e flora oceânica. Determina a troca de carbono entre diferentes reservatórios e, portanto, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera através da fotossíntese e respiração, assim como o balanço entre os outros gases, além do balanço radiativo. No geral, a biosfera é sensível às mudanças no clima atmosférico e fornece indícios do clima de épocas passadas.

## 2.6. Balanço de radiação global do sistema climático

Para existir o balanço radiativo, a radiação que sai do sistema Terra/atmosfera precisa estar em equilíbrio com a radiação que entra no sistema. As equações apresentadas nesta seção são provenientes de HAIGH (2004).

A quantidade de energia entregue para o sistema climático terrestre é dado pela equação (1).

$$P_{in} = I_{TS}\pi R_E^2(1 - A) \quad (1)$$

Em que  $I_{TS}$  é a Irradiância Solar Total (TSI),  $R_E$  é o raio médio da Terra,  $A$  é o albedo, isto é, a fração da radiação de onda longa incidente sobre a Terra que é refletida de volta para o espaço, integrado em todas as direções.

A radiação de onda longa que é emitida pela Terra é dada pela equação (2).

$$P_{out} = 4\pi R_E^2\sigma T_E^4 = 4\pi R_E^2\sigma(1 - g)T_S^4 \quad (2)$$

Em que  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $T_E$  é a temperatura efetiva da Terra e sua atmosfera ( $\approx 255$  K),  $T_S$  é a temperatura da superfície da Terra e  $g$  é o efeito estufa normalizado ( $= G/(\sigma T_S^4)$ ).  $G$  representa o forçante radiativo de efeito estufa (em  $Wm^{-2}$ ). Em equilíbrio radiativo,  $P_{out} = P_{in}$ , então  $T_S$  é calculada com a equação (3).

$$T_S = \left[ \frac{I_{TS}(1 - A)}{4\sigma(1 - g)} \right]^{1/4} \quad (3)$$

Para os cálculos de balanço de energia, deve-se levar em consideração que a Terra emite energia como uma esfera, mas absorve apenas pela área circular voltada para o Sol. Então, o balanço pode ser descrito pela equação (4).

$$I_{TS}\pi R_E^2 = E4\pi R_E^2 \quad (4)$$

Utilizando um valor de TSI como, por exemplo,  $ITS = 1366.5 Wm^{-2}$ , que incide sobre o disco terrestre de área  $\pi R_E^2$ , e considerando a radiação emitida pela Terra ( $E$ ) pela área da esfera terrestre  $4\pi R_E^2$ , então a energia incidente por unidade de área é de aproximadamente  $1366.5/4 = 342 Wm^{-2}$ . A radiação refletida é de aproximadamente  $107 Wm^{-2}$ , então, o albedo é  $A \approx 107/342 \approx 1/3$ . A energia refletida pelas nuvens, aerossóis e etc. é de aproximadamente  $77 Wm^{-2}$ , então a contribuição atmosférica do albedo terrestre é de aproximadamente 72%. A energia refletida pela superfície é de aproximadamente  $30 Wm^{-2}$ , então a contribuição da superfície para o albedo é de



HAYGH et al. (2004), WASHINGTON e PARKINSON (2005), TRENBERTH (2009), STOCKER (2011), não apresentam valores iguais entre seus respectivos trabalhos, entretanto as diferenças não são consideráveis, mantendo a concordância com as ordens de grandeza.

## 2.7. Processos de feedback

O *feedback*, ou mecanismo de retroalimentação, é de grande importância em sistemas abertos, tais como os componentes do sistema climático. Os mecanismos de *feedback* atuam como controles internos do sistema e resultam de um acoplamento especial ou ajuste mútuo entre dois ou mais subsistemas (PEIXOTO e OORT, 1992). Parte do sinal de saída retorna como sinal de entrada, e então a resposta do sistema é alterada; o *feedback* pode atuar tanto para amplificar o sinal de saída (positivo) quanto para diminuí-lo (negativo) (PEIXOTO e OORT, 1992).

Em situação de equilíbrio, o balanço radiativo (radiação solar menos a terrestre) no topo da atmosfera é zero. A temperatura média da superfície da Terra pode então ser considerada como uma das respostas do sistema climático às forçantes externas, levando em consideração todos os possíveis *feedbacks* internos. Quaisquer perturbações como, por exemplo, mudanças na radiação solar, nuvens, dióxido de carbono, erupções vulcânicas e etc, induzirão o desequilíbrio no balanço radiativo no topo da atmosfera (PEIXOTO e OORT, 1992).

Um fator importante no balanço de energia é o albedo. O albedo é o coeficiente de reflexão, ou seja, é a razão entre a radiação refletida pela superfície e a radiação incidente sobre ela.

Um exemplo de *feedback* positivo é o processo de aumento da cobertura de gelo e neve, que dependem fortemente da temperatura do ar próxima à superfície. Se, por alguma razão, a temperatura diminuir, a quantidade de gelo e neve aumentaria ou permaneceria por um tempo mais longo, o que levaria a um aumento do albedo planetário.

Com este aumento do albedo, mais radiação solar seria refletida e menos energia estaria disponível para esquentar a atmosfera e, desta forma, a temperatura do sistema atmosfera-neve/gelo diminuiria. Por outro lado, se a cobertura de neve e gelo diminuísse de tamanho, o albedo diminuiria. Neste caso, menos radiação solar seria

refletida, aumentando a temperatura, o que levaria a uma diminuição da cobertura de neve e gelo (PEIXOTO e OORT, 1992).

Como exemplo de feedback negativo pode-se considerar o acoplamento temperatura-radiação de onda longa. Se a temperatura aumenta, a atmosfera perde mais radiação de onda longa para o espaço, reduzindo, assim, a temperatura e atenuando a perturbação inicial.

Um fator importante para o feedback é a presença de nuvens, que são excelentes absorvedores de radiação de onda longa (infravermelha) e excelentes refletores de radiação de radiação solar (onda curta). A quantidade de radiação de onda longa que é emitida para o espaço depende da temperatura do topo das nuvens, que é menor do que a quantidade de radiação emitida pela atmosfera sem nuvens e pela superfície terrestre, que são mais quentes.

Então, a quantidade líquida de radiação emitida para o espaço é reduzida pela presença de nuvens e parte da radiação fica retida na atmosfera, aumentando o efeito estufa devido ao vapor d'água (PEIXOTO e OORT, 1992).

## **2.8. Variabilidade Climática**

Em 1988, devido ao interesse da comunidade científica e do público em geral em evidências científicas sobre as possíveis mudanças climáticas, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*). Desde então, a cada quatro anos, milhares de pesquisadores de todo o mundo se reúnem e geram relatórios sobre as mudanças climáticas, com estudos e informações que podem ser consultadas pelo público. Além disso, também é gerado um relatório sumário para tomadores de decisões, que resume os principais temas abordados nos outros relatórios, auxiliando na elaboração de diretrizes ambientais e socioeconômicas.

O IPCC *Fifth Assessment Report* (AR5 - IPCC 2013) afirma que as emissões dos gases de efeito estufa têm aumentado e, atualmente, estão no nível mais alto desde a era pré-industrial, causado pelo crescimento econômico e populacional. Além disso, o AR5 cita que as evidências das alterações climáticas influenciam mudanças em padrões de migrações de espécies, atividades sazonais, interações entre espécies e etc. Outra conclusão do AR5 é que mudanças em diversos eventos extremos, tanto climáticos quanto na escala de tempo, tem sido associadas à atividade humana, incluindo

diminuição nos extremos de temperaturas mais frias e aumento de eventos de precipitação intensa em diversas regiões.

Estas afirmações dos integrantes dos grupos de estudos que geram os relatórios do IPCC estão baseadas em diversos critérios de risco, com evidências robustas (MACH et al., 2016). A mitigação de influências humanas, tais como a redução de emissão de gases de efeito estufa e de aerossóis é um grande desafio para a humanidade atualmente (TRENBERTH, 2013).

A influência humana no clima tem o potencial de forçar os componentes do sistema climático a atingir limites críticos, ou pontos de inflexão (do inglês “*tipping point*”), em que o estado do sistema futuro difere do estado anterior, levando a impactos em grande escala no sistema humano e ecológico (LENTON et al., 2008). Um dos exemplos de ponto de inflexão dado pelo autor é a diminuição da camada de gelo da Groenlândia.

Segundo LENTON et al. (2008), diversos autores definiram uma mudança climática abrupta como a que ocorre quando o sistema climático é “forçado a cruzar algum limite, dando início a uma transição rumo a um novo estado, a uma taxa determinada pelo próprio sistema climático e mais rápido do que a causa desta mudança” (MICHAELOWA, 2004), entretanto, existem casos em que esta mudança é mais lenta e não necessariamente causada pela ação humana. MICHAELOWA (2004) indica diversas formas de se encontrar mudanças climáticas abruptas do passado utilizando indicadores paleoclimáticos, tais como bolhas de ar armazenadas em amostras de gelo, corais e sedimentos oceânicos, anéis de árvores, sedimentos de lagos e formações em cavernas.

Já os elementos de inflexão (do inglês “*tipping elements*”) são subsistemas da Terra que estão associados a regiões específicas do globo e que são de escala continental, em que pequenas mudanças levam a grandes alterações do estado futuro. Os elementos de inflexão foram mapeados por LENTON et al. (2008) (Figura 13) e levam em consideração fatores políticos e de preocupação com o meio-ambiente por parte das populações, sugerindo, então, que as escalas de tempo das análises sejam feitas dentro do atual milênio.

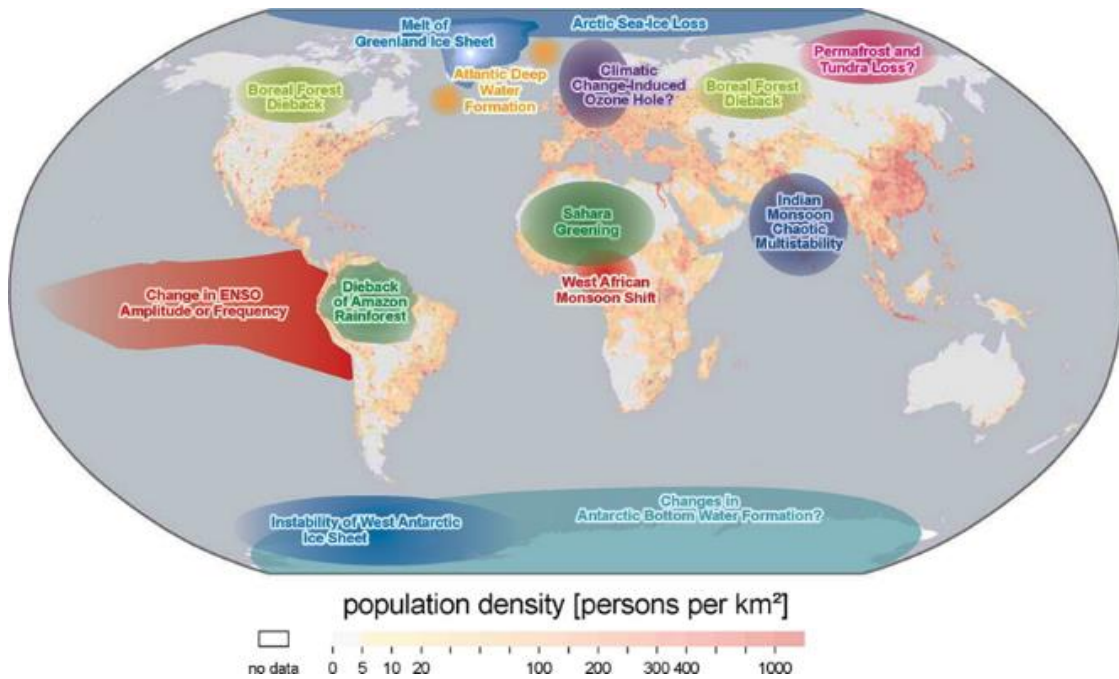


Figura 13 - Mapa dos potenciais futuros elementos de inflexão de relevância política no sistema climático sobreposto à densidade populacional. Nos locais demarcados existe a possibilidade de ocorrência de ponto de inflexão devido à forçantes antropogênicos. (Adaptado de LENTON et al. 2008).

Na Tabela 3 são apresentados os elementos de inflexão, suas feições e direção de mudança, os parâmetros de controle, valores críticos para atingir o ponto de inflexão, as escalas temporais e os impactos principais após a ocorrência do ponto de inflexão.

Tabela 3 - Potenciais elementos de inflexão futuros de relevância política no sistema climático. Fonte: Modificado de LENTON et al. (2008) por SANCHO (2016).

Elemento de Inflexão	Feição do Sistema, F (direção da mudança)	Parâmetro(s) de Controle, $\rho$	Valor(s) Crítico(s) <sup>*1</sup> , $\rho_{crit}$	Aquecimento Global <sup>*1,2</sup>	Escala de Tempo de Transição <sup>*1</sup> , T	Impactos-chave
Gelo marinho do verão no Ártico	Extensão da área (-)	$\Delta T_{ar}$ <sup>*3</sup> local, transporte oceânico de calor	Não identificado <sup>*5</sup>	+0,5-2°C	≈10 anos (rápido)	Aquecimento amplificado, mudança no ecossistema
Placa de gelo da Groenlândia	Volume de gelo (-)	$\Delta T_{ar}$ local ou menor $\Delta T_{oceano}$ <sup>*4</sup>	+≈3°C	+1-2°C	>300 anos (lento)	Aumento do nível do mar em 2-7m
Placa de gelo do oeste da Antártida	Volume de gelo (-)	$\Delta T_{ar}$ local	+≈5-8°C	3-5°C	>300 anos (lento)	Aumento do nível do mar em 5m
Circulação Termohalina do Atlântico	Revolvimento ( <i>Overturning</i> ) (-)	Inserção de água doce no AN	+0,1-0,5 Sv <sup>1</sup>	3-5°C	≈100 anos (gradual)	Resfriamento regional, mudança no nível do mar, mudança na ZCIT
El Niño Oscilação Sul	Amplitude (-)	Profundidade e inclinação da Termoclina no PEL	Não identificado <sup>*5</sup>	+3-6°C	≈100 anos (gradual)	Seca no sudeste da Ásia e em outros lugares
Monção do verão indiano	Precipitação (-)	Albedo planetário na Índica	0.5	Não disponível	≈1 ano (rápido)	Seca, decréscimo na capacidade de carga
Monção do Sahara/Sahel e oeste africano	Fração de Vegetação (+)	Precipitação	100 mm/ano	+3-5°C	≈10 anos (rápido)	Perda de biodiversidade, diminuição da precipitação
Floresta Amazônica	Fração de árvores (-)	Precipitação e duração da estação seca.	1.100 mm/ano	+3-4°C	≈50 anos (gradual)	Mudança de bioma.
Floresta Boreal	Fração de árvores (-)	$\Delta T_{ar}$ local	+≈7°C	+3-5°C	≈100 anos (gradual)	

1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>

<sup>\*4</sup>  $\Delta T_{oceano}$  → Diferença de temperatura do oceano.

<sup>\*1</sup> Números preliminares e derivados de avaliações de especialistas.

<sup>\*5</sup> Teoria, resultados de modelo ou dados pretéritos sugerem a existência de um limiar crítico, mas não existe o valor

<sup>\*2</sup> Mudança da temperatura média global acima do presente (1980-1999) que correspondem ao valor crítico de controle, que pode ser relacionado à temperatura global.

<sup>\*3</sup>  $\Delta T_{ar}$  → Diferença de temperatura do ar.

A Figura 13 e a Tabela 3 fornecem, então, indicadores dos locais de potenciais elementos de inflexão e as características dos pontos de inflexão, que serão investigados nas simulações executadas neste trabalho.

## **2.9. Modelagem Computacional, modelos climáticos e de sistema terrestre**

Apesar de EDDINGTON (1923) afirmar que “o espaço não é um grande número de pontos próximos um ao outro, mas uma grande quantidade de distâncias interligadas” (livremente traduzido do Inglês “*space is not a lot of points close together; it is a lot of distances interlocked.*”), parte-se da suposição de que a Natureza pode ser matematicamente discretizada, ou seja, dividida em porções individuais com a finalidade de se efetuar os cálculos a cada incremento de tempo e/ou espaço.

Os cálculos aritméticos efetuados pelo computador podem levar a erros de arredondamento e truncamento, pois o conjunto de números representáveis em qualquer máquina é finito (BURDEN, 1989; CUMINATO, 1996). Os erros de truncamento ocorrem quando se trunca uma expressão matemática contínua em um número finito de passos. Outro erro a ser considerado é o de arredondamento, que é a diferença entre um número aproximado pelo computador e o número exato, que ocorre com os cálculos feitos com as representações aproximadas dos números verdadeiros (BURDEN, 1989).

As operações aritméticas realizadas computacionalmente podem carregar estes erros para as próximas etapas dos cálculos, tornando-os cada vez maiores (CUMINATO, 1996; BURDEN, 1989).

Os modelos computacionais atmosféricos são uma importante ferramenta para o estudo com simulações do estado passado, atual e futuro da atmosfera, pois, com eles, podem-se criar mundos inteiros (modelos globais) ou regiões delimitadas (modelos regionais). O modelo computacional representa, então, um laboratório que possibilita o ensaio e testes de condições específicas da atmosfera.

Resumindo o processo que é comumente chamado de modelagem, tem-se o mundo que consideramos real, efetuam-se observações e medidas e, a partir delas, são registradas as suas regularidades, que são traduzidas como equações matemáticas que refletem o mundo contínuo (STOCKER, 2011, PEIXOTO e OORT, 1992). A partir das equações contínuas, efetuamos as aproximações numéricas (discretização). Após as aproximações, traduzimos as equações para linguagem de programação, que é compilada e executada em ambiente computacional, gerando o resultado a ser analisado.

Cada uma destas etapas envolve simplificações do que consideramos como realidade. Devido às simplificações, deve-se admitir que resultados baseados em modelagem computacional sejam sujeitos aos erros citados anteriormente. Mesmo estudos baseados em dados observados e registrados por estações meteorológicas estão sujeitos a erros, pois a instrumentação pode necessitar de manutenção, gerando erros nas medidas (STRASSBURGUER, 2011). Entretanto, os benefícios da modelagem computacional superam em muito os seus erros associados.

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) utilizados nos estudos sobre o clima terrestre são desenvolvidos por diversos grupos de centros de pesquisa em todo o mundo, tornando-se cada vez mais complexos e com resoluções espaciais e temporais cada vez maiores. Um desses grupos é o conhecido Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) e conta com o auxílio de diversos modelos acoplados de circulação geral da atmosfera, que simulam os principais componentes do sistema climático (hidrosfera, criosfera, litosfera e atmosfera e biosfera) para as projeções baseadas em forçantes de gases de efeito estufa e aerossóis (IPCC, 2013).

Os modelos climáticos são as principais ferramentas para investigar a resposta do sistema climático aos vários forçantes, com o objetivo de fazer previsões climáticas sazonais, decadais, além dos próximos séculos (STOCKER, 2011). Os modelos de sistema terrestre são os modelos de estado-da-arte atuais, segundo o IPCC (2013).

No sistema climático, o forçante principal é a radiação solar incidente no topo da atmosfera. Diversos autores utilizam diferentes valores para a “constante solar” (JOHNSON, 1954, KASTING et al., 1993, HOYT e SCHATTEN, 1997, TRENBERTH et al., 2009, KOPP e LEAN, 2011, STEPHENS et al., 2012, WILD et al., 2012, NEALE, et al., 2013, entre outros), que geralmente mudam de acordo com as épocas em que foram conduzidos os estudos e medições, devido aos instrumentos e tecnologias disponíveis. Estas diferenças são importantes para os estudos que levam em consideração o balanço radiativo da atmosfera (KOPP e LEAN, 2011).

Mesmo sendo a “constante” solar uma grandeza variável devido aos ciclos de atividade do Sol (HOYT e SCHATTEN, 1997), os modelos climáticos utilizavam um valor fixo para as simulações, assunto que será tratado em capítulo posterior neste trabalho.

O estudo do clima é um campo de conhecimento que envolve grande complexidade. Uma vasta gama de escalas espaço-temporais está envolvida nos

processos que controlam o clima terrestre. Muitos deles são bem compreendidos; outros, não totalmente. Na escala planetária, têm-se as variações solares e variações orbitais da Terra, em escala temporal de milênios. Em escala continental, o balanço de energia é controlado pela interação entre solo/oceano/camadas de gelo e o ar. Em escala espacial muito menor, como a escala molecular, têm-se os processos que envolvem mudanças de fase da água, a química e transferências radiativas.

Os modelos físicos e matemáticos envolvem conjuntos de equações e são expressos como modelos numéricos computacionais, pois têm a finalidade de serem resolvidos em ambiente computacional. Os modelos são as ferramentas utilizadas para simular estes processos climáticos e suas inter-relações e interações.

Os modelos climáticos são modelos numéricos que consistem de quatro componentes: atmosfera, oceano, solo e gelo marinho. Os modelos de sistema terrestre são modelos climáticos com componentes adicionais, como os modelos de rios, gelo terrestre, ondas, e devem incluir o ciclo do Carbono nos componentes de solo, atmosfera e oceano. O ciclo do carbono é o processo pelo qual o carbono em todas as suas formas interage e se distribui nos componentes previamente citados (Rasch et al., 2012).

Com o conhecimento e tecnologias computacionais disponíveis atualmente, é impossível representar todos os processos que governam o clima terrestre em detalhes. Por esta razão, todos os modelos climáticos disponíveis possuem limitações e aproximações.

Os primórdios dos estudos visando a previsão de eventos meteorológicos aconteceram no início do século XX, com o trabalho de BJERKNES (1904 – *Apud* LORENZ, 2006). Neste trabalho, o autor liga o problema da possibilidade de prever o estado futuro da atmosfera à ideia de solução de equações que expressam as leis governantes do comportamento da atmosfera (LORENZ, 2006).

Posteriormente, RICHARDSON (1922) criou um procedimento para computar a previsão do tempo, pois havia proposto que as equações governantes poderiam ser resolvidas utilizando métodos numéricos (LORENZ, 2006).

O primeiro modelo computacional atmosférico rudimentar foi implementado na máquina *Electronic Numerical Integrator and Computer*, mais conhecida pelo acrônimo ENIAC. Esta máquina, cuja massa aproximada era de 30 toneladas, estava instalada por volta de 1950 no *Advanced Study Institute* da Universidade de Princeton, e foi

responsável por um grande avanço científico para as previsões de tempo e modelagem climática (PLATZMAN, 1978; LORENZ, 2006).

O modelo computacional foi baseado nas equações de previsão quasi-geostróficas que constavam no trabalho de CHARNEY (1948) e ELIASSEN (1949). Muitos anos depois, PLATZMAN (1978) recodificou o modelo para uma linguagem computacional mais atual para o ano de 1978 e utilizou um computador IBM mais potente, do tamanho aproximado de uma máquina de datilografia. Como resultado, foi capaz de reproduzir em poucos minutos as previsões feitas em 24 horas na máquina ENIAC, utilizando as mesmas condições iniciais da década de 1950.

Anos depois, em 2008, novamente um cientista propôs reproduzir o modelo utilizado no ENIAC com linguagem computacional mais moderna além de um computador portátil mais moderno (Sony Vaio, modelo VGN-TXP2XP), entretanto utilizando condições iniciais provenientes do projeto Reanálise do NCEP-NCAR para algumas datas da década de 1950 (LYNCH, 2008). Em comparação, os resultados guardaram significativas semelhanças e foram gerados após um tempo de integração de 30 milissegundos. No mesmo ano de 2008, o mesmo cientista e um colaborador adaptaram o modelo para a plataforma de um telefone celular (Nokia 6300) e batizaram o sistema de PHONIAC (LYNCH e LYNCH, 2008).

## **2.10. Modelo de sistema terrestre CESM**

O *Community Earth System Model* (CESM; HURREL et al., 2013) do *National Centre for Atmospheric Research* (NCAR) é um sistema de modelagem numérica do sistema terrestre composto por modelos globais que simulam, de maneira simultânea, a atmosfera, oceano, rios, superfície e cobertura de gelo, além de possuir um módulo que atua no acoplamento destes modelos, permitindo conduzir pesquisas sobre o estado passado, presente e futuro do clima, tanto com alcance temporal de meses até décadas ou centenas de anos. O CESM é composto por sistemas de equações diferenciais que descrevem a dinâmica dos fluidos, transferências radiativas, composições químicas, e etc. O planeta é dividido em uma grade tridimensional para resolver as equações e os processos subgrade são parametrizados. (HURREL et. al, 2014). A escolha da utilização deste modelo é justificada por ser de distribuição livre e código aberto, o que facilita potenciais alterações necessárias para sua adequada implementação. O CESM pode ser

instalado em diferentes plataformas de hardware, desde que sejam disponibilizados diversos núcleos de processamento (CESM User's Guide).

Os modelos constituintes do CESM na versão 2.0 são: CAM6, CLM4, CICE, POP2, CICE4 e RTM, que serão descritos a seguir, e podem ser configurados de diferentes formas, tanto para estudos científicos quanto para análises técnicas de seus resultados. Além destes, também estão disponíveis os modelos CAM6-CHEM, que representa a química da atmosfera no CESM (LAMARQUE et al. 2012); e o *Whole Atmosphere Community Climate Model* (WACCM; MARSH et al. 2013), que não serão descritos neste trabalho.

O *Community Atmosphere Model* versão 6.0 (CAM6) é o modelo que simula o comportamento da atmosfera em escala climática. A atual versão é a primeira em que é possível simular o processo de formação de gotas de nuvens ativada por aerossóis e processos de precipitação devido ao tamanho dos núcleos de condensação, além da interação entre partículas de nuvem de maneira explícita. Maiores detalhes sobre o CAM6 são mostrados no item 2.10.3.

O *Community Land Model* versão 5 (CLM5; LAWRENCE et al. 2011; OLESON et al. 2010) é o modelo de solo, que quantifica os processos físicos, químicos e biológicos pelos quais os ecossistemas terrestres afetam e são afetados pelo clima, através de uma variedade de escalas espaciais e temporais. O modelo representa diversos aspectos da superfície, incluindo a heterogeneidade, e consiste de componentes relacionados a biogeofísica, ciclo hidrológico, biogeoquímica e dinâmica de ecossistemas (HURREL et al., 2013). O CLM5 contém um modelo prognóstico de carbono-nitrogênio (THORNTON et al., 2007), além de um modelo de cânion urbano (OLESON et al., 2008), e cobertura e uso de solo transientes, incluindo desmatamento (LAWRENCE et al. 2011). Para a cobertura de gelo, é utilizado o modelo *Snow, Ice and Aerosol Radiation* (SNICAR; FLANNER et al., 2007), que inclui deposição de aerossol de carbono preto e poeira, que são prescritos ou previstos pelo CAM (HURREL et al., 2013), sendo a poeira carregada do solo pelo vento e passada para o modelo de aerossol atmosférico (ZENDER et al., 2003). O CLM5 possui, além disso, um modelo interativo de plantio (LEVIS et al., 2012), que é baseado em uma versão do *Integrated Biosphere Simulator* (AgroIBIS; KUCHARIK e BRYE, 2003), que inclui parâmetros para plantações de milho, soja e trigo; e um esquema de irrigação que, quando ativado a área de plantio de cada célula da grade do modelo é dividida em frações irrigadas e não-

irrigadas, de acordo com banco de dados de regiões com irrigação (SACKS et al., 2009).

A heterogeneidade espacial da superfície terrestre no CLM é representada com uma hierarquia de subgrades aninhadas, no qual cada ponto de grade é composto de múltiplas unidades de solo (glacial, zona úmida como rios, vegetação, lagos, zona urbana) colunas de gelo/solo e *Plant Functional Types* (PFT) ou Tipos Funcionais de Vegetação (OLESON et al, 2010).

Cada ponto de grade do modelo possui um número distinto de unidade de solo, que pode possuir números diferentes de colunas, e cada coluna pode ter múltiplas PFTs. A coluna de neve/solo é representada por quinze camadas para o solo e mais de cinco para a neve, dependendo de sua espessura. A coluna vertical também tem informação relativa aos níveis de PFTs, que inclui tratamento para terra nua (*bare ground* - áreas de terra sem vegetação).

O intuito destas camadas é capturar diferenças biogeofísicas e biogeoquímicas entre categorias de plantas em termos de suas características funcionais. Podem coexistir em uma única coluna até 16 tipos de PFTs que diferem em fisiologia e estrutura, com a adição do *bare ground*. Para o modelo de uso de solo, utiliza-se o estado inicial fornecido por um modelo atmosférico.

O percentual de cada PFT diz respeito à porção vegetada do ponto de grade, sendo que a soma das PFTs precisa resultar em 100%, sendo requerido um limite mínimo de 1% do ponto de grade por área de lagos, glaciares e zonas úmidas, e 0,1% para áreas urbanas.

Superfícies vegetadas e as possíveis PFTs estão representados na Tabela 1. Esses tipos de plantas diferem em folhas e hastes que determinam reflexão, transmitância e absorção de radiação solar. Distribuição de parâmetros de raízes que controlam a absorção de água do solo, parâmetros aerodinâmicos que determinam a resistência do calor, umidade e transferência de momento, e parâmetros de fotossíntese que determinam a resistência dos estômatos.

Tabela 4: Tipos funcionais de vegetação – (*Plant Functional Types* - PFT), refletância na faixa visível ( $A_{vis}$ ) do espectro eletromagnético e no infravermelho próximo ( $A_{nir}$ ) (Fonte: adaptado de OLESON *et al.*, 2010).

PFT	Acrônimo	$A_{vis}$	$A_{nir}$
Árvore perene de folha de agulha – Temperada <i>Needleleaf evergreen tree – temperate</i>	NET Temperada	0,07	0,35
Árvore perene de folha de agulha – Boreal <i>Needleleaf evergreen tree - boreal</i>	NET Boreal	0,07	0,35
Árvore de folha decídua de agulha – Boreal <i>Needleleaf deciduous tree – boreal</i>	NDT Boreal	0,07	0,35
Árvore de folha larga perene – Tropical <i>Broadleaf evergreen tree – tropical</i>	BET Tropical	0,10	0,45
Árvore de folha larga perene – Temperada <i>Broadleaf evergreen tree – temperate</i>	BET Temperada	0,10	0,45
Árvore de folha larga decídua – Tropical <i>Broadleaf deciduous tree – tropical</i>	BDT Tropical	0,10	0,45
Árvore de folha larga decídua – Temperada <i>Broadleaf deciduous tree – temperate</i>	BDT Temperada	0,10	0,45
Árvore de folha larga decídua – Boreal <i>Broadleaf deciduous tree – boreal</i>	BDT Boreal	0,10	0,45
Arbusto de folha larga – Temperada <i>Broadleaf evergreen shrub - temperate</i>	BES Temperada	0,07	0,35
Arbusto de folha larga decídua – Temperada <i>Broadleaf evergreen shrub - temperate</i>	BDS Temperada	0,10	0,45
Arbusto de folha larga decídua – Boreal <i>Broadleaf deciduous shrub – boreal</i>	BDS Boreal	0,10	0,45
C3 grama do ártico <i>C3 arctic grass</i>	-	0,11	0,35
C3 grama <i>C3 grass</i>	-	0,11	0,35
C4 grama <i>C4 grass</i>	-	0,11	0,35
Cultivo1 <i>Crop1</i>	-	0,11	0,35
Cultivo2 <i>Crop2</i>	-	0,11	0,35

<sup>1</sup>Há dois tipos de culturas “Cultivo1” e “Cultivo2”, e apenas o tipo 1 está especificado no conjunto de dados de superfície.

O *Community Ice Code* versão 4 (CICE4; HUNKE e LIPSCOMB, 2008) é o modelo que simula a interação mar-gelo, que calcula as taxas locais de crescimento de neve e gelo devido aos fluxos radiativos (BITZ e LIPSCOMB, 1999), condutivos e turbulentos, além da dinâmica do gelo (HUNKE e DUKOWICZ, 2002). A representação da distribuição de espessura de gelo é dada por THORNDIKE et al. (1975) e ROTHROCK (1975). O CICE4 inclui tratamento de radiação de onda curta de múltiplo espalhamento (BRIEGLEB e LIGHT, 2007), além da capacidade de simular explicitamente a evolução de piscinas de gelo derretido (*melt pond*) e a deposição e ciclo de aerossóis de poeira e carbono preto na camada de gelo (HOLLAND et al., 2012).

O *Parallel Ocean Program* versão 2 (POP2; SMITH et al., 2010) é o modelo de circulação geral oceânica, concebido para ser executado em computadores com diversos núcleos de processamento. O POP2 utiliza como discretização vertical o esquema de coordenadas de nível. A dinâmica oceânica no modelo é descrita por equações primitivas em três dimensões utilizando as aproximações hidrostática e de Boussinesq (SMITH et al., 2010). Para a discretização horizontal é utilizado o método de diferenças finitas em uma grade alternada B de Arakawa, fixa no tempo e no espaço (GRIFFIES et al., 2008), onde as variáveis vetoriais encontram-se nos vértices da grade e as variáveis escalares encontram-se no centro (SMITH et al., 2010). Este tipo de grade permite representação acurada das correntes geostróficas e das ondas de gravidade inerciais (GRIFFIES et al., 2000, 2008). Com o objetivo de melhorar a representação das ondas e correntes equatoriais, nesta região o espaçamento meridional diminui para aproximadamente  $0,5^\circ$ , mesmo que a simulação tenha sido configurada com resoluções mais degradadas do que  $0.5^\circ$  (SMITH et al., 2010).

O *Community Ice Sheet Model* versão 2.1 (CISM) é o modelo de interação terra-gelo que simula a cobertura de gelo, tal como o aumento do gelo da Groenlândia e do gelo Antártico, considerados fixos pelos modelos globais (RUTT et al, 2009). O CISM que pode simular com precisão não apenas o fluxo interno lento, mas também o fluxo rápido ao longo das margens das camadas de gelo. As parametrizações de deslizamento basal, quebra de icebergs e outros processos físicos também foram aperfeiçoadas. Como resultado, a comparação entre o fluxo de gelo simulado e observado na Groenlândia é muito mais próxima do que nas versões anteriores do modelo. O balanço de massa superficial dos lençóis de gelo da Groenlândia e da Antártida é agora computado por padrão no Community Land Model (CLM), com ou sem geleiras dinâmicas. O clima do

derretimento superficial foi aprimorado com a inclusão de um modelo de neve compactada, que permite a infiltração e recongelamento da água derretida, bem como taxas de densificação consideradas realísticas pelos autores.

O *Model for Scale Adaptive River Transport* (MOSART – LI et al. 2013b) é um modelo de transporte fluvial, no qual o escoamento superficial é encaminhado através de encostas e descarregado junto com o escoamento subterrâneo em uma sub-rede antes de entrar no canal principal. O fluxo dos rios neste modelo é determinado método de onda cinemática. Além disso, também simula as velocidades de canal e profundidade de água no canal variando no tempo. Um dos principais objetivos do MOSART é fornecer dados de entrada de água doce para o modelo oceânico em modelos de sistemas terrestres acoplados.

Os modelos que compõem o CESM fazem as trocas de fluxos, massa e momento, através de um acoplador central. Durante as execuções do CESM, os modelos fazem as integrações avançando no tempo e param periodicamente para trocar as informações com o acoplador (HURREL et al., 2013). O acoplador, por sua vez, recebe os campos dos modelos componentes, efetua os cálculos, mapeia e agrupa a informação, e então envia os campos de volta para os modelos. O acoplador intermedia esta sequencia de troca de comunicação e gerencia a progressão temporal do sistema acoplado como um todo.

### **2.10.1. Componentes pré-configurados (*COMPSETS*)**

Os componentes pré-configurados, ou *COMPSETS* (do Inglês “*component set*”) são conjuntos de combinações de componentes (modelo atmosférico, oceânico, gelo marinho e terrestre, etc.) disponibilizados pelos desenvolvedores do CESM.

Estes componentes podem ser combinados de diversas formas, para realizar experimentos científicos ou de software.

O CESM possui uma convenção para a nomenclatura dos *compsets*. Em geral, a primeira letra de um *compset* indica quais componentes são utilizadas. Uma exceção a esta regra é o uso da letra “G” como segunda letra, para indicar a utilização do modelo glc ativado (CISM).

O sistema é composto por seis modelos geofísicos: atmosfera (atm), gelo marinho (ice), superfície (lnd), oceano (ocn), gelo terrestre (glc) e ondas oceânicas (wav), mais o acoplador (cpl).

Cada modelo (Tabela 5) pode assumir uma opção “*active*”, “*data*”, “*dead*” e “*stub*”. O modo “*active*” indica que o modelo está ativo, gerando os prognósticos. No modo “*data*” o modelo possui apenas dados de forçantes inseridos pelo usuário. O modo “*dead*” indica que o modelo gera apenas dados cientificamente inválidos e existe apenas para testes de sistema.

Na opção “*stub*”, o modelo apenas satisfaz os requerimentos do sistema quando não é necessário para a configuração de outro componente do sistema. Por exemplo, o componente lnd ativo forçado com dados atmosféricos não necessita dos componentes ice, ocn ou glc ativos. Portanto, ice, ocn e glc são configurados no modo stub (CESM User’s Guide).

Tabela 5 - COMPSETs padrão do CESM e seus modos.

Código	Componentes	Modo			
		Active	Data	Stub	dead
A	datm,dlnd,dice,docn,sglc		atm,lnd,ice,ocn	glc	
B	atm,lnd,ice,ocn,sglc	atm, lnd,ice,ocn		glc	
C	datm,dlnd,dice,ocn,sglc	ocn	atm, lnd, ice	glc	
D	datm,slnd,ice,docn,sglc	ice	atm, ocn	glc,lnd	
E	atm,lnd,ice,docn,sglc	atm, lnd, ice	ocn	glc	
F	atm,lnd,ice,docn,sglc	atm, lnd, ice	ocn	glc	
G	datm,dlnd, ice,ocn,sglc	ice, ocn	atm, lnd	glc	
H	datm,slnd,ice,ocn,sglc	ice, ocn	atm	lnd, glc	
I	datm,lnd,sice,socn,sglc	lnd	atm	ice,ocn,glc	
S	satm,slnd,sice,socn,sglc			todos	
X	xatm,xlnd,xice,xocn,sglc				todos

### 2.10.2. Resolução espacial

As resoluções das grades do CESM são definidas pelo usuário dentro de um conjunto pré-gerado pelos desenvolvedores ou geradas pelo próprio usuário.

Uma vez configurada a resolução, os componentes leem os arquivos de grade e o acoplador lê os arquivos com os mapas de pesos (*mapping weight files*) correspondentes.

Posteriormente, o acoplador faz a checagem de consistência entre as grades e o arquivo dos pesos. Estes arquivos são necessários, pois a grade do modelo oceânico utiliza coordenadas esféricas.

O CESM pode ser configurado com grades do tipo ponto único (*single point*), volumes finitos (*finite volume*), espectral (*spectral*), esfera cúbica (*cubed sphere*), pólo deslocado (*displaced pole*) e tripolar (*tripole*). (Tabela 6).

Os arquivos de entrada (ou os forçantes) podem estar configurados com a mesma grade que escolhida para executar o CESM.

No caso em que os dados não estejam na mesma grade, pode-se fazer uma interpolação para que tanto os dados quanto os modelos tenham a mesma resolução espacial (CESM User’s Guide).

Tabela 6 – Convenção de nomenclatura das grades suportadas pelo CESM. O código “nn” indica a resolução, “pp” o truncamento, D é a resolução em graus e “n” é a versão da grade.

Nomenclatura	Definição	Exemplo
[dlat]x[dlon]	volumes finitos “lat x lon” regular.	1.9x2.5 (em graus)
fnn	volumes finitos	f19 (~ 2°)
Tpp	espectral lon/lat	T85
ne[X]np[Y]	esfera cúbica em que X e Y são números inteiros	ne30np4
pt1	ponto único de grade	-
gx[D]v[n]	polo deslocado	gx1v6 (~ 1°)
tx[D]v[n]	grade tripolar	ne30_f19_g16

As grades dos modelos de gelo e oceano precisam ser as mesmas, entretanto, os modelos de atmosfera, superfície e rios podem ser diferentes entre si. Cada componente determina sua decomposição baseada na quantidade disponível de núcleos de processamento para cada componente.

### 2.10.3. Modelo Atmosférico CAM6 e histórico do projeto CAM

O CAM3 foi a quinta geração de modelos de circulação geral da atmosfera desenvolvido no NCAR.

A partir desta versão houve a alteração do padrão de nomenclatura dos modelos atmosféricos do antigo Community Climate Model (CCM versões 0, 1, 2 e 3) para Community Atmosphere Model (CAM, iniciando na versão 3) para refletir melhor o papel do CAM3 no âmbito dos sistemas de modelagem climática acoplada (NEALE et al., 2010).

Em contraste com a geração prévia de modelos (os CCMs), o CAM3 foi projetado através de um processo colaborativo entre os usuários e desenvolvedores no Atmospheric Working Group (AMWG - NEALE et al., 2010).

Este grupo de trabalho, que se mantém em funcionamento até o presente momento da escrita desta tese, é composto por cientistas e técnicos do NCAR, membros da comunidade acadêmica em geral e laboratórios governamentais.

O CAM3, a princípio, reteve característica dos CCMs, como o núcleo dinâmico Euleriano para a primeira versão lançada oficialmente e depois a adição da dinâmica semi-Lagrangeana núcleo dinâmico com volumes finitos. As maiores mudanças na física do modelo incluem o tratamento de água condensada de nuvens usando a formulação prognóstica com componente de microfísica *bulk* (RASCH e KRISTJÁNSSON, 1998a) e uma componente de macroescala (ZHANG et al., 2003b).

Para a convecção profunda o esquema de ZHANG e MCFARLANE (1995) foi mantida como no CCM3. Uma nova forma de cálculo de sobreposição de nuvens foi inserida no CAM3 para que os cálculos da interação entre radiação e nuvens sejam efetuados na parametrização de radiação.

Na versão 3 do modelo foi implementada uma parametrização com equações de transferência radiativa que utilizam o método absorvidade/emissividade para a absorvidade e emissividade de radiação de onda longa do vapor d'água.

A distribuição uniforme de aerossóis das versões anteriores do modelo foi substituída por uma climatologia atual de sulfatos, sal marinho, carbonáceos e poeira (NEALE et al., 2010).

O CAM4 é a sexta geração de modelos atmosféricos globais climáticos do NCAR, também desenvolvido em conjunto com a comunidade científica organizada pelo AMWG.

No CAM4, foram implementadas alterações no esquema de convecção profunda para o cálculo da *Convective Available Potential Energy* (CAPE), que assume perfis de temperatura e umidade da nuvem para determinar a flutuabilidade.

Esta modificação é baseada na conservação de entropia úmida e métodos de mistura de RAYMOND e BLYTH (1986 e 1992), sendo um avanço para aumentar a sensibilidade da convecção à umidade troposférica e reduzir a amplitude do ciclo diurno de precipitação sobre o solo.

Além disso, foi adicionado o *Convective Momentum Transports* (CMT) em escala sub-grade ao esquema de convecção profunda, de acordo com a metodologia de RICHTER e RASCH (2008) e GREGORY et al., (1997b).

O CMT afeta o clima troposférico principalmente através de alterações no torque da força de Coriolis. Estas alterações resultam na melhoria da circulação de Hadley durante o inverno boreal e reduzem o bias do modelo.

Na média anual são reduzidos os bias dos ventos de leste na região tropical, ventos de oeste na região subtropical e a intensidade excessiva do jato de baixos níveis no hemisfério sul. Para o núcleo dinâmico, o CAM4 utiliza o esquema de volumes finitos em seu modo padrão. Foram feitas modificações no código para aceitar outras resoluções espaciais como, por exemplo,  $1,9^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  e  $0,95^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ .

O modelo CAM5 possui um núcleo dinâmico, cujas soluções das equações governantes são calculadas com método de volumes finitos.

A discretização de volumes finitos é local e totalmente no espaço físico, e a discretização horizontal é baseada em um esquema conservativo semi-lagrangiano, que foi descrito por LIN e ROOD (1996).

O núcleo dinâmico de volumes finitos e as parametrizações físicas são de passo fracionado (*time-split*), em que todas as variáveis prognósticas são atualizadas sequencialmente pelo núcleo dinâmico e depois pelas parametrizações.

A ideia básica é iniciar os cálculos das soluções que marcham no tempo a partir de coordenadas Eulerianas que acompanham o relevo (coordenada híbrida  $\sigma$ -p), tratando as superfícies de coordenadas iniciais como superfícies materiais, e os volumes finitos, que são confinados por duas superfícies de coordenadas, ficam verticalmente livres, para flutuar, comprimir ou expandir com o fluxo que é ditado pela dinâmica do modelo (NEALE et al.,2010).

A integração no tempo é totalmente explícita (NEALE et al., 2010). Esta é a primeira versão do CAM a simular os efeitos radiativos indiretos na interação aerossóis-nuvem.

Em particular, a combinação dos aprimoramentos das parametrizações físicas tornou possível simular as interações aerossóis-nuvem, incluindo a ativação de gotículas de nuvem por aerossol, processos de precipitação devido ao tamanho da gota de nuvem e interação radiativa explícita entre gotículas de nuvem.

Um novo esquema de turbulência úmida (BRETHERTON e PARK, 2009a), substituindo o esquema de turbulência seca de HOLTSLAG e BOVILLE (1993b) do CAM3 e CAM4.

Este esquema torna possível simular os efeitos indiretos dos aerossóis no interior de nuvens stratus, operando em qualquer camada da atmosfera em que o número de Richardson seja maior do que seu valor crítico.

Um novo esquema de nuvens rasas que utiliza equação de diluição de pluma e fechamento, que simula de maneira mais acurada a distribuição de atividade convectiva rasa (PARK e BRETHERTON, 2009).

Este esquema foi desenhado especificamente para interagir com o novo esquema de turbulência úmida, para prevenir a contagem dupla que foi verificada em versões anteriores do CAM. A parametrização de convecção profunda foi mantida a mesma da versão 4 do CAM.

A microfísica de processos estratiformes é representada por um esquema prognóstico com formulação de dois momentos para gotas e gelo de nuvem, com massa e número de concentrações seguindo a parametrização original de MORRISON e GETTELMAN (2008).

Esta implementação determina os tamanhos das partículas líquidas e de gelo a partir de funções gamma, sendo sua evolução no tempo sujeita a advecção em escala de grade, difusão turbulenta e outros processos de microfísica.

A microfísica de nuvens é acoplada a um tratamento modal de aerossóis (LIU et al. 2007; GHAN et al. 2007), que prevê a massa dos aerossóis e quantidade de misturas internas de carbono orgânico e escuro, poeira, sal marinho e sulfatos. Para representar processos de sobreposição de nuvens em escala sub-grade, são utilizadas técnicas estatísticas (PINCUS et al., 2003; NEALE et al., 2010).

O tratamento da formação de nuvens estratiformes, condensação e evaporação são descritas em NEALE et al. (2010). O *Rapid Radiative Transfer Model for Global*

*Circulation Models* (RRTMG; IACONO et al., 2008, MLAWER et al., 1997) é utilizado como parametrização para os processos radiativos.

O esquema de radiação RRTMG emprega um método k-correlacionado modificado para o cálculo de fluxos radiativos e taxas de aquecimento no céu claro e para as espécies de fase condensada.

As propriedades ópticas dos aerossóis são definidas para cada modo do MAM, conforme descrito por (GHAN e ZAVERI, 2007). As características higroscópicas são especificadas para espécies solúveis. Para aerossóis vulcânicos, é utilizado um raio geométrico médio.

As propriedades ópticas dos aerossóis são combinadas antes do cálculo radiativo. A ótica de água de nuvem é calculada seguindo WISCOMBE (1996) e a ótica de gelo de nuvem é calculada segundo MITCHELL (2002). A ótica do tamanho do gelo de nuvem é estendida para permitir a queda de neve.

As propriedades ópticas das nuvens (incluindo frações separadas e conteúdo de água na nuvem) são combinadas antes do cálculo radiativo. O RRTM separa o espectro de ondas curtas em 14 bandas que se estendem de 0,2  $\mu\text{m}$  a 12,2  $\mu\text{m}$  e modelam as fontes de extinção para o  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  e espalhamento de Rayleigh.

A irradiância solar para as bandas de ondas curtas (irradiância solar espectral) é proveniente do conjunto de dados que corresponde a uma composição entre a forçante solar histórica (de 1850 a 2014) com um cenário futuro de referência (2015 a 2299) do CMIP6, que é mostrado com mais detalhes no ítem 4.2.1.

O espectro de ondas longas é separado em 16 bandas que se estendem de 3,1  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$  com fontes moleculares de absorção para a mesma espécie, além de CFC-11 (contendo múltiplas espécies de CFC) e CFC-12.

O RRTMG tem extensas modificações do RRTM original para proporcionar um maior desempenho computacional para integrações climáticas de período longo (NEALE et al., 2010). O CAM5 é parte do CESM em sua versão 1.

O modelo atmosférico CAM versão 6 (CAM6) é um dos componentes atmosféricos do CESM versão 2. Este modelo é o mais recente de uma série de modelos globais atmosféricos desenvolvidos por diversos grupos de pesquisa organizados pelo *National Centre for Atmospheric Research* (NCAR).

O modelo contém modificações substanciais em todas as parametrizações da física atmosférica, exceto a transferência radiativa com relação às versões anteriores. O esquema *Cloud Layers Unified by Binormals* (CLUBB – GOLAZ et al., 2002;

BOGENSCHUTZ et al., 2013) substitui os esquemas anteriores de turbulência na camada limite atmosférica, convecção superficial e microfísica de nuvens.

O CLUBB é um esquema prognóstico de turbulência úmida que calcula momentos de ordem elevada conjunta de velocidade vertical de sub-grade, teor de água e temperatura potencial da água líquida.

As equações para esses momentos são fechadas usando funções de densidade de probabilidade binormais combinadas para essas quantidades. Além de calcular os fluxos verticais de sub-grade, o fechamento da função da densidade de probabilidade do CLUBB também é usado para calcular a condensação em grande escala e a fração de nuvens.

Foi introduzido um esquema prognóstico mais aperfeiçoado de microfísica de nuvens de dois momentos (MG2 - GETTELMAN e MORRISON, 2015). A principal inovação na MG2 é transportar espécies de precipitação (chuva e neve) além de condensados de nuvens.

A MG2 interage com o esquema de microfísica de aerossol *Modal Aerosol Module* (MAM4) para calcular frações de massa de condensado e números de concentrações.

A convecção profunda (ZHANG e MCFARLANE, 1995) foi significativamente ajustada para aumentar a sensibilidade à inibição convectiva.

Dois esquemas para calcular o arrasto orográfico de sub-grade foram substancialmente modificados. A orientação topográfica (picos) e os efeitos de barreiras aos fluxos em baixos níveis foram incorporados ao esquema de onda de gravidade orográfica.

A parametrização anterior da camada limite para o arrasto devido a topografia montanhosa foi substituída pelo esquema de BELJAARS et al. (2004) atualmente utilizado no modelo de previsão do Centro Europeu.

O CAM6 utiliza a discretização de volumes finitos em sua grade. A discretização horizontal é baseada em um esquema conservativo semi-lagrangeano de fluxo descrito por LIN e ROOD (1996 e 1997).

A discretização vertical pode ser melhor descrita como Lagrangiana com um remapeamento conservativo que, essencialmente, o torna quase Lagrangeano.

O aspecto quase Lagrangeano da coordenada vertical é transparente ao usuário ou aos desenvolvedores da parametrização física e funciona exatamente como a

coordenada *eta* (coordenada híbrida *sigma – p* utilizada em outros núcleos dinâmicos do CAM (NEALE et al., 2010).

## 2.11. Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação bidimensional é utilizado neste trabalho para encontrar indícios de que as diferenças entre os forçantes dos experimentos causam alterações nos campos das variáveis estudadas.

O resultado do coeficiente é um valor escalar, que é calculado com a equação (5) e pode ser utilizado para indicar se um campo meteorológico (bidimensional) apresenta ou não as mesmas feições entre si. Quanto mais próximo de 1, maior é a correlação entre os campos (CHAVE, 2017).

$$r = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2 (B_{mn} - \bar{B})^2}} \quad (5)$$

Em que A e B são matrizes ou vetores de mesmo tamanho, que são neste trabalho representadas pelos campos com latitude e longitude de variáveis atmosféricas.

## 2.12. Reanálises

Para efetuar a validação dos experimentos controle deste trabalho, são utilizadas duas reanálises, que são produzidas utilizando uma abordagem sistemática com a finalidade de gerar conjuntos de dados de períodos longos (décadas) para pesquisa climática.

As reanálises são produzidas utilizando-se dados observacionais provenientes de estações meteorológicas de superfície e altitude, além de plataformas orbitais, boias, navios, etc (HODGES et al, 2011), que são assimiladas em modelos numéricos de previsão.

Em comparação com os dados observacionais, os produtos de reanálise possuem a vantagem de serem disponibilizados em grades homogêneas, isto é, com valores em distâncias igualmente espaçadas. Isto não é possível com os dados observacionais, devido à não-homogeneidade das fontes de dados meteorológicos, oceanográficos, entre outros (HODGES et al., 2011), que estão espalhados por grandes áreas.

Atualmente existem diversos produtos de reanálises disponíveis, tais como ERA-INTERIM (SIMMONS et al., 2007), NCEP Reanalysis-2 (KANAMITSU et al., 2002), JRA-25 (ONOGI et al., 2007) e NASA MERRA (RIENECKER et al., 2011).

Para este trabalho, a validação do CESM é realizada com o ERA-INTERIM e Reanalysis-2, que são mais detalhados nos próximos tópicos.

### **2.12.1. ERA-INTERIM**

A reanálise ERA-INTERIM utiliza grade espectral integrada com resolução espacial T255 (aproximadamente 80 km ou 0.703125°) e 60 níveis verticais. Como assimilação de dados, é utilizado o sistema 4DVAR com ciclos de 12 horas (maiores detalhes em THÉPAUT et al., 1993). Esta reanálise é uma melhoria do produto ERA-40 (SIMMONS et al., 2007; HODGES et al., 2011; ECMWF, 2012).

Os arquivos com os resultados desta reanálise entre os anos de 1979 e 2010 são disponibilizados no website <https://rda.ucar.edu/datasets>. O código do conjunto de dados (*dataset*) relativo aos arquivos do ERA-INTERIM é 627.1.

### **2.12.2. Reanalysis-2**

A Reanalysis-2 (KANAMITSU et al., 2002) é uma versão corrigida do Projeto Reanalysis (KALNAY et al., 1996). Além de alterar as parametrizações dos processos físicos, também foram revisados os sistemas de controle de qualidade dos dados que são assimilados (KANAMITSU et al., 2002).

A grade espectral possui resolução T61 (aproximadamente 277 km, ou 2.5°), com 28 níveis verticais, sendo utilizado o sistema 4DVAR para assimilação de dados observacionais.

Os arquivos com os resultados desta reanálise são disponibilizados no website <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.pressure.html>.

### 3. Revisão bibliográfica

No presente capítulo é apresentada a revisão bibliográfica desta tese de Doutorado.

MARTIN-PUERTAS et. al (2012) utilizaram amostras de sedimentos (*varves*) do Lago Meerfelder Maar, na Alemanha, para detectar indícios de alterações climáticas no período Homérico, entre 3300 e 2000 anos atrás. As amostras contendo traços de *bloom* induzidas pelo vento foram considerados como indicador (*proxy*) de intensidade do vento, sendo encontradas nas lâminas que indicam intensificação do vento no período entre o final do inverno e início da primavera no hemisfério norte, pois é o período em que ocorre o derretimento do gelo do lago. Além disso, o  $^{10}\text{Be}$ , formado na atmosfera pelo bombardeamento de oxigênio e nitrogênio por raios cósmicos, foi utilizado como indicador de atividade solar. A assinatura de mudança climática nas amostras contendo o *bloom* de diatomáceas é sustentada pela coincidência com a oscilação climática no período Homérico na Europa, caracterizada por um resfriamento e maior disponibilidade de umidade. Além disso, os radionuclídeos cosmogênicos indicam que as condições de vento intensificado prevaleceram no período em que a irradiância solar se manteve baixa. Desta forma, foi deduzida a existência de uma conexão direta e rápida (menos de uma década) entre a atividade solar e a circulação troposférica regional, ou seja, a circulação atmosférica reagiu abruptamente e em fase com o mínimo solar. Para demonstrar a resposta da circulação regional à atividade solar, os autores utilizaram o CESM com forçantes naturais (sem forçantes antropogênicas) e acoplado para simulação do período entre 1955 e 2100, para simular períodos com os ciclos de mínimo solar de 11 anos. As configurações do CESM foram: grade de  $2.5^\circ \times 1.9^\circ$  e 66 níveis verticais até 140 km de altitude, oceano interativo com aproximadamente  $1^\circ$  de resolução horizontal, 60 níveis verticais e módulos de terra e gelo marinho, sem vulcões e com níveis de gases de efeito estufa de 1960. Foram analisados os meses entre fevereiro e abril resultantes do modelo, cujos resultados foram comparados com os registros dos dados *proxy* para o período do mínimo Homérico, além disso também foram utilizados dados da reanálise ERA-Interim de 1958 a 2011, com dados separados por períodos de atividade solar. Os resultados do CESM indicam alterações positivas de pressão sobre a Islândia e mudanças negativas na região subtropical durante o mínimo solar quando comparados com o estado médio. Esta redução do gradiente de pressão se assemelha a fase negativa da Oscilação do

Atlântico Norte e resulta em temperaturas mais baixas sobre as porções central e norte da Europa. Uma diferença na circulação atmosférica em resposta as mudanças na atividade solar é consistente com padrões de circulação atmosférica em simulações climáticas. Os autores concluem que as mudanças na circulação atmosférica amplificaram o sinal solar registrado no *proxy* e causaram mudança climática abrupta por volta de 2800 anos atrás, coincidentes com um período de mínimo solar.

BURLS e FEDOROV (2014) demonstraram, utilizando 26 experimentos com o CESM, como o gradiente meridional de albedo de nuvem ( $\Delta\alpha$ ) entre os trópicos e latitudes médias, determina o gradiente médio leste-oeste de TSM no oceano Pacífico Equatorial. Foram alteradas, apenas no esquema de parametrização de onda curta, as propriedades óticas de nuvens modificando o caminho de água atmosférico (do Inglês “*atmospheric water path*”), causando a alteração do  $\Delta\alpha$  nos experimentos numéricos. Com a modificação do valor do  $\Delta\alpha$  de aproximadamente -0.15 para 0.1, o contraste do gradiente leste-oeste de TSM reduz de aproximadamente 7.5 °C para valores menores do que 1 °C, e a circulação de Walker praticamente colapsa. Os experimentos revelam uma dependência quase linear entre o  $\Delta\alpha$  e o gradiente de temperatura zonal que, de forma geral, concorda com os resultados das simulações de controle pré-industrial do *Coupled Model Intercomparison Project Phase5* (CMIP5).

Recentemente, foram disponibilizadas para a comunidade científica as simulações do CESM-*Last Millenium Ensemble* (CESM-LME), para o período entre os anos de 850 a 2005 (OTTO-BLIESNER et. al, 2015). Os experimentos incluem simulações forçadas com os transientes de evolução da intensidade de radiação solar, emissões vulcânicas, aerossóis, gases de efeito estufa, uso do solo e parâmetros orbitais. O CESM-LME permite entender as contribuições de forçantes externas (naturais e antropogênicas) e variabilidade interna para as variações climáticas dos últimos 1156 anos. Os resultados demonstraram a influência da variabilidade interna em respostas regionais do sistema climático durante o último milênio. Todas as forçantes, principalmente aquelas associadas a grandes erupções vulcânicas, tiveram maior influência durante o período pré-industrial, enquanto os gases de efeito estufa antropogênicos e mudanças nos aerossóis dominam a variabilidade da metade para o final do século 20.

GOLDENSON (2012) estudou a sensibilidade do CESM 1.0 à incorporação de impurezas de partículas na neve do Ártico e no gelo marinho, usando fluxos de deposição constantes e aerossóis pré-definidos no modelo oceânico do CESM. Os

componentes mais afetados por impurezas escuras, tais como o *Black Carbon*, são as superfícies com albedo elevado. O *feedback* do albedo da neve se refere ao processo pelo qual o aquecimento da superfície derrete a neve, diminuindo o albedo da superfície, ou revelando uma camada subjacente mais escura, o que leva a maior absorção da radiação solar, aquecendo ainda mais a superfície e causando derretimento adicional. O *feedback* que ocorre quando o gelo marinho derrete é análogo. Foi utilizado o CESM 1.0, o modelo oceânico com 1 grau de resolução, e o CAM4, atmosférico, com 2 graus de resolução. O fluxo de aquecimento do oceano é prescrito, baseado na climatologia de uma integração longa pré-industrial, que é descrito com mais detalhes em BITZ et al (2012). Todos os resultados apresentados são de pelo menos 60 anos de simulações de equilíbrio, para os quais os últimos 30 anos foram mediados para criar a climatologia. O dióxido de carbono foi configurado para níveis dos anos 2000. Em todas as simulações os autores utilizaram os fluxos de deposição de aerossóis da atmosfera, ao invés do fluxo de deposição que depende da atmosfera simulada pelo modelo. Este fluxo de deposição é proveniente de um modelo separado e pode apenas ser grosseiramente forçado pelas escassas medidas no Ártico. Os autores concluíram que uma pequena diferença no albedo pode ter um grande impacto no clima devido aos *feedbacks* no sistema, particularmente o *feedback* do gelo marinho.

THIÉBLEMONT et. al (2015) investigaram a possibilidade de reprodução, com o CESM, da sincronização entre a Oscilação do Atlântico Norte (*North Atlantic Oscillation* – NAO) e o ciclo de 11 anos da atividade Solar, encontrando evidências de que esta sincronização ocorre com aproximadamente dois anos de atraso, devido a interações oceano-atmosfera. Os autores comentam que a relação Sol/NAO não é bem representada pelos modelos climáticos em geral, com forçantes realísticas observadas. Sua detecção é particularmente difícil, pois a flutuação quase-decadal da NAO pode ser gerada intrinsecamente pelos sistemas de modelagem acoplada de oceano-atmosfera. Os autores compararam duas simulações multi-decais (145 anos) com o modelo acoplado com e sem variação na forçante solar. O modelo atmosférico foi configurado com topo de aproximadamente 140 km, com 66 níveis verticais, resolução horizontal de 2.5° x 1.9° (longitude x latitude). O modelo oceânico foi configurado com grade tripolar com resolução de 1° x 1° e 60 níveis de profundidade. Para cada experimento as forçantes antropogênicas foram excluídas, mantendo gases de efeito estufa e ozônio constantes nos níveis de 1960, para que apenas as forçantes naturais fossem utilizadas. Os

resultados mostram que, no experimento com a variabilidade solar ativada, os resultados foram estatisticamente compatíveis com as observações da NAO.

ZHOU et. al (2015) constataram que em muitos modelos do CMIP5 a radiação solar incidente no topo da atmosfera exibe oscilações longitudinais, que não são realísticas. Teoricamente, quando tomada a média diária, é esperado que a insolação seja zonalmente uniforme e a mudança no ângulo da declinação solar no período de um dia é negligenciada. Entretanto, este não é o caso dos modelos climáticos que compõem o CMIP5. Os autores propõem que o causador deste comportamento não realístico são as aproximações introduzidas na discretização temporal do ângulo do zênite solar nas equações dos modelos computacionais.

GEORGIEVA et. al (2012) encontraram uma possível explicação da mudança na correlação entre a NAO e a atividade solar. Seu objetivo foi investigar as variações de longo período nas diferentes manifestações da atividade solar e sua influência na circulação no hemisfério norte. Para caracterizar a circulação atmosférica, foi utilizado o índice Modo Anular Norte (*Northern Annular Mode* – NAM). Os valores diários do índice são calculados em diferentes níveis de pressão, baseado em resultados de Reanálise entre 1958 e 2006, em que, para cada nível de pressão, latitude, longitude e dia do ano, as anomalias são calculadas com a subtração da climatologia sazonal e então as séries temporais de EOF são derivadas (BALDWIN e DUNKERTON, 2001). Os resultados de GEORGIEVA et. al (2012) demonstram que a atividade solar relacionada com os campos toroidais decresce a zonalidade da circulação do inverno em todos os níveis na atmosfera terrestre como medido com o índice NAM, enquanto o campo poloidal (previamente mostrado na Figura 4) aumenta a zonalidade da circulação atmosférica e, conseqüentemente, o índice NAM.

A possibilidade de um novo período de grande mínimo solar vem sendo discutida em diversos trabalhos (ABREU et al. 2008; LOCKWOOD et al 2011; ROTH e JOOS 2013; ZOLOTOVA e PONYAVIN, 2014; INESON et al., 2015), motivados pelo ciclo solar número 24 bastante fraco e o profundo mínimo solar entre 2008 e 2009, o que não é usual quando comparados com a sequência de ciclos após o Mínimo de Dalton.

De acordo com CHIODO et al. (2016), as projeções para o século XXI do CMIP5 não utilizam variações solares de longo período, se limitando a assumir que o Sol teria uma variabilidade próxima à dos últimos anos. As simulações foram feitas repetindo os últimos ciclos solares até o final das simulações ou até mesmo repetindo

apenas o ciclo número 23. Desta forma, o forçante solar utilizado no CMIP5 pode não ser realístico a ponto de representar o clima futuro da Terra.

MATTHES et al. (2017) criaram uma nova abordagem para a projeção da atividade solar aplicada no âmbito do CMIP6. A técnica consistiu em utilizar a média de dois modelos de atividade solar, um empírico (NRLTSI2/NRLSSI2 - CODDINGTON et al., 2016) e outro semi-empírico (SATIRE – YEO et al., 2014). Desta forma, de acordo com os autores, a representação da variabilidade solar futura estaria mais realística.

O papel da TSI na modulação do sistema climático terrestre vem sendo discutido em trabalhos como ANET et al (2013), MEEHL et al. (2013), INESON et al. (2015), MAYCOCK et al. (2015), FEULNER e RAHMSTORF (2010), JONES et al. (2012) entre outros.

Para quantificar o impacto da alteração da TSI no clima, ANET et al. (2013), MEEHL et al. (2013), INESON et al. (2015) e MAYCOCK et al. (2015) utilizaram modelos computacionais com acoplamento entre oceano e atmosfera. Outros trabalhos utilizaram modelos de balanço de energia como o *box-diffusion* (JONES et al, 2012) e modelos de sistema terrestre de complexidade intermediária (FEULNER e RAHMSTORF, 2010).

Uma série de cenários futuros de mínimos solares artificiais foram empregados, envolvendo reduções na TSI de 0,4% (ANET et al. 2013), 0,25% (MEEHL et al. 2013), 0,12% (INESON et al. 2015, MAYCOCK et al. 2015) e 0,08% (FEULNER e RAHMSTORF, 2010; JONES et al. 2012). Os resultados destes estudos indicam que mesmo um grande mínimo solar reduziria apenas parcialmente (aproximadamente 0,1 K) ou então retardaria o aumento projetado da temperatura média global (ANET et al. 2013, MEEHL et al. 2013). Um sinal ainda mais fraco na temperatura é encontrado nos cenários futuros mais moderados (FEULNER e RAHMSTORF, 2010; JONES et al. 2012). LEAN et al. (1995) afirma que uma variação entre 0.5% e 1 % no valor da TSI seria necessária para produzir uma diferença de aproximadamente 1°C na temperatura média terrestre. Entretanto, estes trabalhos avaliam os impactos climáticos apenas para o hemisfério norte.

SONG et al. (2010) utilizaram uma versão anterior do Community Atmosphere Model (CAM) versão 3 acoplado a um modelo oceânico simplificado de uma camada (*slab ocean model*) para avaliar o impacto climático de um período de grande mínimo solar para o período pré-industrial. A redução da TSI deslocou a Oscilação do

Ártico/Oscilação do Atlântico Norte para um índice mais negativo, resultando em alteração da temperatura do ar próximo à superfície. Além disso, o *feedback* positivo do sistema gelo marinho/radiação solar amplifica o resfriamento superficial devido ao decréscimo da TSI. O efeito global médio anual de resfriamento induzido pela diminuição da TSI é de 0,347°C da época pré-industrial para 0,254°C no cenário B1 do IPCC, sendo esta diferença tanto pelo *feedback* do sistema gelo marinho/radiação solar quanto pelo efeito estufa mais intenso associado ao aumento dos gases de efeito estufa.

O modelo CESM configurado como modelo de sistema terrestre, ou seja, modelo atmosférico (WACCM4) acoplado ao modelo oceânico (POP) foi utilizado por CHIODO et al. (2016) para obter uma projeção climática para os anos entre 2005 e 2065. Para isto, utilizou cenário RCP4.5 do IPCC-AR5, com alterações na SSI para simular a ocorrência de um mínimo prolongado de atividade solar. A falta de uma resposta de resfriamento global uniforme foi justificada pelos autores como sendo devido a pequena redução da TSI aplicada na simulação. Embora seja previsível que este cenário de variabilidade solar reduzida tenha uma influência pequena na tendência de aquecimento global no futuro, os resultados sugerem uma modulação substancial dos padrões de aquecimento em escala regional nas regiões continentais do hemisfério norte durante o inverno. A resposta ao mínimo solar está vinculada a um mecanismo que envolve a redução da convecção na região do Pacífico equatorial, a geração de um trem de ondas Rossby para os extratropicos e as mudanças no gelo marinho, que são principalmente impulsionadas pela irradiância no comprimento de onda do visível. Em um cenário com pouca diminuição da forçante solar, como o cenário de mínimo solar empregado em CHIODO et al. (2016), os *feedbacks* dinâmicos envolvendo ondas estacionárias e o gelo marinho forçados diabaticamente no Pacífico Norte desempenham um papel crucial na determinação da resposta em escala regional. Consequentemente, esses processos são fundamentais para entender a incerteza nas projeções de mudanças climáticas em escala regional no hemisfério norte (CHIODO et al., 2016).

ANET et al. (2013) utilizaram o modelo climático de sistema terrestre AOCCM SOCOL3-MPIOM com acoplamento atmosfera-oceano-química, que é um dos modelos utilizados pelo IPCC. Os autores geraram dois cenários de atividade solar que seguem o padrão do Mínimo de Dalton e um cenário controle, com a repetição dos ciclos 22 e 23 até o final da simulação. Para os cenários do mínimo de atividade solar, foram escolhidos valores máximos ( $6 \text{ Wm}^{-2}$ ) e mínimos ( $4 \text{ Wm}^{-2}$ ) de diferença quando

comparados ao caso controle, para a irradiância solar total. As médias de temperatura encontradas nos últimos 20 anos do século XXI são mais baixas em até 0,3 K, quando comparadas com o caso controle. O aparente enfraquecimento do aquecimento global é mais pronunciado do que o trabalho de MEEHL et al. (2013) mas, mesmo assim, não é suficiente para agir como atenuador para um cenário de aquecimento global.

O CESM com acoplamento entre o modelo atmosférico (WACCM) e o modelo oceânico (POP) foi utilizado por MEEHL et al. (2013) para simular o efeito de um grande mínimo solar similar ao Mínimo de Maunder, em um experimento com o RCP4.5 executado para o período de 2005 a 2100. O arquivo de forçante solar do CMIP5 (com a repetição entre 2005 e 2100 dos quatro ciclos solares entre 1965 e 2008) foi editado para incluir o mínimo solar artificial entre 2020 e 2070. O modelo atmosférico foi configurado com resolução espacial horizontal de  $1,9^\circ \times 2,5^\circ$  de latitude e longitude, respectivamente, e 66 níveis verticais. O modelo oceânico foi configurado com resolução espacial horizontal de aproximadamente  $1^\circ \times 1^\circ$  e 60 níveis verticais. Os resultados indicam que a temperatura média zonal reflete as anomalias de temperatura, resfriando a maior parte da troposfera e estratosfera para o experimento com o mínimo solar. Entretanto, este resfriamento não é suficientemente grande para reduzir os impactos de um possível aquecimento global.

Para simular o efeito de um período futuro de mínimo solar, INESON et al. (2015) utilizou o modelo de circulação geral da atmosfera HadGEM2-CC com ciclo do carbono ativado. O forçante solar para o experimento controle foi o mesmo utilizado no CMIP5. A resolução horizontal foi de  $1,875^\circ$  de longitude e  $1,25^\circ$  de latitude para o modelo atmosférico e  $1^\circ \times 1^\circ$  para o modelo oceânico. O forçante solar repete os ciclos solares entre 1998 e 2008 até o ano 2100. Como base para o estudo, foi utilizado o RCP8.5. Foram simulados dois casos de mínimo solar a partir de 2050, sendo o primeiro com declínio da TSI até um patamar estável de  $1364,5 \text{ Wm}^{-2}$  e mantendo a SSI com valor constante no comprimento de onda do UV. O segundo experimento também foi configurado com declínio da TSI e SSI, entretanto, mantendo ciclos solares em torno do mesmo valor médio de  $1364,5 \text{ Wm}^{-2}$  de TSI. Já a SSI no comprimento de onda do UV decaiu de  $1,5 \text{ Wm}^{-2}$ . Os dois experimentos apresentam queda de temperatura de até  $0,75^\circ\text{C}$  em algumas regiões do norte da Europa e  $0,45^\circ\text{C}$  no norte da Ásia, diferenças de até 2 hPa na pressão atmosférica e, de maneira geral, menos precipitação para a mesma região. O segundo experimento apresenta a maior variabilidade quando comparado ao cenário RCP8.5.

MAYCOCK et al. (2015) utilizaram o modelo HadGEM2-CC com 60 níveis verticais e resolução horizontal de  $1,250^\circ$  em latitude e  $1,875^\circ$  em longitude para o modelo atmosférico e  $1^\circ \times 1^\circ$  para o modelo oceânico para simular um período com mínima atividade solar. Como base para o estudo, foi utilizado o RCP8.5 entre os anos de 2005 e 2100. O forçante solar do modelo repete os ciclos solares entre 1998 e 2008 até o ano 2100. O mínimo solar foi configurado iniciando um declínio suavizado a partir de 2005 atingindo o valor mínimo de  $1364,4 \text{ Wm}^{-2}$ , que corresponde a  $-0.12\%$  em relação ao valor médio de  $1366,2 \text{ Wm}^{-2}$  (valor referente ao forçante do RCP8.5) por volta do ano de 2070. Foi encontrada diferença de aproximadamente  $-0.1 \text{ K}$  na temperatura global média no século XXI. Além disso houve um enfraquecimento da corrente de jato no hemisfério norte de até  $4 \text{ m/s}$ , sendo o período entre janeiro e fevereiro apresentando maior diferença. Foi detectado um aprofundamento da baixa pressão na região da costa leste do Pacífico norte e fortalecimento dos bloqueios sobre o norte da Europa e norte do Pacífico. Além disso, também apresentou um deslocamento no sentido do equador no jato de baixos níveis do hemisfério norte no outono austral. Não foram encontradas evidências de que o mínimo solar tenha impactos na região do Pacífico tropical. Os resultados indicam que um período de mínima atividade solar no século XXI pode causar impactos importantes na estratosfera e no clima regional.

FEULNER (2010) utilizou o modelo acoplado de complexidade intermediária CLIMBER-3a, configurado com modelo atmosférico com baixa resolução espacial horizontal de  $22,5^\circ$  em longitude e  $7,5^\circ$  em latitude e 16 níveis verticais, e o modelo oceânico com  $3,75^\circ \times 3,75^\circ$  e 24 níveis verticais. Os experimentos consistiram em utilizar as diferenças entre as reconstruções históricas de TSI de dois outros trabalhos (STEINHILBER et al., 2009 e SCHRIJVER et al., 2011) e o valor do mínimo solar de 2008/2009. Para o período do mínimo de Maunder, STEINHILBER et al. (2009) indica o valor de  $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$  e SCHRIJVER et al. (2011) o valor de  $-5,8 \text{ Wm}^{-2}$  relativos ao valor do mínimo solar do período 2008/2009. Estes cenários foram então utilizados como forçantes solares no modelo para avaliar o impacto na temperatura média global no século XXI, tendo como base os cenários RCP4.5, RCP6 e RCP8.5. Para todos os RCPs simulados com um mínimo solar de  $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$  (STEINHILBER et al., 2009) foi encontrada uma diferença média de temperatura de  $-0,1^\circ\text{C}$  para o hemisfério norte. Quando utilizado o valor de SCHRIJVER et al. (2011), a diferença chega a  $0.5^\circ\text{C}$  quando comparada ao período entre 1971 e 2000.

Embora o consenso destes trabalhos seja de que uma diminuição da TSI para níveis próximos ao que se estima para o Mínimo de Maunder cause pequeno impacto na temperatura média global, os efeitos nas escalas regionais ainda são pouco compreendidos (CHIODO et al., 2016). Além disso, a maioria destes trabalhos investigam os efeitos da TSI e SSI apenas na temperatura média global, e não em outras variáveis meteorológicas, com exceção de MAYCOCK et al. (2015).

## 4. Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia deste estudo para gerar os cenários climáticos, além das técnicas utilizadas para avaliação dos resultados.

### 4.1. Experimentos iniciais (EXPi)

Inicialmente foram definidos dois experimentos com o objetivo de testar a instalação e execução do CESM em sua versão 1.2 (HURREL et al., 2013), sendo a versão mais atual que estava disponível à época. O primeiro experimento, denominado EXPi\_CTRL, com a constante solar padrão do CESM ( $1360 \text{ Wm}^{-2}$ ). O segundo experimento, denominado EXPi\_TSI10p, foi configurado com a constante solar adicionada de 10% do seu valor ( $1496 \text{ Wm}^{-2}$ , ou seja, diferença de  $136 \text{ Wm}^{-2}$ ) (Figura 14).

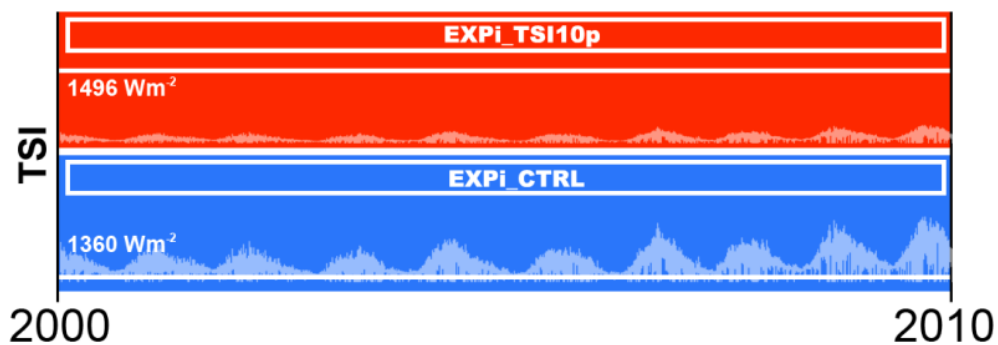


Figura 14 - Esquema ilustrativo da nomenclatura dos experimentos iniciais. Ambos os experimentos são iniciados no ano 2000 e finalizados no ano de 2010. O experimento EXPi\_CTRL corresponde ao caso controle, com  $1360 \text{ Wm}^{-2}$  fixos ao longo do tempo. O segundo experimento, EXPi\_TSI10p corresponde ao experimento cuja irradiância solar total foi fixada em  $1496 \text{ Wm}^{-2}$ , ou seja, 10% a mais do que o caso controle. Os ciclos solares apenas são mostrados apenas para comparação e não estão em escala.

Este valor de 10% foi escolhido por ser um valor bastante alto e também por ser o limite da Zona de Habitabilidade definido por KASTING et al. (1993) para o cenário de efeito estufa úmido. Este cenário é o mais “próximo”, considerando a Terra fixa na mesma órbita e teoricamente evoluindo o Sol, fazendo com que sua luminosidade (e “constante solar”) aumente com o tempo. Maiores informações sobre a motivação para utilizar o limite da Zona de Habitabilidade são encontradas no Anexo II.

Os dois experimentos foram iniciados utilizando condições iniciais do ano 2000 para simular o sistema terrestre atual, utilizando um dos casos disponibilizados para teste pelos desenvolvedores, com todos os modelos ativados. A resolução de grade escolhida foi a T31\_g37, que corresponde a 48 pontos de grade em latitude e 96 pontos em longitude, ou seja,  $3,75^\circ \times 3,75^\circ$  de resolução horizontal, com 30 níveis verticais.

O tempo de simulação escolhido foi de 10 anos de integração, iniciando no ano 2000, considerado tempo suficiente para que fosse possível reproduzir o comportamento, mediado nas latitudes, das variáveis: pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (SLP), temperatura do ar na superfície (TS), componente zonal do vento no nível de 200 hPa (U), componente meridional do vento no nível de 200 hPa (V), fluxo de calor latente na superfície (LHFLX), e cobertura total de nuvens (CLDTOT). As siglas entre parênteses indicam as variáveis correspondentes nos arquivos de resultados do modelo. Estes resultados foram agrupados em um artigo submetido para revista científica.

## **4.2. Experimentos com CTRL e GSM, com forçante solar CMIP6 e mínimo solar artificial**

Para investigar os efeitos de um novo período de grande mínimo solar no sistema climático, foram elaborados dois experimentos mais robustos e prolongados, que são avaliados neste trabalho.

O primeiro denominado CTRL (caso controle), com o modelo sendo executado sem alterações e o segundo experimento, denominado GSM (*Grand Solar Minimum*), com a forçante solar alterada a partir do ano 1950, como descrito a seguir.

### **4.2.1. Geração do novo mínimo de Maunder**

O CESM utiliza arquivos no formato NETCDF como condições iniciais (*input*). O diretório em que estes arquivos são localizados na máquina é configurado pela variável ambiente \$CCSMINPUT no sistema operacional Linux.

A University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) disponibiliza em seu servidor (<https://svn-ccsm-inputdata.cgd.ucar.edu/trunk/inputdata/>) diversos arquivos de condições iniciais (*input*) para as simulações do CESM. Estes arquivos são inseridos no arquivo de configurações do modelo (também conhecido como *namelist*

que, neste caso, é o arquivo `user_nl_cam`) para que sejam utilizados ao longo das simulações.

No servidor da UCAR, os arquivos iniciais do modelo CAM6 relacionados aos diferentes forçantes solares estão disponíveis em <https://svn-ccsm-inputdata.cgd.ucar.edu/trunk/inputdata/atm/cam/solar/>.

O arquivo utilizado é o `SolarForcingCMIP6_18491230-22991231_c171031.nc`, que corresponde a uma composição entre a forçante solar histórica (de 1850 a 2014) com um cenário futuro de referência (2015 a 2299) do CMIP6.

De acordo com MATTHES et al. (2017), para o período histórico, as séries temporais de TSI e SSI do CMIP6 são definidas no arquivo como médias de dois modelos de atividade solar. Um deles é empírico (NRLTSI2/NRLSSI2 - CODDINGTON et al., 2016) e o outro semi-empírico (SATIRE – YEO et al., 2014).

Para a construção do cenário futuro de atividade solar, existem duas abordagens. A primeira é utilizar modelos de dínamo solar e a outra é inferir as variações futuras baseadas nas variações do passado (MATTHES et al., 2017).

A primeira abordagem leva em consideração que a área de estudos de modelos de dínamo solar tem obtido relevantes avanços com o desenvolvimento de novos modelos deste tipo (CHARBONNEAU, 2014). A segunda abordagem consiste em fazer uma previsão probabilística sobre a atividade solar futura baseada nas condições atuais e nas variações passadas da atividade solar (MATTHES et al., 2017).

O arquivo da forçante solar do CMIP6 é então disponibilizado com valores diários de TSI e SSI, abrangendo os anos entre 1850 e 2300 (Figura 15). Este arquivo foi então alterado para incluir um período artificial de mínima atividade solar do tipo Mínimo de Maunder (grande mínimo solar) a partir do ano 1950 até o ano 2000 para ser utilizado como condição solar para o CESM.

O grande mínimo solar de TSI (Figura 15) e SSI foi calculado utilizando a metodologia de MEEHL et al. (2013), sendo a média dos últimos três períodos de mínimo do ciclo de Schwabe, e multiplicado por um fator para reduzir os valores em 25% - Equações (6) e (7).

$$TSI = TSI * (1 - 0.0025) \quad (6)$$

$$SSI_{\lambda} = SSI_{\lambda} * (1 - 0.0025) \quad (7)$$

Em que *lambda* corresponde a cada comprimento de onda de SSI.

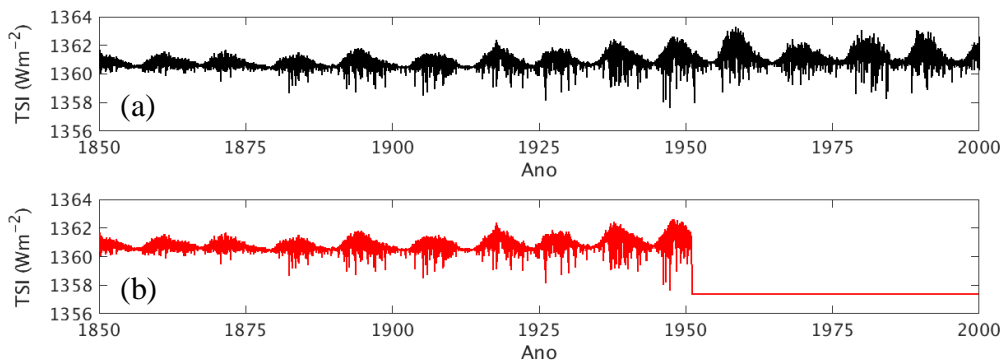


Figura 15 - Em (a), série de irradiância solar total média diária entre os anos de 1850 e 2000 elaborada por MATTHES et al. (2017). Em (b) a mesma série, com o período de grande mínimo solar artificial entre os anos de 1950 e 2000, calculado utilizando a metodologia de MEEHL et al. (2013).

A média calculada de TSI dos últimos três mínimos solares foi de  $1361 \text{ Wm}^{-2}$  e, após a aplicação do fator multiplicador, a TSI assumiu o valor de  $1357,6 \text{ Wm}^{-2}$ , sendo este valor tornado a constante correspondente ao grande mínimo inserido artificialmente na série.

Depois de construído o grande mínimo solar artificial, foi gerado o arquivo “grandsolarminimum\_1950\_SolarForcingCMIP6\_18491230-22991231\_c171031.nc”, para ser utilizado como condições iniciais do CESM.

Desta forma, foi necessário alterar o conteúdo do arquivo user\_nl\_cam, cujo conteúdo assumiu a forma do painel 1, em que foram alteradas as informações correspondentes às variáveis “solar\_data\_file” (onde é declarado o caminho e o arquivo de condições solares) e “solar\_data\_type” (configurado como SERIAL para utilizar a série temporal do arquivo).

## Painel 1 – Conteúdo do arquivo `usr_nl_cam`

```
&solar_inparm
solar_data_file=
/scratch/21081a/rafaelrangel/grandsolarminimum_1950_SolarForcingCMIP6_18491230-
22991231_c171031.nc"
solar_data_type      = 'SERIAL'
solar_htng_spectrl_scl  = .false.
/
```

### 4.2.2. Configurações dos experimentos CTRL e GSM

Os dois experimentos foram iniciados utilizando condições iniciais do ano de 1850 para simular o sistema terrestre até o ano 2000, ou seja, 150 anos, utilizando um dos casos (*compsets*) disponibilizados (BHIST) pelos desenvolvedores, com todos os modelos ativados.

Como indicado na Tabela 5, os *compsets* iniciados com a letra “B” são configurados com todos os modelos ativados.

A resolução de grade escolhida foi a `f19_g17`, que corresponde a 96 pontos de grade em latitude e 144 pontos em longitude, ou seja,  $1,9^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  de resolução horizontal do modelo atmosférico atmosférico, com 32 níveis verticais (Figura 16);  $1,9^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  do modelo de solo, aproximadamente  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  no modelo oceânico e de gelo, e  $360 \times 720$  pontos em latitude e longitude, respectivamente, do modelo de escoamento superficial (MOSART).

Vale ressaltar que este *compset* (BHIST) foi utilizado por ser o único disponível à época da instalação e configuração do modelo com a possibilidade de um período longo de integração. À época (julho de 2018) a versão 2.0 do CESM havia sido disponibilizada sem os cenários futuros, a partir do ano 2000.

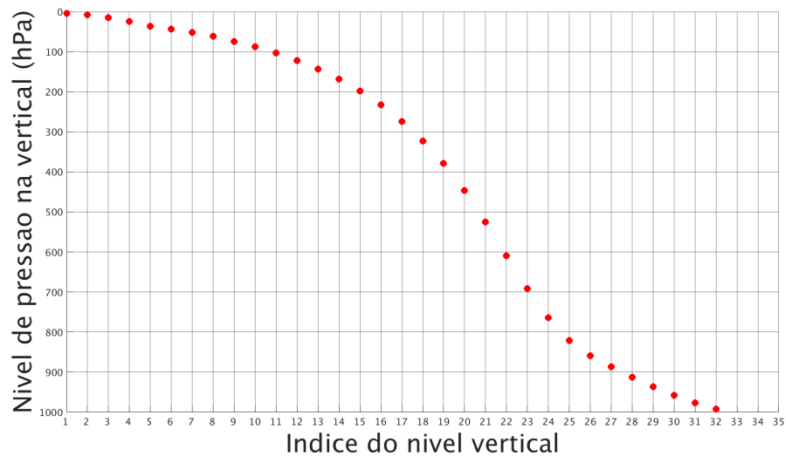


Figura 16 – Representação dos níveis verticais do CAM6, de acordo com seus índices e níveis de pressão na vertical (hPa).

O experimento CTRL foi dividido em duas partes. A primeira, denominada CTRL\_pre corresponde ao período de tempo entre 1850 e 1950.

A segunda parte, denominada CTRL\_pos, corresponde ao período restante, entre 1950 e 2000 (Figura 17).

O experimento GSM foi executado com o mínimo solar artificial a partir do ano 1950. Entre os anos 1850 e 1950, o experimento GSM e CTRL\_pre são iguais. Portanto, o experimento GSM é referente apenas do período entre 1950 e 2000.

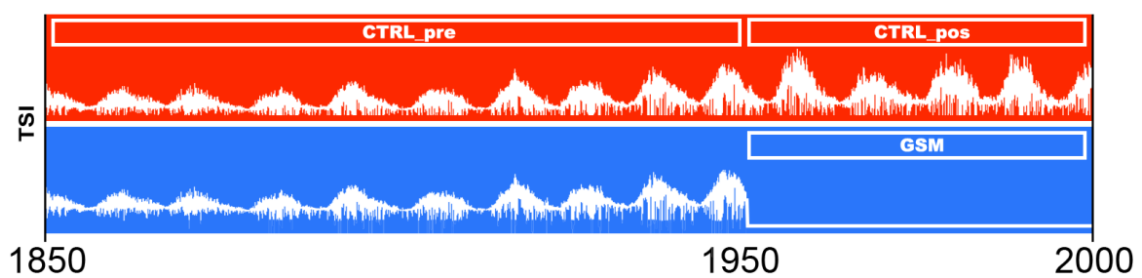


Figura 17 – Esquema ilustrativo da nomenclatura dos experimentos. CTRL\_pre indica o período do experimento controle compreendido entre os anos de 1850 e 1950. O CTRL\_pos indica o período posterior a 1950 e que finaliza no ano 2000. O experimento GSM corresponde apenas ao período entre 1950 e 2000.

O padrão de concentração de CO<sub>2</sub> do *compset* BHIST (Figura 18) apresenta um comportamento de aumento ao longo de todo o período. Entre o ano 1850 e 1950, a tendência é de aumento mais lento.

A partir de aproximadamente 1950, o aumento é intensificado. Esta é a única diferença que ocorre entre CTRL\_pre e CTRL\_pos.

O experimento GSM também utiliza o mesmo padrão de concentração de CO<sub>2</sub>, para garantir que apenas a TSI seja o diferencial entre os experimentos.

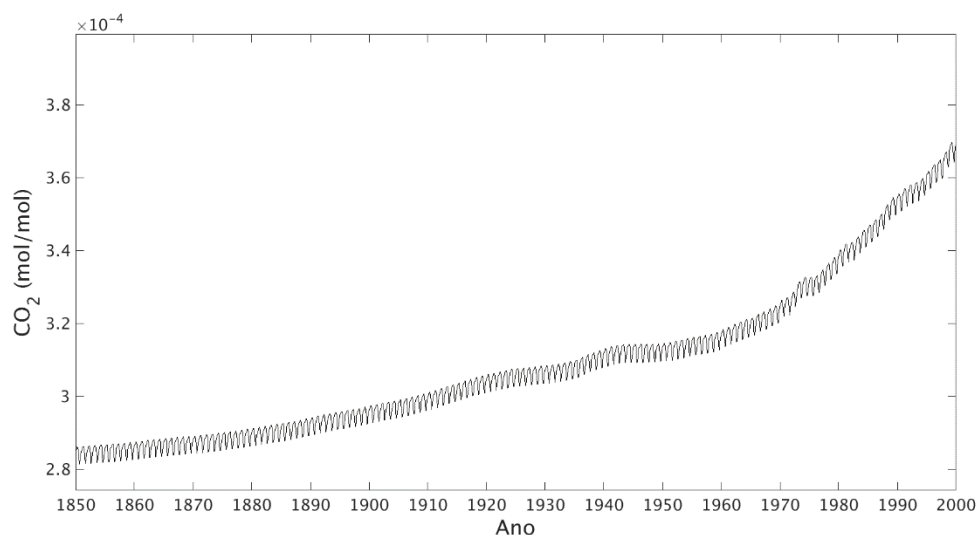


Figura 18 – Concentração padrão de CO<sub>2</sub> do *compset* BHIST, que deu origem aos experimentos CTRL e GSM.

### 4.3. Comandos para a execução do CESM

Para a geração dos experimentos, são necessários os seguintes comandos:

- a. *create\_newcase*: este comando cria o experimento (também chamado de “caso”) e aceita argumentos precedidos por “--“. Neste trabalho são utilizados os argumentos `--case`, que define o caminho e o nome do experimento; `--res`, que define a resolução especial da grade, dentro das opções já disponibilizadas pelos desenvolvedores; `--compset`, que é o tipo do experimento, também dentro das opções disponíveis; `--mach`, que indica qual é a máquina em que está sendo executado o modelo; `--run-unsupported`, indica que o caso ainda não foi avaliado pelos desenvolvedores e, portanto, não é oferecido suporte técnico.
- b. *Xmlchange*: é utilizado para configurar o horizonte de previsão (`STOP_OPTION` e `STOP_N`), a quantidade de tempo em que serão gerados

arquivos para reinicialização do modelo (REST\_N), quantidade de núcleos de processamento de cada modelo (NTASKS\_ATM, NTASKS\_OCN, NTASKS\_ICE, etc) e outros detalhes da utilização do hardware (ROOTPE\_ATM, ROOTPE\_OCN, ROOTPE\_ICE, etc).

- c. *case.setup*: implementa as alterações feitas com o comando anterior e gera os arquivos namelist dos modelos.
- d. *preview\_namelist*: com este comando, verifica-se se as alterações foram implementadas nos namelists.
- e. *case.build*: compila os modelos que compõem o CESM e gera o executável do sistema.
- f. *case.submit*: submete o experimento para a fila do sistema computacional de alto desempenho.

Os argumentos “NTASKS” e “ROOTPE” do comando *xmlchange* determinam o número de processadores para cada component (modelo), o número de instâncias de cada componente e o layout dos componentes nos processadores (hardware).

A otimização e eficiência de um experimento do CESM geralmente envolve a personalização do layout do processador (PE) para balanceamento de carga.

O CESM possui flexibilidade no layout dos componentes em diferentes processadores. Em geral, os componentes do CESM - atm, lnd, ocn, ice, glc, rof e cpl - podem ser executados em processadores sobrepostos ou mutuamente exclusivos, ou seja, em série.

Foram executados três testes de desempenho com rodadas curtas do CESM. Nestas rodadas, foram alterados os NTASKS e ROOTPE e verificados os tempos utilizados em cada rodada.

A configuração que apresentou menor tempo de rodada foi escolhida para as simulações executadas neste trabalho. As configurações foram feitas com os comandos:

```

./create_newcase --case
/scratch/21081a/rafaelrangel/cases/b.e20.bhist.f19_g17.gsm1950.dsc.002 --res f19_g17
--compset BHIST --mach loboc --run-unsupported
./xmlchange
NTASKS_ATM=864,NTASKS_CPL=864,NTASKS_LND=702,NTASKS_ICE=108,N
TASKS_OCN=216,NTASKS_ROF=702,NTASKS_GLC=864,NTASKS_WAV=54,NT
ASKS_ESP=1
./xmlchange
ROOTPE_CPL=0,ROOTPE_ATM=0,ROOTPE_LND=0,ROOTPE_ICE=756,ROOTPE
_OCN=864,ROOTPE_ROF=0,ROOTPE_GLC=0,ROOTPE_WAV=810,ROOTPE_ES
P=0
./case.setup
./preview_namelist
./case.build
./case.submit

```

A configuração do *layout* dos núcleos de processamento é mostrada na Figura 19. A atmosfera (com 864 núcleos), gelo terrestre (com 864 núcleos), transporte de água por rios (702 núcleos), solo (702 núcleos) e o acoplador (864 núcleos) iniciam a execução de maneira concorrente no MPI global número 0.

O gelo marinho inicia no MPI global número 756 e o modelo de ondas é iniciado no 810. Já o modelo de oceano é iniciado no MPI global número 864 e é executado após a finalização de todos os componentes.

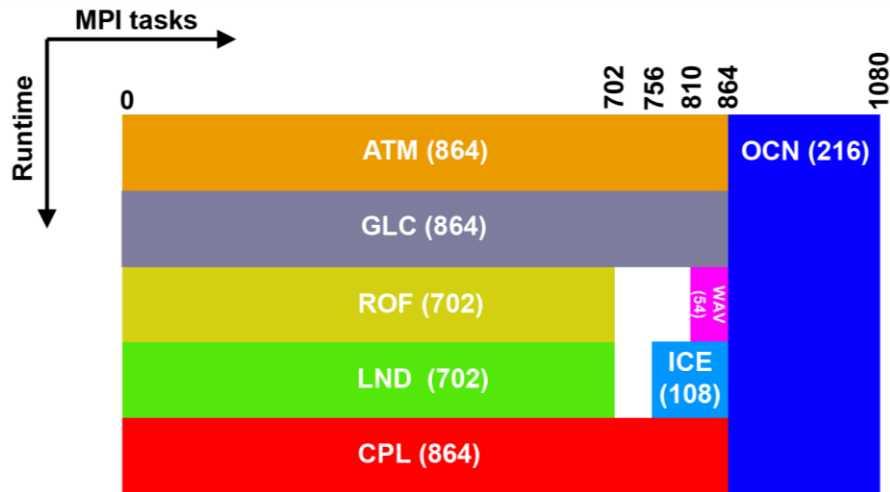


Figura 19 - Layout escolhido para a execução das rodadas. Os números entre parênteses indicam a quantidade de núcleos de processamento utilizada por cada modelo. Os modelos de atmosfera (ATM), gelo terrestre (GLC), escoamento superficial (ROF), solo (LND), são executados de maneira concorrente. Os modelos de gelo marinho (ICE) e de ondas (WAV) são executados de maneira concorrente com parte do acoplador, gelo terrestre e atmosfera. Apenas o modelo oceânico necessita ser executado de maneira serial com os demais modelos.

De acordo com as informações disponibilizadas no guia do usuário ([http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cesm/doc/usersguide/x1516.html#using\\_timing\\_info](http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cesm/doc/usersguide/x1516.html#using_timing_info)), as configurações do layout dos núcleos de processamento não tem impacto nos resultados científicos.

#### 4.3.1. Configuração de hardware

Como recurso computacional de alto desempenho, foi utilizada a máquina Lobo Carneiro (Loboc – SGI ICE-X), que pertence ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro, e é administrada pelo Núcleo Avançado de Computação de Alto Desempenho (NACAD).

As configurações atuais do Loboc, de acordo com o website do NACAD (<http://www.nacad.ufrj.br>), são:

504 CPUs Intel Xeon E5-2670v3 (Haswell): 6048 Cores  
Cores/Nó de Processamento (reais): 24 Cores  
Cores/Nó de processamento com Hyper-Threading (HT): 48 cores  
Total de Nós de processamento: 252  
Memória por nó de processamento: 64 GBytes  
Total de Memória RAM: 16 TBytes (distribuída)  
Sistema de arquivo paralelo: Intel Luster (500 TBytes)  
Armazenamento em disco: 60 TBytes  
Rede: Infiniband FDR - 56 Gbs (Hypercube)  
Sistemas operacional: Suse Linux Enterprise (SLE)  
Compiladores: Intel, PGI e GNU (Fortran-90 e C/C++)  
MPI: MPT, Intel MPI, MVAPICH e OpenMPI

#### **4.4. Avaliação dos resultados agrupados por trimestres**

Os resultados obtidos com os modelos do CESM são agrupados em quatro blocos com três meses do ano em cada, para que sejam observados os padrões sazonais. O agrupamento trimestral segue o padrão Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF), Março-Abril-Maio (MAM), Junho-Julho-Agosto (JJA), Setembro-Outubro-Novembro (SON).

Posteriormente, foi calculada para cada latitude uma média longitudinal para cada agrupamento trimestral. Esta metodologia segue a que foi utilizada por PEIXOTO e OORT (1992) e CATALDI (2008, 2010).

Foram avaliadas variáveis que representassem a dinâmica do CAM6, como a pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, vento e ômega (movimento vertical), termodinâmica, no caso da temperatura, e a precipitação, que depende de abordagem paramétrica. Além disso, também são avaliadas variáveis provenientes do modelo oceânico, como a temperatura e fluxo de calor na superfície do mar.

#### 4.5. Avaliação dos resultados nos meses de junho e dezembro

Alguns resultados dos demais modelos que compõem o CESM foram avaliados apenas para os meses de junho e dezembro. Isso foi necessário devido à extensão do texto e da quantidade de resultados gerados pelas simulações do CESM. As variáveis foram a espessura da camada de gelo, fração da área de cobertura de gelo e a taxa de derretimento (modelo CICE); espessura da camada seca, fração do solo coberto por neve, altura do topo do dossel e tipo de cobertura do solo (CLM); descarga de água líquida (modelo MOSART).

Os cálculos das anomalias foram efetuados de acordo com as equações (8), (9) e (10).

$$\text{Anomalia da } Var_{CTRL_{pos}-CTRL_{pre}} = Var_{CTRL_{pos}_{mês}} - Var_{CTRL_{pre}_{mês}} \quad (8)$$

$$\text{Anomalia da } Var_{GSM-CTRL_{pre}} = Var_{GSM_{mês}} - Var_{CTRL_{pre}_{mês}} \quad (9)$$

$$\text{Anomalia da } Var_{GSM-CTRL_{pos}} = Var_{GSM_{mês}} - Var_{CTRL_{pos}_{mês}} \quad (10)$$

Em que “Var” corresponde às variáveis resultantes dos modelos, e “mês” corresponde ao mês de junho ou dezembro de 1950 quando o campo for relacionado a CTRL\_pre e junho ou dezembro do ano 2000 quando relacionado a CTRL\_pos e GSM.

#### 4.6. Avaliação dos campos de anomalia

As anomalias dos campos provenientes do CAM6 (temperatura, pressão, vento, ômega e precipitação) foram calculadas de uma forma diferente da apresentada no ítem 4.5.

O clima, ou campo médio de longo período, foi o caso CTRL\_pre, utilizado como a base para a comparação para CTRL\_pos e GSM. Os campos médios para cada variável foram calculados como sendo a média para o período compreendido entre o ano 1850 e 1950.

Os resultados de CTRL\_pos e GSM foram separados por décadas: de 1951 a 1960, de 1961 a 1970, de 1971 a 1980, de 1981 a 1990, de 1991 a 2000. Além de mais dois períodos mais prolongados, sendo o primeiro de 50 anos, entre 1951 a 2000 e de 30 anos, de 1971 a 2000.

Foram calculadas então as anomalias para cada década dos experimentos CTRL\_pos e GSM em relação ao clima do CTRL\_pre, ou seja, anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre, GSM – CTRL\_pre e GSM – CTRL\_pos.

Ao longo deste trabalho, por vezes, a anomalia também é tratada como “diferença” entre as variáveis, apenas para evitar a demasiada repetição do vocábulo. Portanto, anomalia e diferença são utilizadas aqui como sinônimos.

#### **4.7. Validação do modelo**

Os resultados do caso controle (CTRL) foram utilizados para avaliar o desempenho do modelo em reproduzir as feições climáticas esperadas ao longo das latitudes.

Esta avaliação foi realizada comparando-se qualitativamente os resultados da pressão atmosférica reduzida ao nível do mar e a temperatura a 2 metros de altura do caso controle com as climatologias das mesmas variáveis provenientes de duas reanálises, que são descritas no ítem 2.12.

Foram também avaliados os perfis verticais das médias zonais globais das componentes zonal e meridional do vento e temperatura.

Posteriormente, foram avaliados os campos médios de pressão e temperatura dos experimentos CTRL\_pre (médias entre os anos de 1850 a 1950), CTRL\_pos (médias entre os anos 1970 e 2000) e GSM (idem a CTRL\_pos) em comparação qualitativa com os mesmos campos do ERA-INTERIM (média entre 1980 e 2010) para avaliar os posicionamentos dos sistemas atmosféricos médios.

Além disso, foram calculados os coeficientes de correlação bidimensionais (latitude e longitude) entre os resultados mensais dos experimentos CTRL e GSM, buscando verificar o efeito espacial da alteração do forçante solar.

## 5. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados deste trabalho. Os experimentos iniciais EXPi\_CTRL e EXPi\_TSI10p foram um teste com a versão mais antiga do CESM (versão 1.02) para verificar se grandes alterações efetuadas no forçante solar teriam impacto nos resultados do sistema acoplado, são apresentados no ítem 5.1.

A partir do ítem 5.2 são mostrados os resultados com os experimentos finais CTRL\_pre, CTRL\_pos e GSM. Os resultados com foco na América do Sul e regiões adjacentes são abordados em ítem específico.

### 5.1. Experimentos iniciais de teste (EXPi\_CTRL e EXPi\_TSI10p)

Neste tópico são apresentados os resultados iniciais deste trabalho. O objetivo destes experimentos foi testar a instalação e execução do CESM, na versão mais atual disponível à época (versão 1.02), entre os anos de 2014 e 2016.

#### 5.1.1. Distribuições médias zonais

Os resultados de pressão e temperatura de EXPi\_CTRL e EXPi\_TSI10p são provenientes do modelo CAM5.

Na Figura 20 (a) e (b) são mostradas as médias longitudinais da pressão do ar ao nível médio do mar do EXPi\_CTRL, Reanálise 2 e Era-Interim Média para JFM e JAS.

Para JFM (Figura 20 a), observou-se que nas latitudes baixas e médias, a pressão do ar do EXPi\_CTRL apresenta o mesmo padrão e valores similares aos produtos de reanálise.

Fora destas regiões, em latitudes acima dos 60°, todos os resultados se afastam dos dados das reanálises. O cinturão de alta pressão do hemisfério sul deslocou-se ligeiramente para o norte, posicionado a aproximadamente 30°S.

O verão austral é caracterizado por um deslocamento da ZCIT para sul, o que acaba deslocando o cinturão de alta pressão para também para sul (PEIXOTO e OORTH, 1992).

Para JAS (Figura 20 b), o EXPi\_CTRL estava de acordo com os produtos de reanálise tanto no padrão quanto na intensidade, semelhante à Figura 20 (a). O cinturão de alta pressão do hemisfério sul localizava-se a aproximadamente 30°S e o de baixa pressão a 60° S.

O cinturão de alta pressão do hemisfério norte estava a aproximadamente 40°N e o de baixa pressão a aproximadamente 60°N. Este padrão era esperado, uma vez que a ZCIT deslocou para o norte (PEIXOTO e OORTH, 1992).

Na Figura 20 (c) e (d) são mostradas as médias longitudinais da temperatura do ar à superfície. Tanto para JFM (Figura 20 c) quanto para JAS (Figura 20 d), houve concordância entre as reanálises e EXPi\_CTRL, tanto no padrão da curva quanto nos valores nas latitudes baixas e médias.

Desta forma, exibem um perfil termodinâmico médio planetário, com temperaturas mais altas na região equatorial e diminuição em direção aos polos, semelhante ao encontrado por (PEIXOTO e OORTH, 1992).

Fora destas regiões os resultados divergem, dada sua proximidade com os polos. Mesmo assim, o experimento EXPi\_CTRL, Era-Interim e Reanálise 2 se mostraram em concordância em altas latitudes.

Os resultados indicam que nestas regiões de altas latitudes a diferença de temperatura entre o verão e o inverno é maior no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Isso está ligado à razão continente-oceano, que é maior no hemisfério norte do que no hemisfério sul (PEIXOTO e OORTH, 1992).

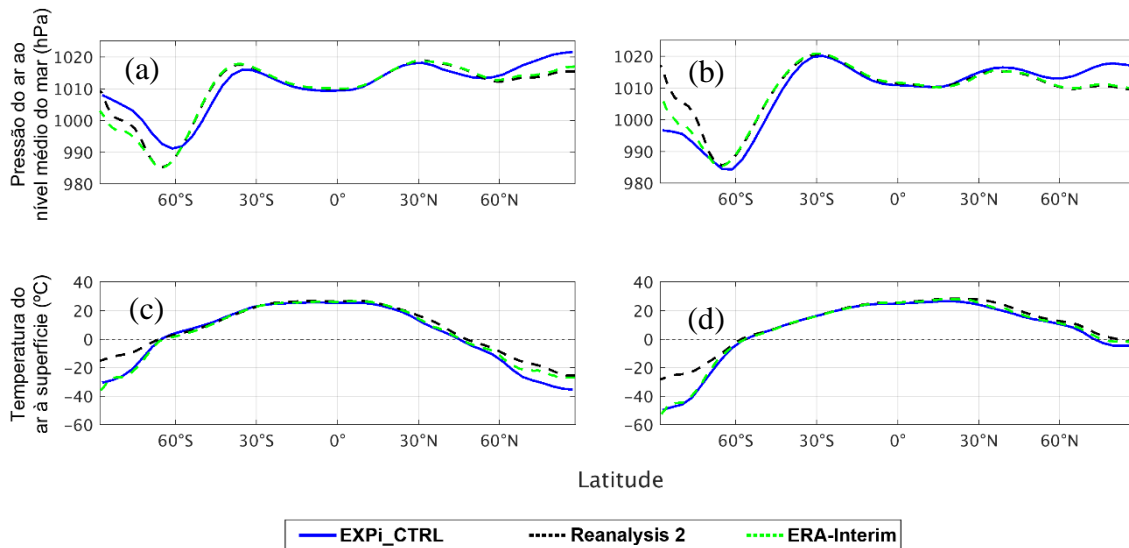


Figura 20 – Distribuições médias zonais para JFM (painéis à esquerda) e JAS (painéis à direita). Pressão do ar ao nível médio do mar (a) e (b), e temperatura do ar à superfície (c) e (d) do experimento EXPi\_CTRL (linha tracejada azul), Reanalysis 2 (linha tracejada preta) e ERA-Interim (linha tracejada verde).

### 5.1.2. Distribuição espacial dos campos de anomalias

Foram calculadas as diferenças ( $EXPi\_TSI10p - EXPi\_CTRL$ ) entre os campos de temperatura do ar para os meses de junho (Figura 21 a) e dezembro (Figura 21 b) do último ano dos experimentos.

Em ambos os períodos, observam-se diferenças positivas em todo o globo, indicando maiores temperaturas no  $EXPi\_TSI10p$  devido à maior quantidade de energia ( $136 \text{ Wm}^{-2}$ ) injetada no sistema. Para o mês de dezembro, as diferenças são mais marcantes quando comparadas com junho, principalmente nas altas latitudes do hemisfério norte, atingindo anomalias positivas de até  $40^\circ\text{C}$  no experimento  $EXPi\_TSI10p$ .

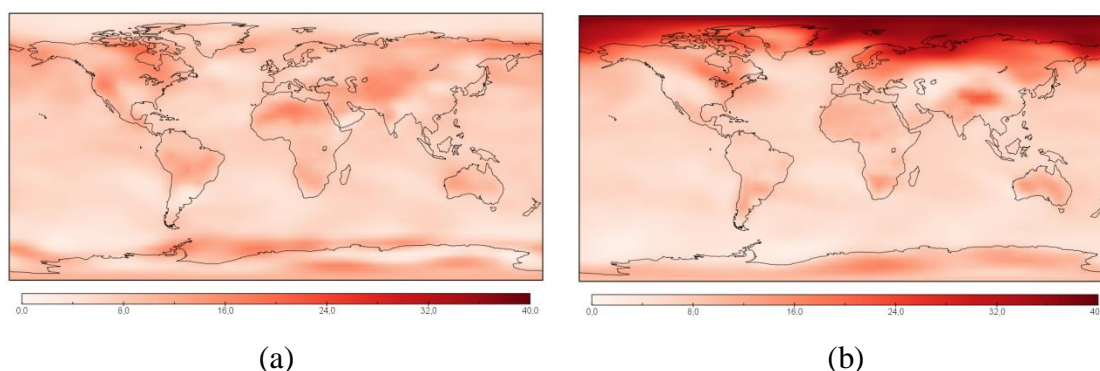


Figura 21 – Diferenças ( $EXPi\_TSI10p - EXPi\_CTRL$ ) de temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) do ar a 2 metros de altura para os meses de junho (a) e dezembro (b).

A diferença entre os campos de salinidade do mar entre  $EXPi\_TSI10p$  e  $EXPi\_CTRL$ , provenientes do modelo POP, é mostrada na Figura 22. Observa-se, para ambos os meses de junho e dezembro, embora com maior intensidade para o mês de dezembro, diferenças negativas de salinidade em altas latitudes do hemisfério norte, indicando menores valores de salinidade nesta região no  $EXPi\_TSI10p$  em relação ao  $EXPi\_CTRL$ . A menor salinidade em  $EXPi\_CTRL$  em altas latitudes é um indício de derretimento de gelo.

São observadas anomalias positivas nas regiões dos giros subtropicais em todos os oceanos, também para ambos os meses, indicando maior salinidade no  $EXPi\_TSI10p$ , provavelmente associada ao aumento da taxa de evaporação.

Para ambos os meses, a região oceânica adjacente à porção leste da Groenlândia apresenta anomalia positiva intensa. Além desta região, a área de atuação da Corrente

Norte do Brasil também apresenta anomalia positiva intensa no mês de junho, bem como a região onde ocorre a ressurgência no noroeste da África no mês de dezembro.

Por outro lado, parte do Oceano Índico apresenta anomalia negativa de salinidade, principalmente nas áreas mais próximas à Índia e Indonésia, indicando uma possível descarga de água doce na região em EXPi\_TSI10p devido ao derretimento de gelo.

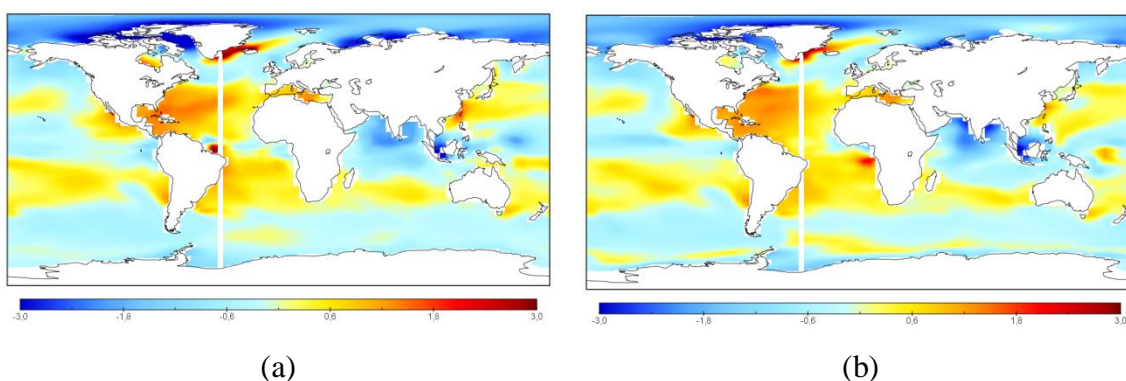


Figura 22 - Diferenças (EXPi\_TSI10p – EXPi\_CTRL) de salinidade absoluta (g/kg), proveniente do modelo oceânico, para os meses de junho (a) e dezembro (b).

As anomalias de fração de área coberta por gelo marinho, provenientes do modelo CICE, são mostradas na Figura 23. Observa-se no inverno do hemisfério norte (dezembro - Figura 23 b) uma região maior com valores de até 100%, indicando ausência de gelo no experimento EXPi\_TSI10p em relação a EXPi\_CTRL.

Desta forma, a diferença negativa indica menor formação de gelo marinho ou maior degelo devido à grande injeção de energia térmica no sistema climático, que teve como consequência o aumento da temperatura do ar como mostrado na Figura 21.

É possível identificar uma relação das anomalias de gelo marinho no hemisfério norte com as anomalias de salinidade do mar também no hemisfério norte (Figura 22).

Observa-se que as regiões de anomalia mais negativa de gelo marinho coincidem com as anomalias negativas da salinidade. Uma vez que há diminuição do gelo marinho, a salinidade local diminui, ocasionando as anomalias negativas de cobertura de gelo.

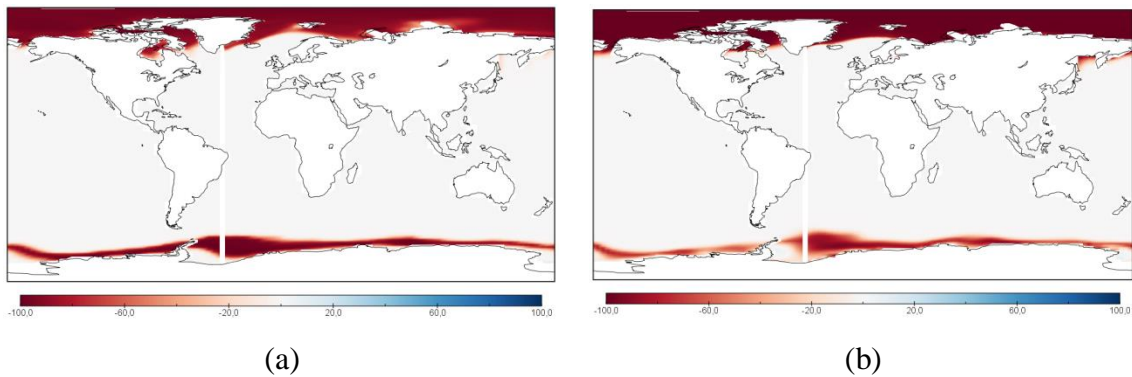


Figura 23 - Diferenças ( $EXPi\_TSI10p - EXPi\_CTRL$ ) de fração da superfície coberta por gelo (%), proveniente do modelo de gelo marinho, para os meses de junho (a) e dezembro (b).

Na região da costa norte do Brasil é observada anomalia negativa de escoamento superficial (*runoff*, proveniente do modelo RTM), ou seja, menor escoamento superficial em  $EXPi\_TSI10p$  do que em  $EXPi\_CTRL$  em junho (Figura 24 a). No mês de dezembro (Figura 24 b), a anomalia da região é suavizada, no entanto, há anomalia também negativa na região que abrange o nordeste brasileiro.

Uma alteração do padrão de escoamento fluvial é observada na região da Islândia, Inglaterra, Noruega, norte da Rússia e Canadá, que alternam de anomalias positivas em dezembro (Figura 24 b), ou seja, mais escoamento em  $EXPi\_TSI10p$  para o oceano, para anomalias negativas em julho (Figura 24 a), ou seja, menos descarga de água doce.

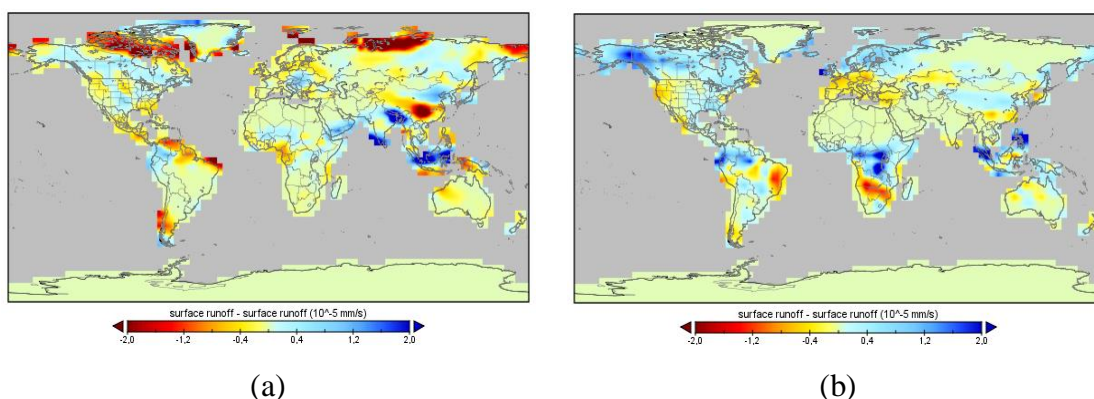


Figura 24 – Anomalias ( $EXPi\_TSI10p - EXPi\_CTRL$ ) dos campos de escoamento superficial (*runoff*). Em (a) mês de julho e (b) mês de dezembro do último ano de integração do modelo.

O objetivo destas avaliações foi testar a instalação do modelo CESM em sua versão disponível à época. Foi verificado que os modelos que compõem o CESM responderam à grande alteração do forçante solar, causando alterações compatíveis com a inclusão de energia no sistema. Desta forma, o CESM se mostrou uma ferramenta de possível utilização para o estudo de alterações no forçante solar, motivando os próximos experimentos desta tese.

## **5.2. Validação do experimento CTRL**

Neste tópico são apresentadas as validações do experimento CTRL, que corresponde ao experimento controle realizado com a versão 2.0 do CESM, ou seja, com a versão mais recente disponível (2018/2019).

Os resultados de pressão e temperatura do experimento CTRL são provenientes do modelo CAM6.

### **5.2.1. Distribuições médias zonais**

Para a validação do experimento, foi adquirido o período de 1980 a 2017 das reanálises Era-Interim e Reanalysis 2 e comparado com os resultados do CAM 6.0 para o mesmo período, divididos em agrupamentos trimestrais médios.

De maneira geral, para a pressão atmosférica reduzida ao nível do mar em todos os trimestres analisados, ou seja, DJF (Figura 25 a), MAM (Figura 25 b), JJA (Figura 25 c), SON (Figura 25 d), o experimento CTRL apresenta o mesmo padrão médio de comportamento exibido pelas reanálises.

Os posicionamentos dos cinturões de altas pressões estão localizados próximos a 30°S e 30°N, e os cinturões de baixas pressões estão posicionados próximos a 60°S e 60°N.

As diferenças entre o CTRL e as reanálises ocorrem nas regiões de valores mais extremos das curvas, entretanto com valores pouco discrepantes entre si. Na medida em que há maior proximidade com a região polar sul, os resultados divergem, mesmo entre as próprias reanálises, o que provavelmente está associado à precariedade de medições nestas regiões (THORNE et al., 2017)

No hemisfério norte isto ocorre também no período de JJA, que corresponde ao verão boreal.

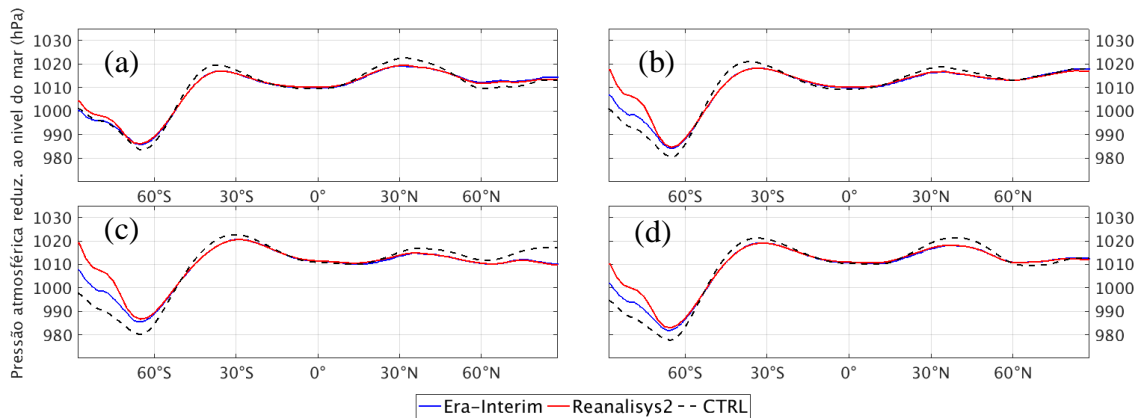


Figura 25 - Distribuições médias zonais de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) do experimento CTRL (linha tracejada preta), Era-Interim (linha azul) e Reanalysis 2 (linha vermelha), para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

A temperatura do ar a 2 m de altura (Figura 26), tanto do CTRL quanto das reanálises, também apresenta o mesmo perfil médio de PEIXOTO e OORTH (1992), com temperaturas mais altas na região equatorial e decréscimo de valores em direção aos polos.

No verão do hemisfério sul (DJF - Figura 26 a) as temperaturas na região polar sul são mais altas com relação à temperatura na mesma região no período de verão do hemisfério norte (JJA – Figura 26 c).

O contrário ocorre para a região polar norte, ou seja, a temperatura média no hemisfério norte em DJF é menor do que em JJA. Nos trimestres de MAM (Figura 26 b) e SON (Figura 26 d), por serem períodos que contém os equinócios, os perfis médios de temperatura são bastante similares.

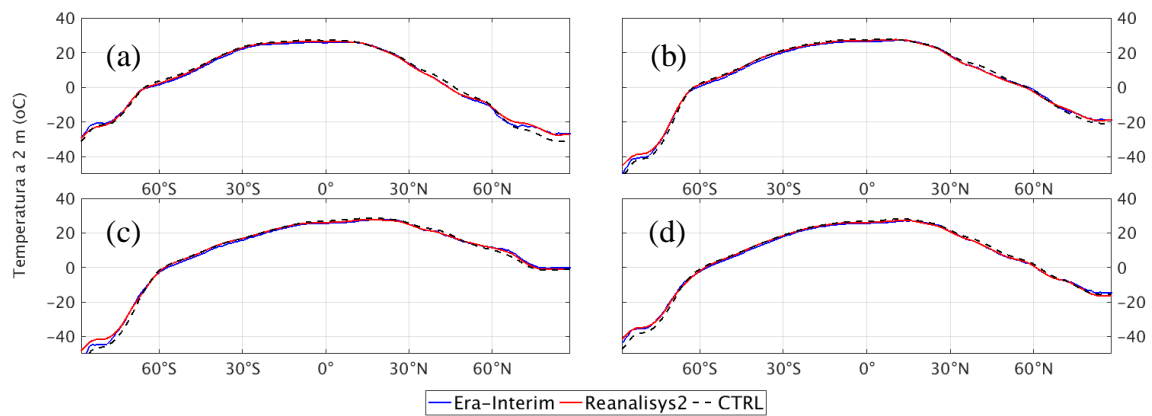


Figura 26 - Distribuições médias zonais de temperatura do ar a 2 m de altura (°C) do experimento CTRL (linha tracejada preta), Era-Interim (linha azul) e Reanalysis 2 (linha vermelha), para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON.

### 5.2.2. Feições climáticas experimento CTRL

O recorte vertical da distribuição média global do vento zonal ( $\text{ms}^{-1}$ ) é apresentado na Figura 27 (a).

A circulação zonal em ambos os hemisférios é dominada pelos jatos, com o fluxo de oeste, de aproximadamente  $30 \text{ ms}^{-1}$  no hemisfério sul e  $25 \text{ ms}^{-1}$  no hemisfério norte no nível de 200 hPa. Pode-se perceber a semelhança das feições dos escoamentos em ambos os hemisférios.

Os ventos alísios predominam na região tropical nos dois hemisférios. Apesar da semelhança das feições, percebem-se diferenças nas intensidades do vento em todos os níveis verticais entre os hemisférios entre as latitudes de  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , que chegam a aproximadamente  $5 \text{ ms}^{-1}$ .

Este resultado reflete o comportamento da atmosfera mostrado por PEIXOTO e OORTH (1992). A componente meridional do vento é mostrada na Figura 27 (b).

Observa-se que a intensidade da componente meridional (Figura 27 b) é muito menor do que a da componente zonal (Figura 27 a). Apesar da diferença entre as magnitudes dos ventos, a componente meridional compõe a circulação das células de Hadley, Ferrel e Polar.

No hemisfério sul, entre  $0^\circ$  e  $30^\circ$  S, têm-se valores positivos indicando movimento de sul para norte entre os níveis de 1000 e aproximadamente 850 hPa. No nível de 200 hPa a circulação se inverte, sendo de norte para sul. Com isto, fecha-se a circulação da célula de Hadley (Figura 27 b).

Entre 30°S e 60°S, no nível entre 1000 e 850 hPa, a componente é negativa, indicando movimento de norte para sul. Em 200 hPa a componente é positiva, ou seja, movimento de sul para norte, fechando a circulação da célula de Ferrel. De 60°S em diante, o movimento é positivo próximo de 1000 hPa e negativo em altitudes mais altas, fechando a célula polar (Figura 27 b).

Para o hemisfério norte as circulações das células também ocorrem, entretanto a análise é feita com os sinais opostos dos movimentos devido à escolha de orientação referencial da componente meridional, ou seja, o movimento sempre é positivo de sul para norte e negativo de norte para sul.

A maior quantidade de radiação solar é absorvida nas regiões intertropicais ao longo do ano, e isso se reflete no perfil vertical global médio de temperatura (Figura 27 c). O maior gradiente vertical de temperatura ocorre exatamente na região intertropical, sendo menor nas latitudes mais altas em ambos os hemisférios. Este resultado também está de acordo com o que é mostrado por PEIXOTO e OORTH (1992).

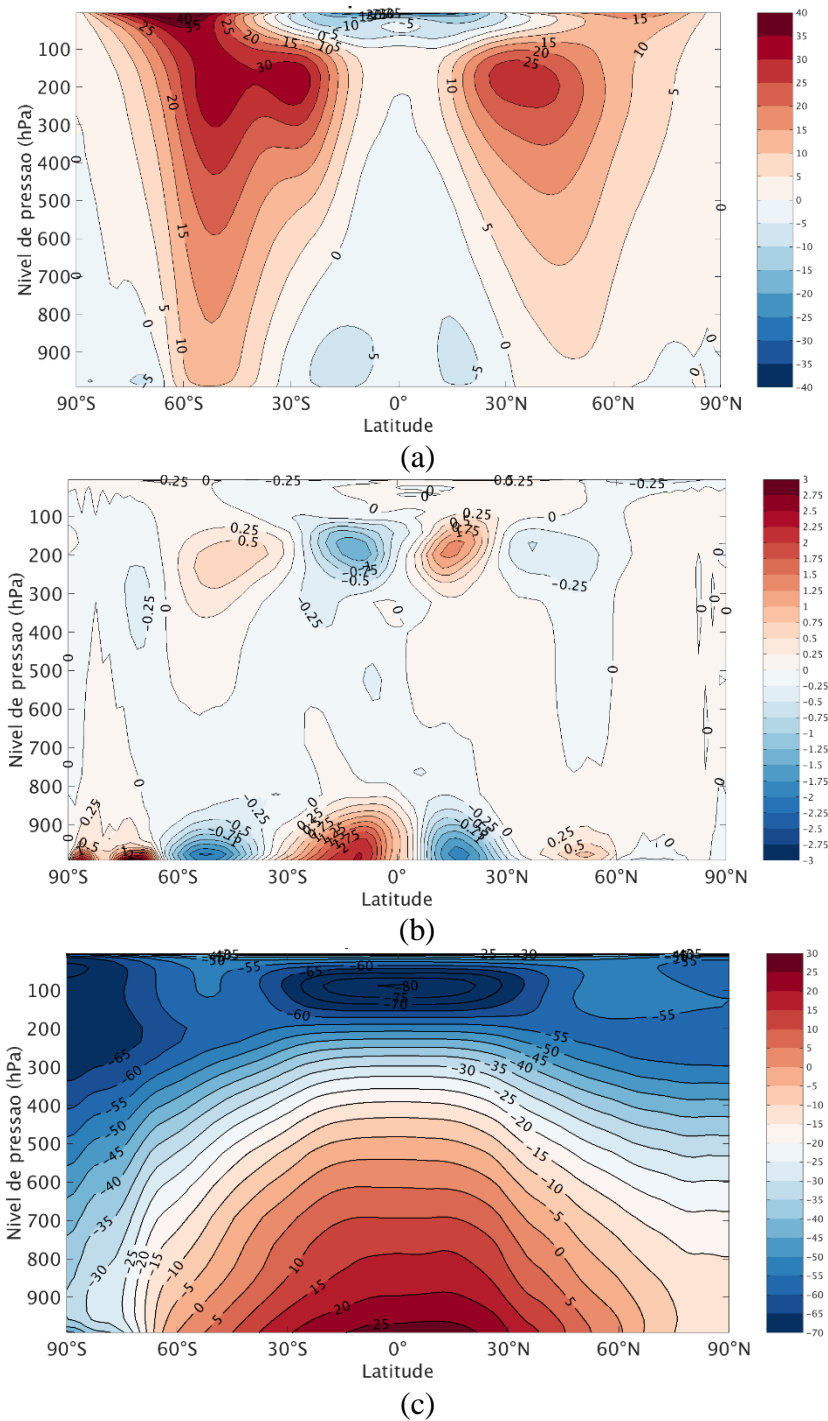


Figura 27 – Perfis verticais das médias zonais globais de (a) componente zonal (componente vetorial  $\mathbf{u}$ ) do vento em  $\text{ms}^{-1}$ . Os valores positivos (negativos) indicam o fluxo saindo (entrando) do (no) plano da figura; (b) componente meridional (componente vetorial  $\mathbf{v}$ ) do vento em  $\text{ms}^{-1}$ . Neste caso, valores positivos (negativos) indicam movimento de sul para norte (norte para sul); (c) temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Em comparação qualitativa, as feições médias de altas e baixas pressões presentes no campo de pressão do ERA-INTERIM (entre 1980 e 2010 - Figura 28 a) também estão presentes nas mesmas posições nos experimentos CTRL\_pre (entre 1850 e 1950 - Figura 28 b), CTRL\_pos (Figura 28 c) e GSM (entre 1970 e 2000 - Figura 28 d).

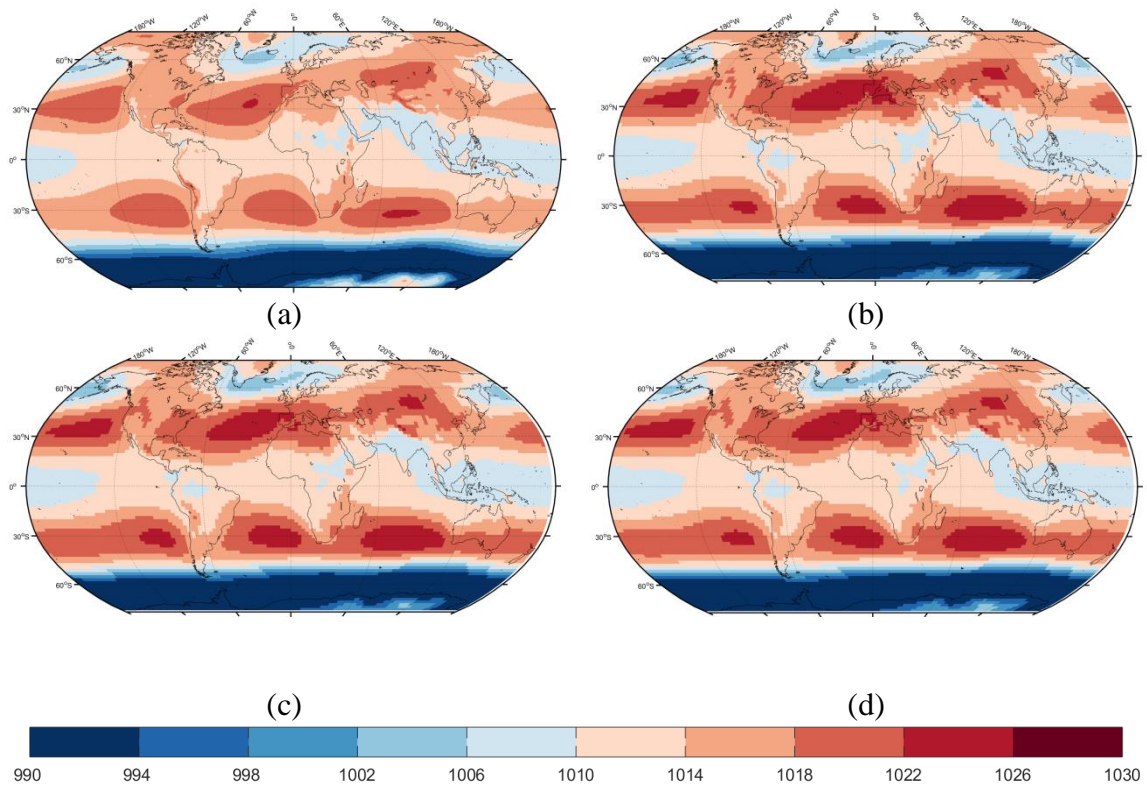


Figura 28 – Campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa). Em (a) ERA-INTERIM, (b) CTRL\_pre, (c) CTRL\_pos, (d) GSM.

Assim como nos campos de pressão atmosférica, os campos de temperatura dos experimentos com o CESM também apresentam as feições médias presentes no ERA-INTERIM (Figura 29).

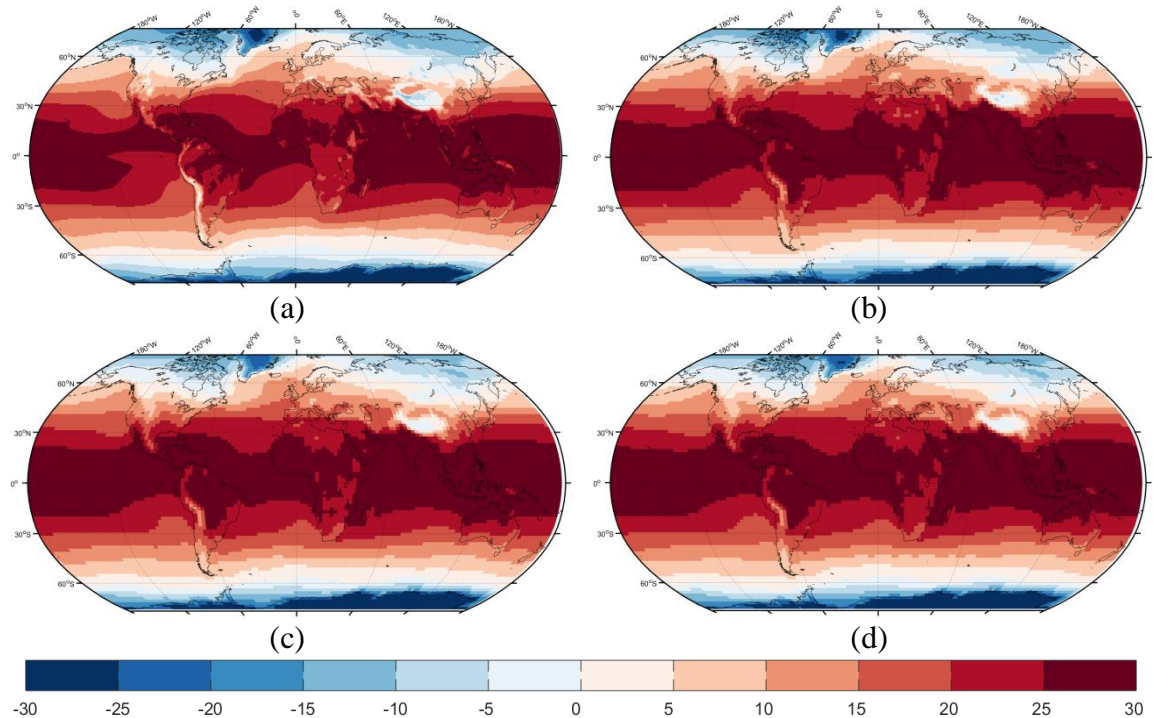


Figura 29 - Campos de temperatura do ar a 2 metros de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Em (a) ERA-INTERIM, (b) CTRL\_pre, (c) CTRL\_pos, (d) GSM.

Com base nestes resultados das validações do caso CTRL, em que o experimento correspondeu aos padrões gerais termodinâmicos e de circulação geral discutidos no trabalho de PEIXOTO e OORTH (1992), pode-se assumir que o experimento CTRL representa a atmosfera terrestre e pode ser utilizado como caso controle para comparações com o experimento GSM.

### 5.2.3. Correlações entre CTRL e GSM

Os coeficientes de correlação bidimensionais (latitude e longitude) entre os resultados de pressão atmosférica, temperatura a 2 metros de altura e precipitação dos dois experimentos CTRL e GSM foram calculados para cada mês entre os anos de 1850 e 2000. A técnica foi previamente apresentada no item 2.11.

Os coeficientes apresentaram valores diferentes de 1 (sendo que o valor 1 indica que os campos são iguais) a partir do ano 1950, que é o ano em que foi inserido o grande mínimo solar artificial, descrito no item 4.2.1. A partir deste momento, a energia disponível para o sistema climático foi alterada, causando as diferenças nos campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, temperatura a 2 m de altura e precipitação, em maior ou menor nível.

Como este coeficiente de correlação é calculado ponto a ponto dos domínios simulados, quando há pequenas alterações nos posicionamentos dos sistemas meteorológicos, os valores das variáveis são mais próximos entre si e o coeficiente apresenta valor próximo de 1.

Do contrário, quando os sistemas estão em posicionamentos diferentes nos dois experimentos, os valores são mais distantes de 1. Todos os valores calculados de correlação máxima, mínima e média são mostrados na Tabela 7.

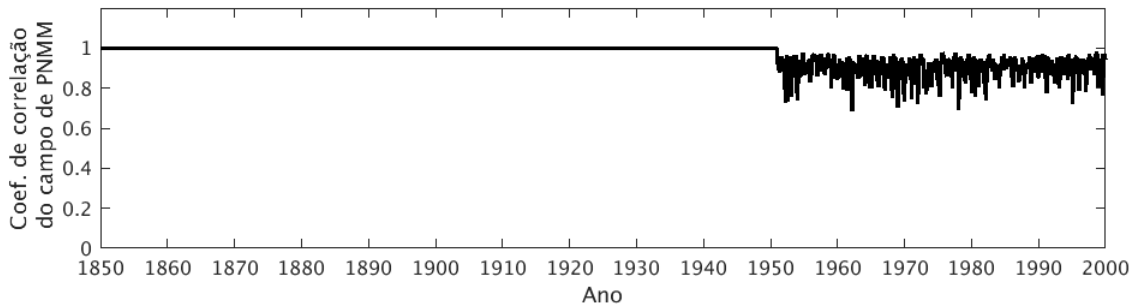
Tabela 7 – Coeficientes de correlação (r) bidimensional calculados entre os experimentos CTRL e GSM para os campos de pressão, temperatura e precipitação.

r	Pressão	Temperatura	Precipitação
Máxima	0,981	0,998	0,889
Mínima	0,683	0,984	0,341
Média	0,900	0,995	0,717

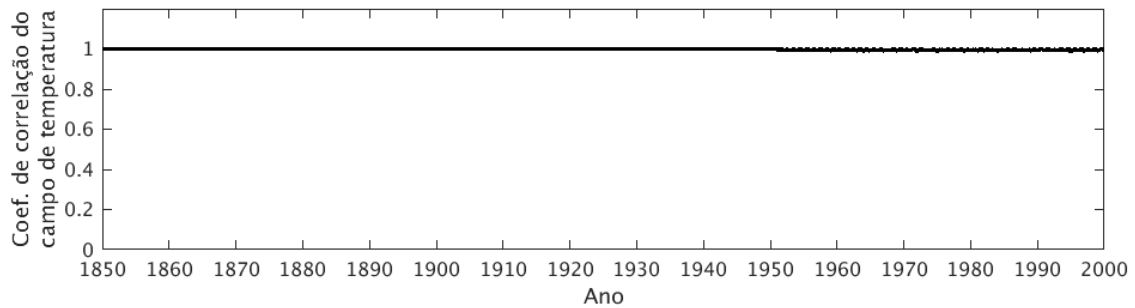
No caso da pressão do ar (Figura 30a), o posicionamento dos sistemas meteorológicos não apresenta muitas variações, o que é indicado pelos valores próximos a 1 do coeficiente, sendo, em média 0,9.

A temperatura do ar a 2 m de altura (Figura 30b) apresenta o maior coeficiente médio de correlação (0,995), o que indica que os campos de temperatura entre as simulações apresentam grande similaridade mensal.

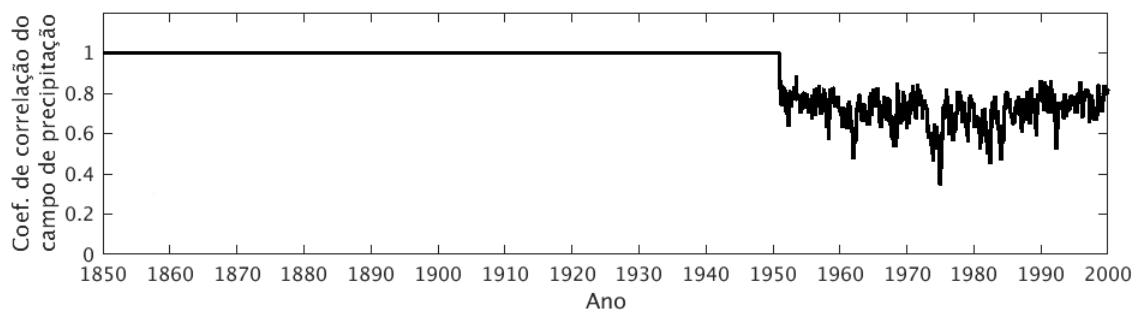
A precipitação (Figura 30c) é a variável meteorológica que mais apresenta diferença entre os experimentos, indicando que a diferença de energia causada pelo grande mínimo solar tem maior impacto no posicionamento das precipitações do que nos outros campos avaliados. Isto é indicado pelo valor do coeficiente médio (0,717).



(a)



(b)



(c)

Figura 30 - Coeficientes de correlação bidimensionais (latitude e longitude). Em (a) o coeficiente calculado para o campo de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar. Em (b) o coeficiente para o campo de temperatura a 2m de altura. Em (c) o coeficiente para o campo de precipitação. O período de grande mínimo solar artificial se inicia em 1950. Os valores são diferentes de 1 apenas depois de 1950 por ser o período do mínimo artificial de atividade solar.

### 5.3. Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (PNMM)

A série temporal de pressão do ar ao nível médio do mar (PNMM) integrada em todo o globo demonstra um pequeno declínio de tendência ao longo dos anos de integração até o ano de 1950 (Figura 31 a) e quase não há diferença entre as tendências do experimento CTRL\_pos e GSM (Figura 31 b).

A diferença entre os dois experimentos é mostrada na Figura 31 (c), com valores de até 3 hPa. A linha contínua entre os anos de 1850 e 1950 indica que as diferenças passam a ocorrer após a inserção do período de mínima atividade solar artificial.

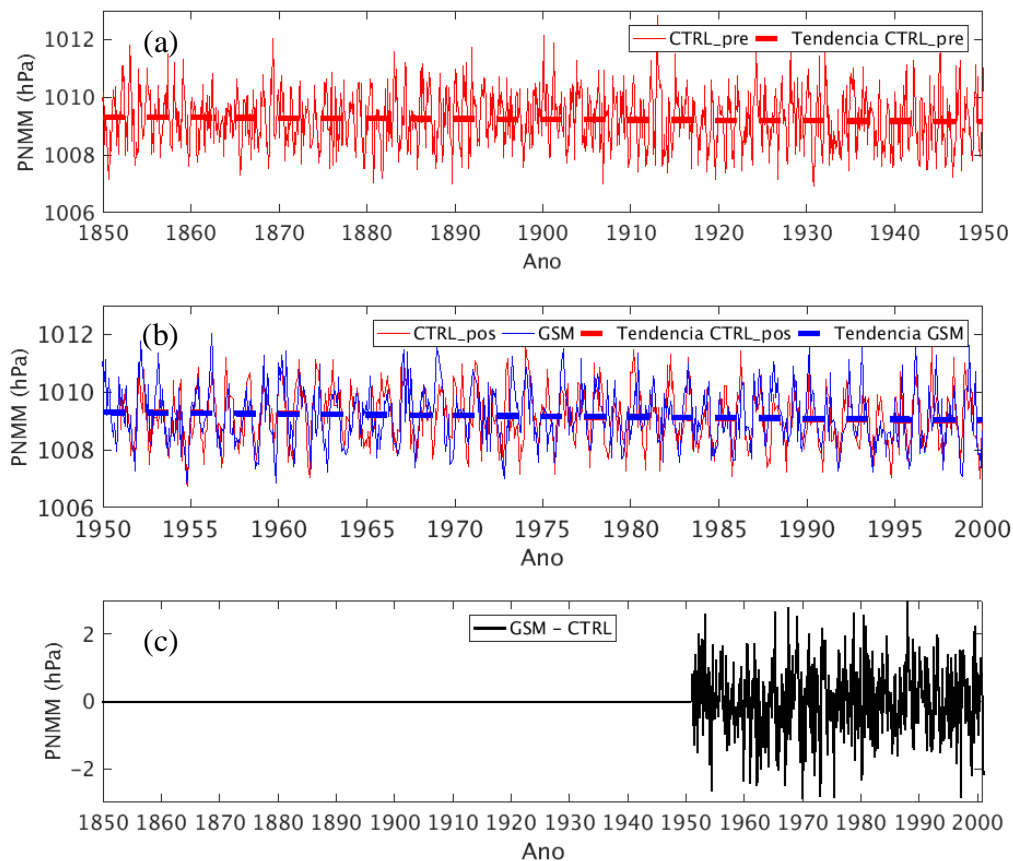


Figura 31 – Séries temporais de pressão do ar ao nível médio do mar (hPa). Em (a) experimento CTRL\_pre e sua tendência. Em (b) CTRL\_pos e GSM e suas respectivas tendências. Em (c) diferença entre GSM e CTRL.

O perfil da média zonal da PNMM (Figura 32 a) ao longo das latitudes para o período DJF dos experimentos CTRL\_pre, CTRL\_pos e GSM seguem o padrão descrito por PEIXOTO e OORTH (1992), com as regiões dos cinturões de altas (por volta de 30-40°S e 30° N) e baixas (por volta de 60°S e 60°N) pressões bem demarcadas.

Há uma pequena diferença entre os experimentos CTRL\_pos e GSM em relação ao CTRL\_pre nas regiões de altas latitudes.

Esta diferença pode ser melhor percebida na Figura 32 (b), chegando a aproximadamente +1,5 hPa no CTRL\_pos e -1,5 hPa no GSM.

A PNMM na região das altas latitudes do hemisfério sul são maiores no CTRL\_pre, indicando que o aumento do CO<sub>2</sub> que ocorre nos experimentos CTRL\_pos e GSM agiu diminuindo a PNMM nesta região, ou seja, as baixas pressões do cinturão de baixa pressão ficaram mais intensificadas em até 1,5 hPa, em módulo.

Na região de latitudes médias do hemisfério sul ocorre um aumento de até 1 hPa em CTRL\_pos e um pouco menos em GSM. Este efeito causa uma intensificação do gradiente de PNMM entre as regiões de latitudes médias e altas.

Nas regiões tropicais de ambos os hemisférios praticamente não há diferença entre os experimentos.

No hemisfério norte, tanto CTRL\_pos quanto GSM sofrem também uma intensificação das baixas pressões da região do cinturão de baixa pressão, entretanto em menor magnitude do que o hemisfério sul. Como consequência, o gradiente de pressão da região também é intensificado.

A anomalia entre os experimentos GSM e CTRL\_pos (Figura 32 c), que correspondem ao mesmo período de tempo, indica uma pequena intensificação da pressão do experimento GSM em duas regiões, uma entre 90°S e 60°S e outra entre 30°N e aproximadamente 50°N. Entre 60°S e aproximadamente 40°S e entre 60°N e 90°N, o experimento CTRL\_pos apresenta valores maiores de pressão. Este tipo de configuração pode intensificar o gradiente de pressão e, desta forma, intensifica também os sistemas transientes.

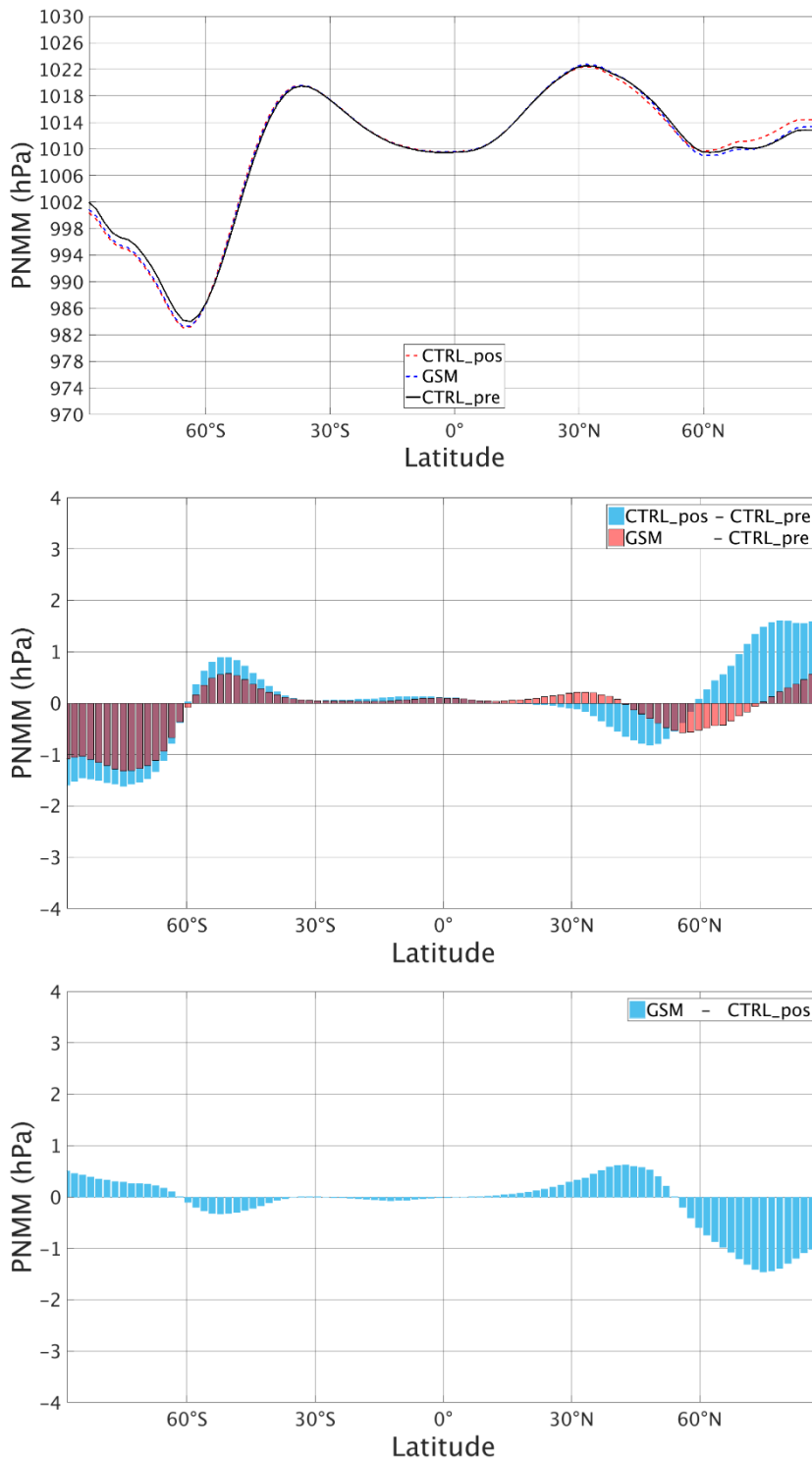


Figura 32 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para DJF. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

O perfil da média zonal da pressão ao longo das latitudes para o período JJA (Figura 33) também segue o padrão descrito por PEIXOTO e OORTH (1992). Entretanto, o período JJA, quando comparado com o período DJF, mostra diferenças menores entre as pressões em todas as latitudes.

Assim como DJF, o período JJA também apresenta um gradiente entre as regiões de latitudes altas e médias do hemisfério sul, apenas de menor magnitude.

De maneira geral, a anomalia entre os experimentos GSM e CTRL\_pos (Figura 33 c) indica que o experimento GSM apresenta PNMM ligeiramente maiores do que o experimento CTRL\_pos em JJA.

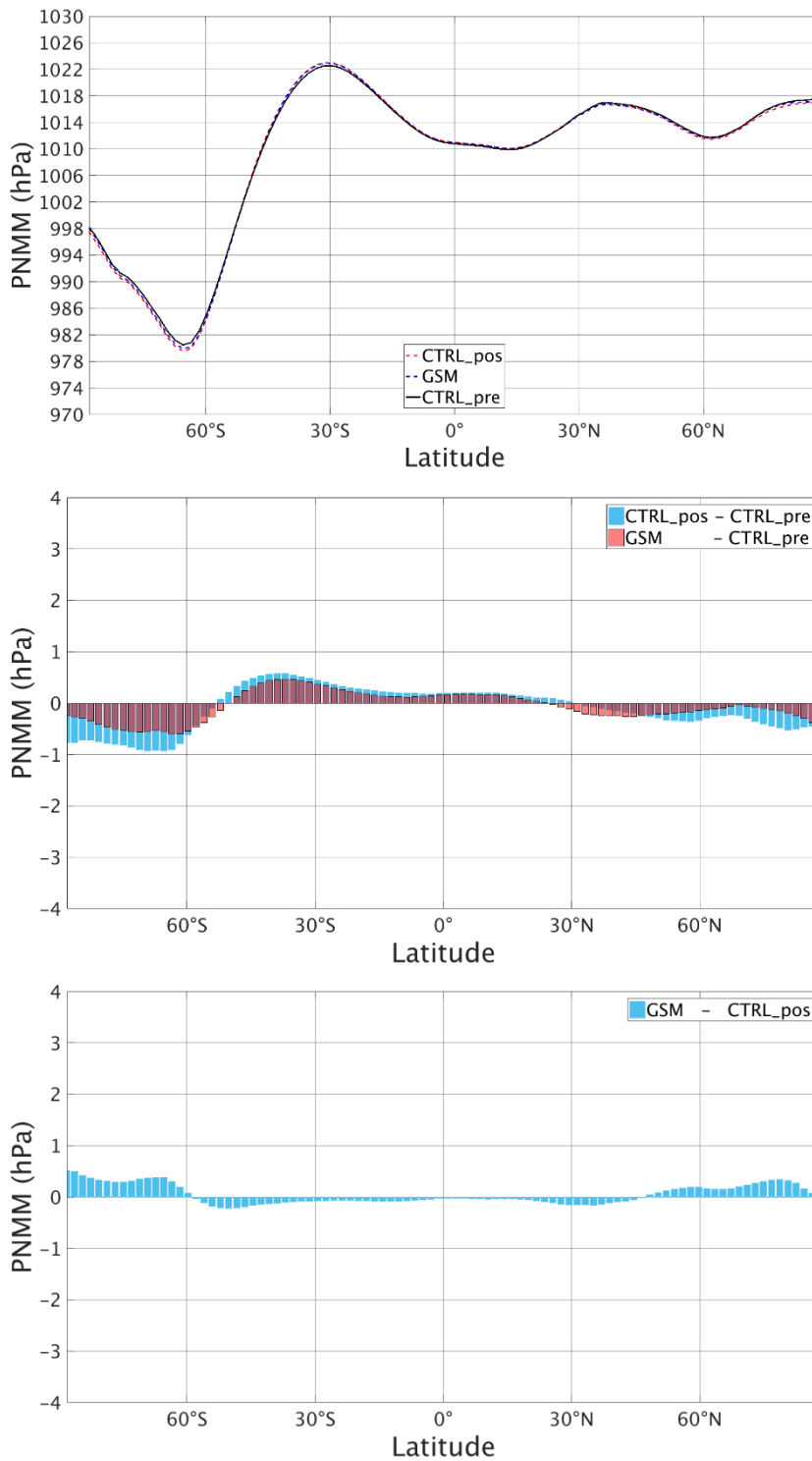


Figura 33 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para JJA. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

O perfil da média zonal da PNMM (Figura 34 a) ao longo das latitudes para o período MAM segue o padrão descrito por PEIXOTO e OORTH (1992), com as regiões dos cinturões de altas (por volta de 30-40°S e 30° N) e baixas (por volta de 60°S e 60°N) pressões bem demarcadas.

Há pouca diferença entre os experimentos CTRL\_pos e GSM em relação ao CTRL\_pre nas regiões que se aproximam dos polos.

O experimento GSM é o que mais se distancia de CTRL\_pre e, ainda assim, com valores menores do que 1 hPa (Figura 34 b). A anomalia entre os experimentos GSM e CTRL\_pos (Figura 34 c), que correspondem ao mesmo período de tempo, demonstra pouca diferença entre GSM e CTRL\_pos, pois MAM é um período de transição entre as estações mais extremas de DJF e JJA.

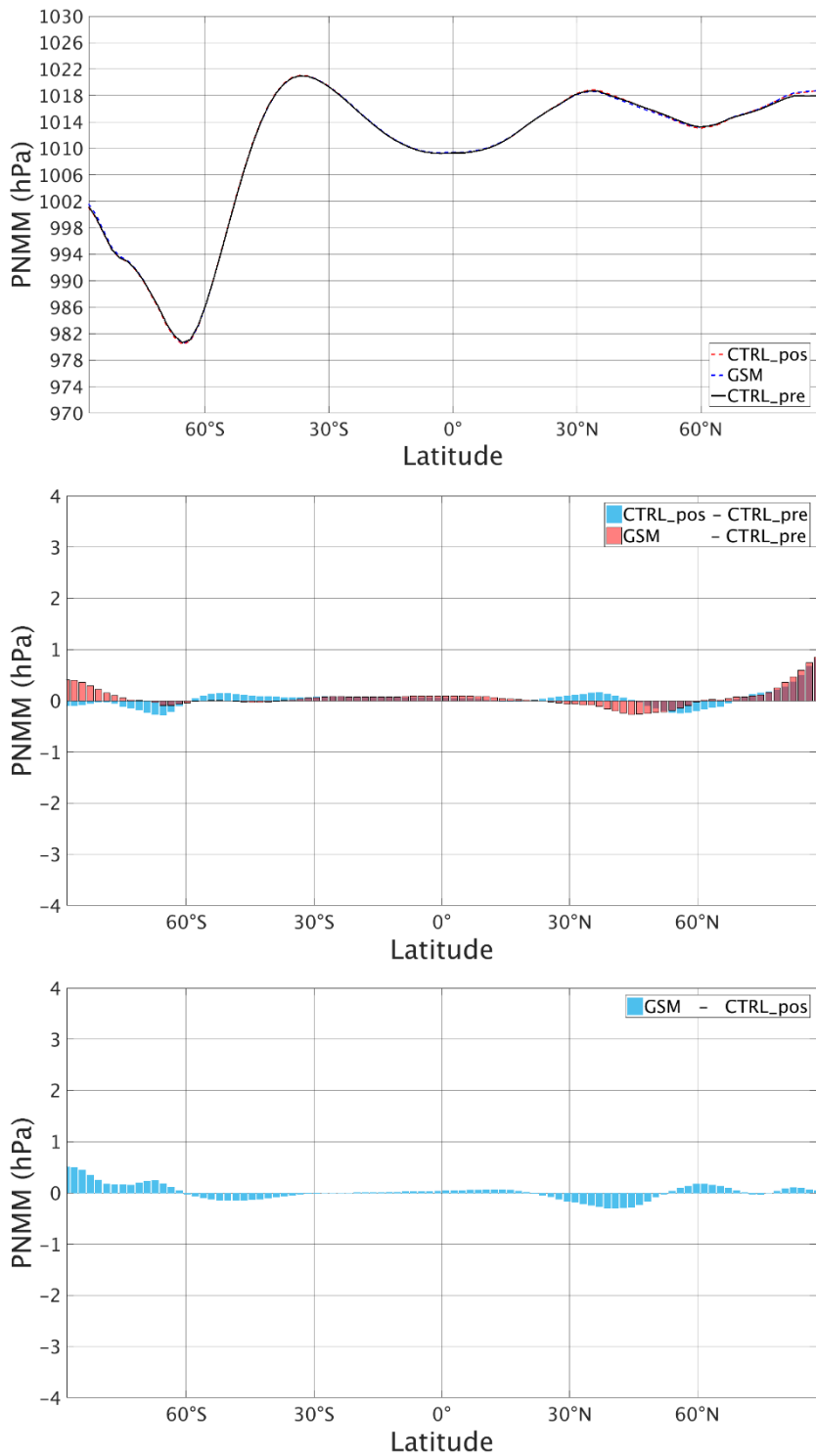


Figura 34 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para MAM. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

No período de SON (Figura 35), mesmo sendo também uma estação de transição, possui diferenças maiores do que o período MAM, chegando a pouco mais de -1 hPa nas altas latitudes (região dos cinturões de baixas pressões) de ambos os hemisférios, ou seja, intensificando as baixas pressões no experimento CTRL\_pos (Figura 35 b) em relação a CTRL\_pre.

A intensificação do cinturão de alta pressão no hemisfério sul é de menos do que 1 hPa. No experimento GSM, estas alterações ocorrem nas mesmas regiões, porém com menos intensidade do que o CTRL\_pos, com exceção das altas latitudes do hemisfério norte (Figura 35 b).

As diferenças entre GSM e CTRL\_pos (Figura 35 c) são, em geral, menores do que 1 hPa, indicando que a diminuição da TSI afeta a distribuição da PNMM de maneira mais suavizada neste período de tempo.

Na região de altas latitudes do hemisfério sul, a diferença é próxima de 1 hPa no experimento GSM, pois o efeito da TSI menor foi de intensificar a pressão nesta região.

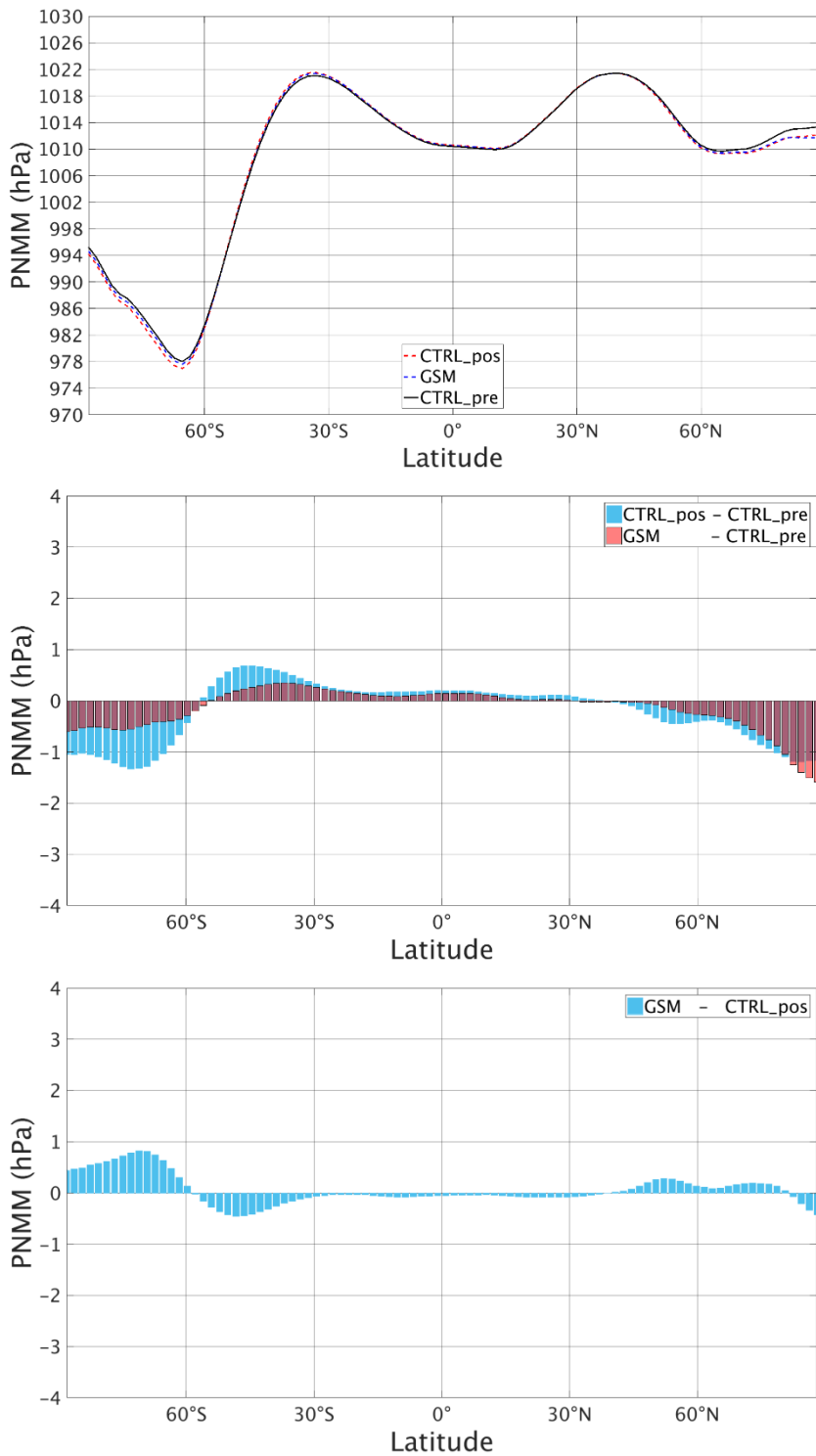


Figura 35 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para SON. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

### **5.3.1. Distribuição espacial dos campos de anomalia de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar**

A diferença da PNMM entre CTRL\_pos e CTRL\_pre é mostrada na Figura 36. Percebe-se que, apesar da variação global na pressão, algumas regiões se destacam pelo aumento da PNMM ao longo de todo o tempo de integração do modelo, tais como Atlântico sul e Pacífico sul, parte da América do Sul, altas latitudes do continente europeu e norte da Rússia, China e Índia.

Em regiões como Europa, norte da América do Norte, porção leste da Rússia e toda a região de altas latitudes do hemisfério sul, ocorre diminuição da PNMM. Estas anomalias que persistem ao longo de todo o período causam um aumento do gradiente de pressão, possivelmente com consequências na dinâmica atmosférica.

Estes resultados concordam com o trabalho de GILLETT et al. (2003), que avaliou espacialmente as diferenças da PNMM devido ao aumento dos gases de efeito estufa e emissão de aerossóis na segunda metade do século XX, que é o mesmo período do CTRL\_pos.

GILLETT et al. (2003) argumenta que a tendência da diminuição da PNMM nas regiões polares e Pacífico norte, além do aumento da PNMM no Pacífico norte subtropical causa alterações na circulação, induzindo impactos regionais no clima como, por exemplo, contribuir para o aumento de temperatura no inverno na Eurásia ao longo dos últimos 30 anos, aumento de precipitação na Escócia e diminuição na Espanha, que também concorda com os resultados de THOMPSON et al. (2000).

Em cenários de aumento de temperatura global existe grande probabilidade de aumento de condições de bloqueios atmosféricos regionais (LUPO et al., 1997; MOKHOV e TIMAZHEV, 2015; MOKHOV e TIMAZHEV, 2019) e com grande potencial de ameaça ambiental (MOKHOV e TIMAZHEV, 2019).

A anomalia positiva de PNMM também é registrada na região da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico sudeste, como visto na Figura 36. Esta intensificação caracterizada na forma de anomalia positiva prolongada de PNMM pode levar a situações de bloqueio atmosférico, que causam períodos de seca no verão, pois impedem a propagação de sistemas transientes pela América do Sul (MENDES et al., 2005).

Os episódios de bloqueio causam anomalias positivas das temperaturas no norte da Argentina, Uruguai, sul do Brasil, e Paraguai, além de, principalmente no verão,

causar redução da precipitação no Brasil. Na sul da América do Sul, região da Patagônia, causa anomalias negativas de temperatura (MENDES et al., 2005).

MENDES et al. (2005) indicam que ao longo das últimas décadas do século XX ocorreu um aumento gradual na quantidade de eventos de bloqueio atmosférico sobre o Pacífico sudeste. Este período temporal corresponde ao experimento CTRL\_pos deste trabalho, em que há o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>.

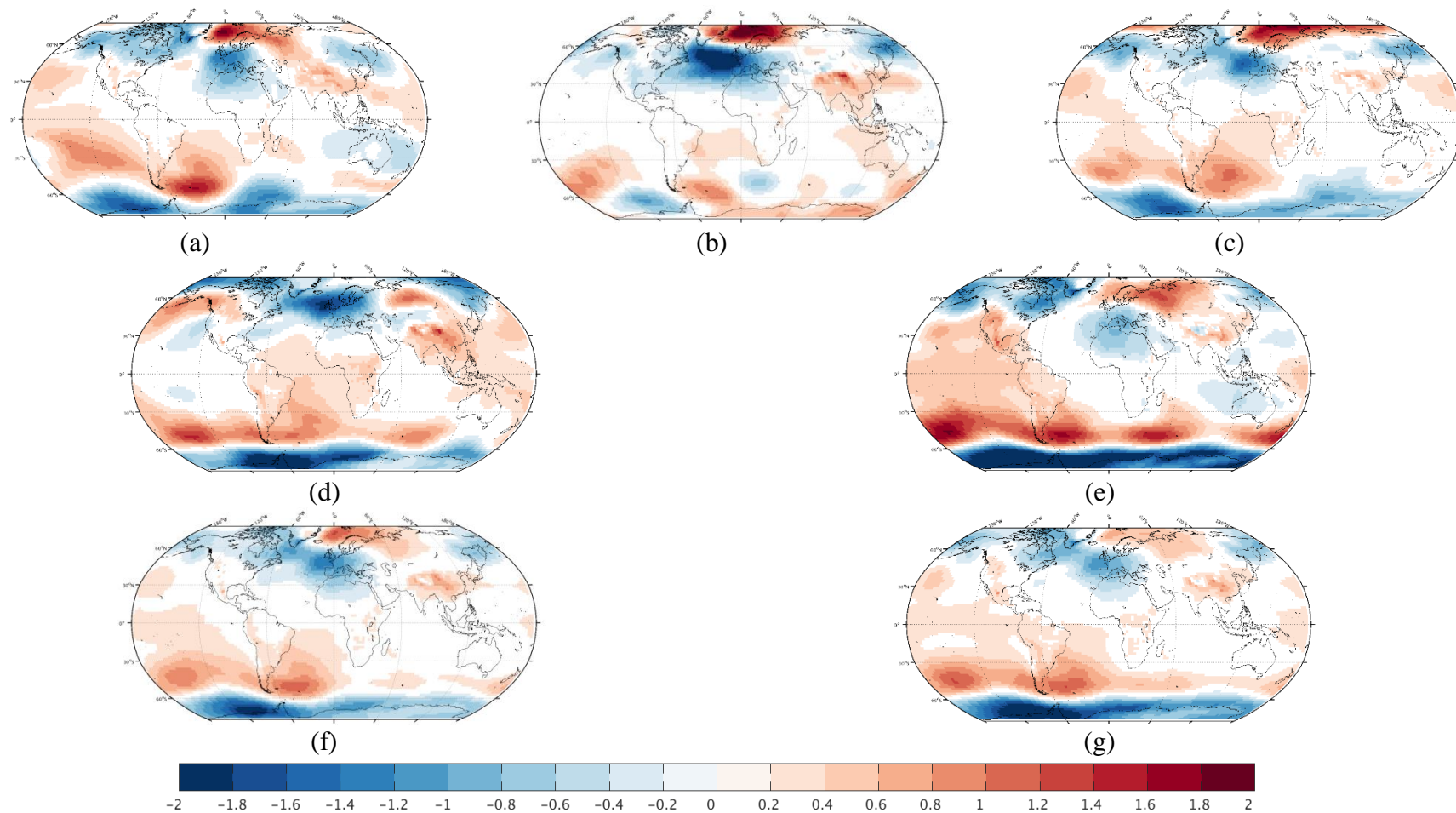


Figura 36 - Campo de diferença de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) entre CTRL\_pos e CTRL\_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

O experimento GSM (Figura 37) também apresenta feições médias em relação a CTRL\_pre similares ao experimento CTRL\_pos em relação a CTRL\_pre. A região do Atlântico Norte, que apresenta normalmente um sistema semi-permanente de alta pressão passa a apresentar uma redução na pressão no experimento GSM em todos os períodos avaliados, enquanto que a região a norte da Europa e Eurásia registra anomalia positiva de pressão em GSM entre 1950 e 1990 (Figura 37 a, b, c, d), bem como a região Sul e Centro-Sul da América do Sul. Na última década (Figura 37 e) a região apresenta anomalia bastante negativa de pressão e a região de altas altitudes do sul também mostra anomalia negativa em GSM.

Ao longo dos intervalos decadais avaliados, as regiões do Oceano Atlântico Sul e Pacífico Sul também apresentam anomalias positivas de PNMM. O experimento GSM, assim como CTRL\_pos, apresenta aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, entretanto, mesmo com o período prolongado de mínima atividade solar as anomalias de PNMM estão presentes e com certa intensidade. Esta intensidade das anomalias, tanto positivas quanto negativas são mais suavizadas em GSM.

Nas médias de período mais prolongado, de 50 anos (Figura 37 f) e 30 anos (Figura 37 g), também são registradas anomalias positivas de PNMM no Atlântico Sul (região da ASAS) e no Pacífico sudeste, que demonstra o permanência da anomalia por um longo período de tempo, levando a alterações no padrão climático e que também está de acordo com o MENDES et al. (2005), que indica o aumento gradual dos episódios de bloqueios no entorno da América do Sul ao longo das últimas décadas do século XX. MAYCOCK et al. (2015), ao avaliar o impacto de redução de TSI em experimentos com modelo climático também verificou a intensificação de episódios de bloqueio, mas só foi avaliado o hemisfério norte.

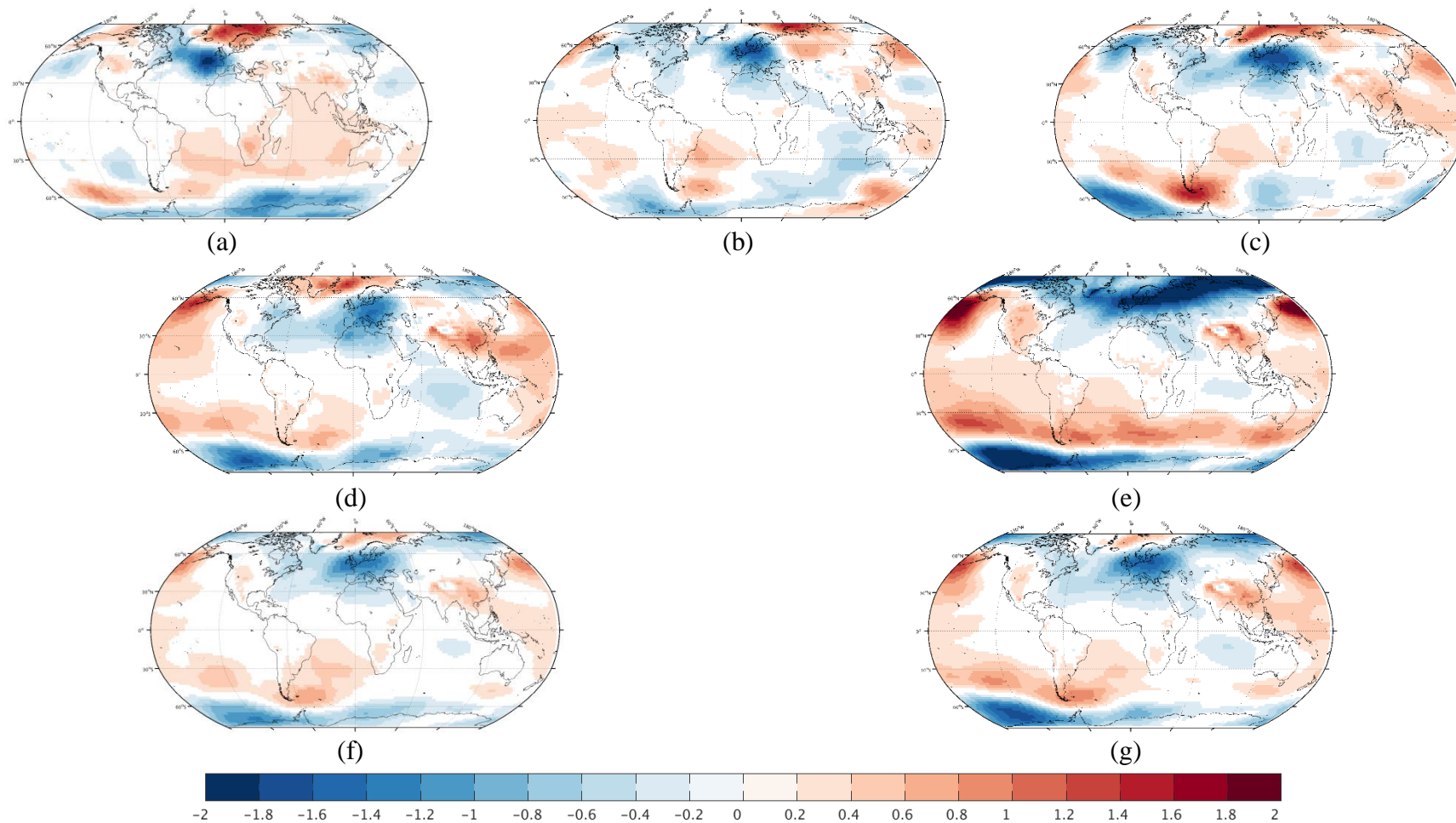


Figura 37– Campo de diferença de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) entre GSM e CTRL\_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

A anomalia da PNMM entre GSM e CTRL\_pos (Figura 38) é perceptível já nos primeiros dez anos posteriores à inclusão do grande mínimo solar (Figura 38 a). Surge no Pacífico sul um grande centro com pressão mais alta e uma grande região no Pacífico central com pressões mais baixas, gerando um maior gradiente de pressão na região.

Nos dez anos seguintes (Figura 38 b), na região do Atlântico Norte também surge uma região de anomalia positiva e um centro de anomalia negativa no extremo norte da Europa, intensificando o gradiente de pressão local, alterando a dinâmica da atmosfera.

Nos últimos dez anos de integração (Figura 38 e), uma grande área de pressões menores no experimento GSM surge na área que abrange toda a Europa e região central e norte da Rússia.

No hemisfério sul a região do Pacífico Sul tem uma intensificação da anomalia negativa. Já a região do Pacífico norte e altas latitudes do hemisfério sul apresentam um aumento da PNMM. Este local é uma região de baixas pressões, portanto, a anomalia positiva age aumentando a pressão deste cinturão de baixa.

No cenário de GSM a PNMM da região da ASAS enfraquece, o que possibilita a penetração de sistemas transientes na América do Sul.

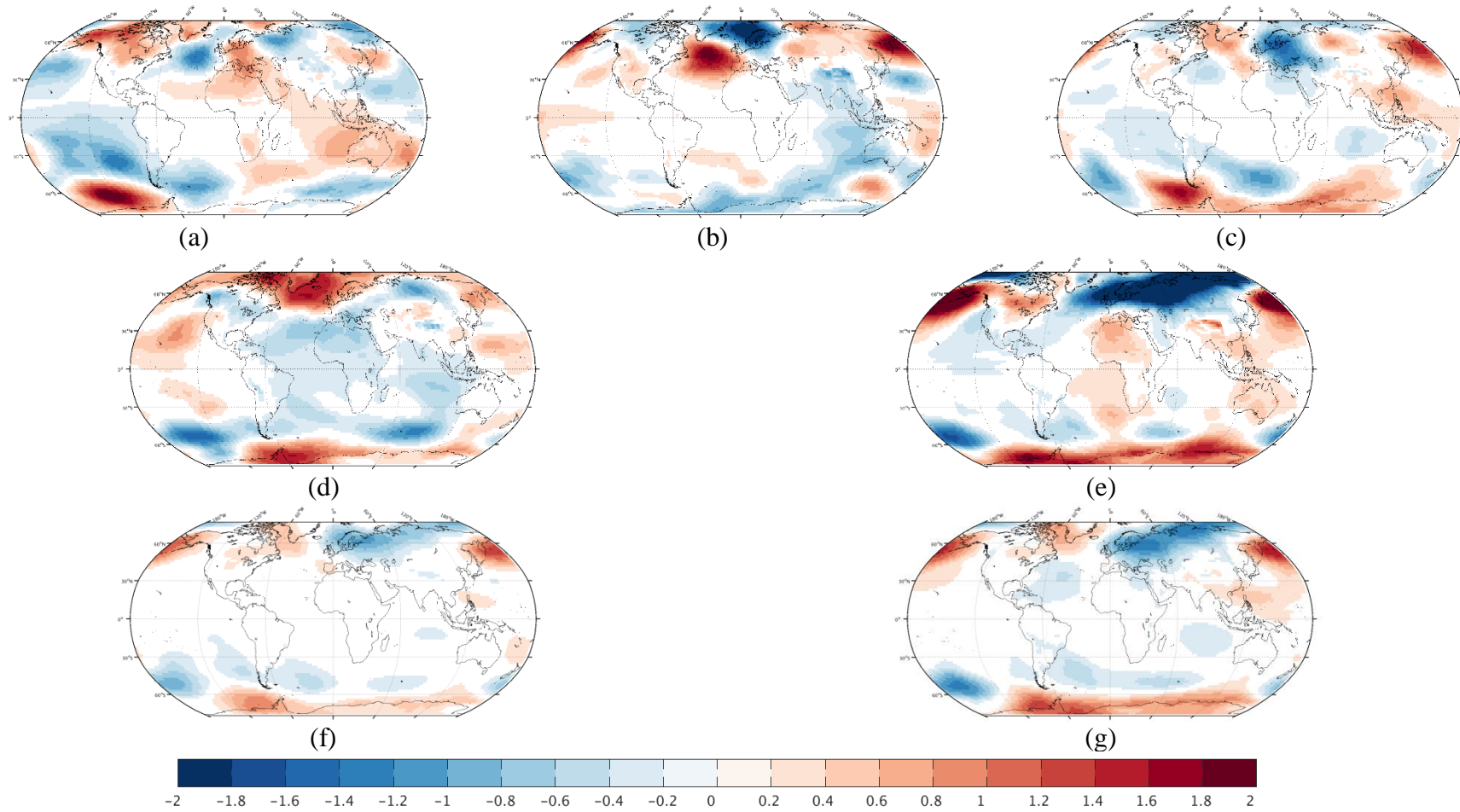


Figura 38— Campo de diferença de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) entre GSM e CTRL\_pos. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

#### 5.4. Temperatura do ar

A série temporal de temperatura do ar a 2 metros de altura integrada em todo o globo demonstra um aumento da tendência ao longo dos anos de integração, desde 1850 a 1950 (Figura 39 a), além de manter o aumento da tendência tanto em CTRL\_pos quanto em GSM entre 1950 e 2000 (Figura 39 b).

A diferença entre os experimentos GSM e CTRL é mostrada na (Figura 39 c), com diferenças de até 3 °C. A linha contínua entre os anos de 1850 e 1950 indica que as diferenças passam a ocorrer após a inserção do período de mínima atividade solar artificial.

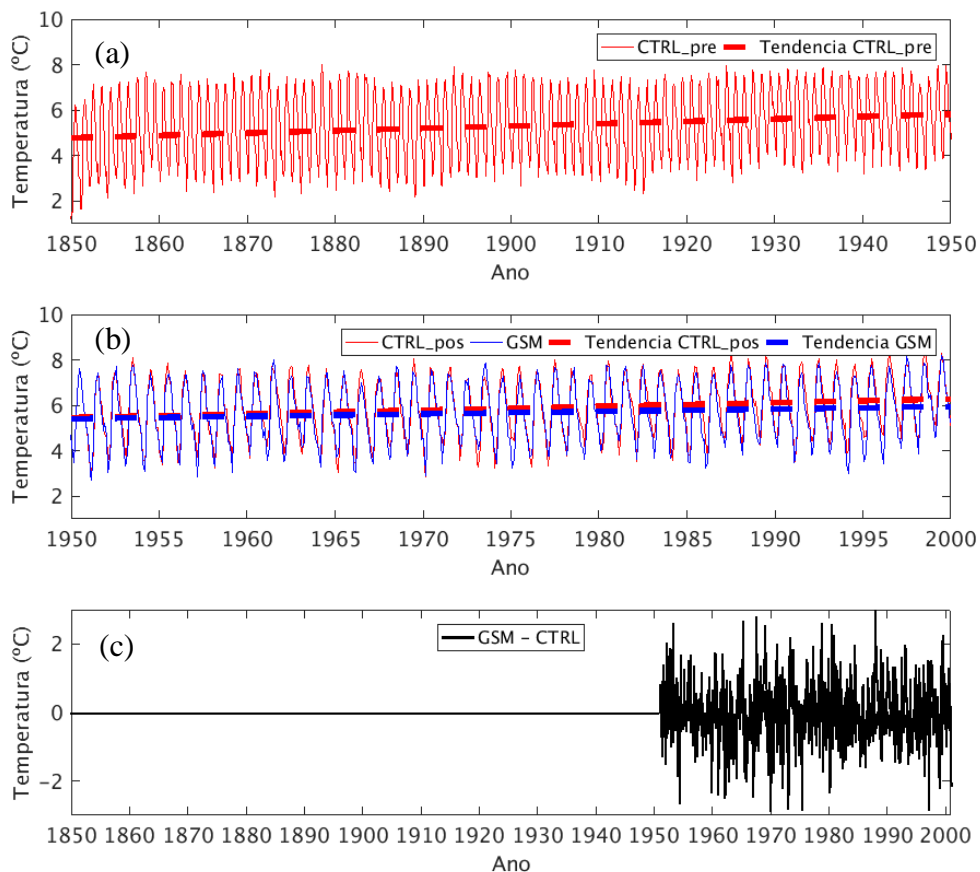


Figura 39 – Séries temporais de temperatura do ar a 2 m de altura (°C). Em (a) experimento CTRL\_pre e sua tendência. Em (b) CTRL\_pos e GSM e suas respectivas tendências. Em (c) diferença entre GSM e CTRL.

O perfil da média zonal da temperatura (Figura 40 a) ao longo das latitudes para o período DJF segue o padrão descrito por PEIXOTO e OORTH (1992), com maiores temperaturas nas regiões tropicais, decrescendo em direção aos polos.

As diferenças de temperatura entre os experimentos do período posterior a 1950 (GSM e CTRL\_pos) e o CTRL\_pre (Figura 40 b) indicam que no hemisfério norte o impacto é maior do que no hemisfério sul. Entre 90°S e aproximadamente 50°N as diferenças se mantêm até por volta de 0,5°C.

Entretanto, entre 50°N e a região polar norte, o aumento de temperatura chega a 4°C no CTRL\_pos e 3°C no GSM. Este efeito do aumento de temperatura no hemisfério norte ocorre devido a grande capacidade da água de reter o calor em relação ao solo. Uma vez que o hemisfério sul tem uma razão continente/oceano muito pequena, este hemisfério preserva o calor de maneira mais eficiente, apresentando pouca variação de temperatura quando comparado ao hemisfério norte.

Apesar do aquecimento dos experimentos CTRL\_pos e GSM, o experimento GSM (Figura 40 c) apresenta menor aquecimento do que CTRL\_pos, devido a retirada de energia do sistema causada pela diminuição da TSI no período de mínima atividade solar.

Esta diferença chega a aproximadamente 0,9°C nas latitudes altas do hemisfério norte e se mantêm até aproximadamente 0,2°C nas demais latitudes, indicando que a diminuição da TSI causa uma queda global de temperatura a 2 metros de altura.

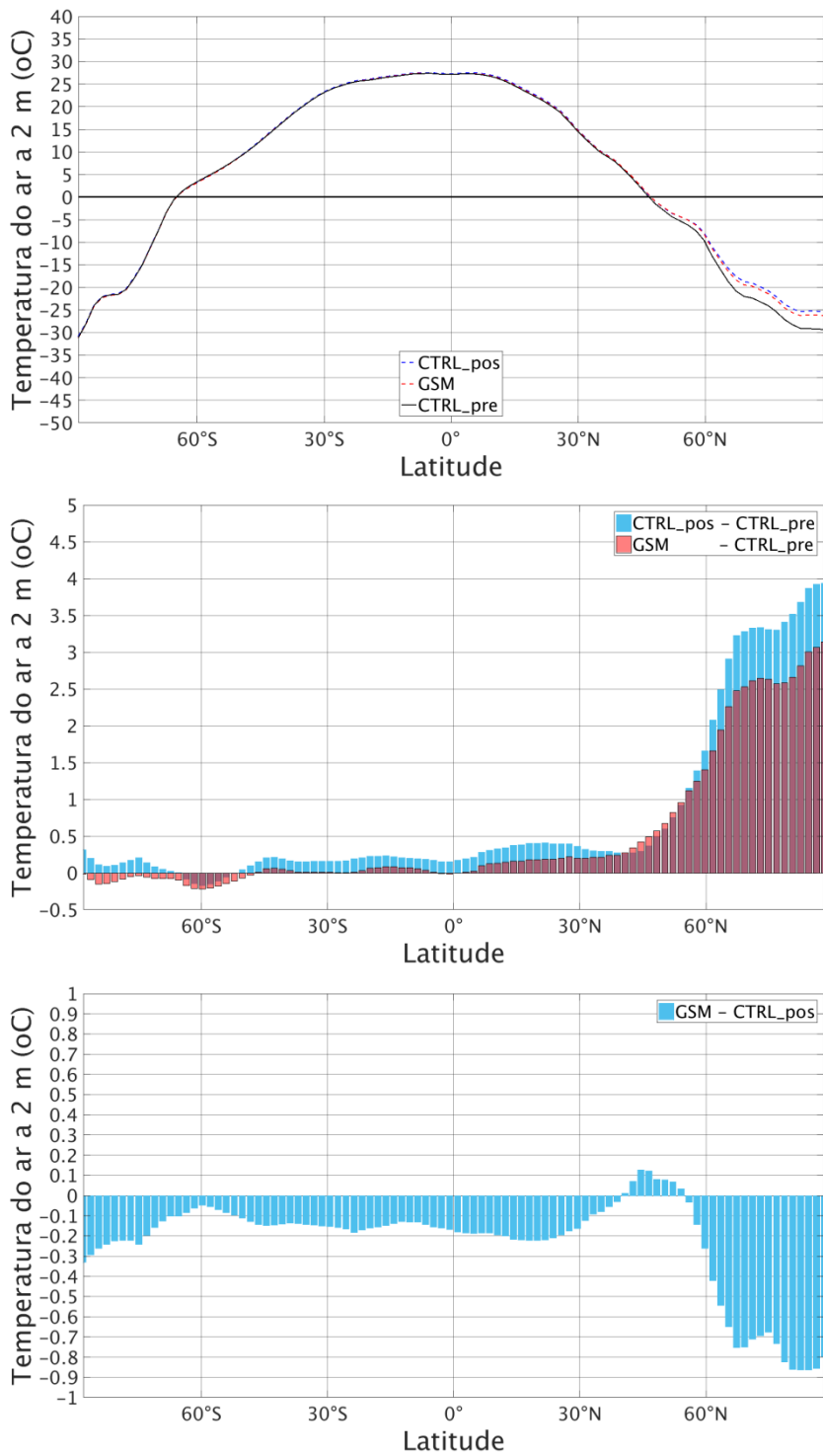


Figura 40 - Distribuições zonais de temperatura do ar a 2 m de altura (°C) para DJF. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

No período JJA (Figura 41 a), o perfil da média zonal de temperatura apresenta temperaturas maiores na região tropical e diminui em direção aos polos.

A diferença entre JJA (Figura 41 a) e DJF (Figura 40 a) é bastante ressaltada com a maior queda de temperatura nas altas latitudes do hemisfério sul e temperaturas mais altas do que DJF nas altas latitudes do hemisfério norte devido ao posicionamento do Sol.

As diferenças de temperatura entre CTRL\_pos e CTRL\_pre e entre GSM e CTRL\_pre em JJA (Figura 41 c) são menores do que em DJF, chegando a até aproximadamente  $0,5^{\circ}\text{C}$  em  $60^{\circ}\text{N}$ . Assim como em DJF, o experimento GSM apresenta valores menores de temperatura em comparação com CTRL\_pos.

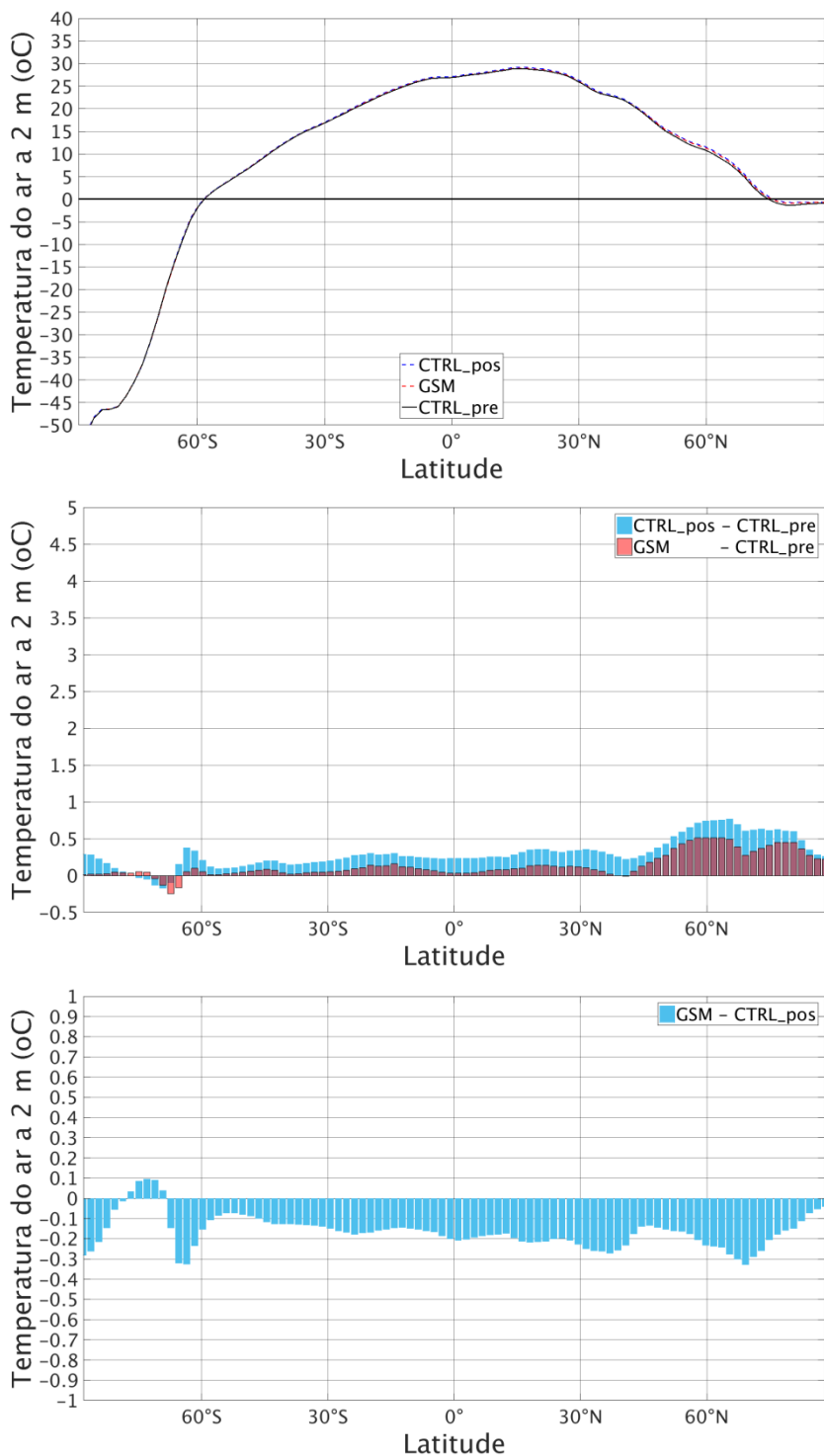


Figura 41 - Distribuições zonais de temperatura do ar a 2 metros de altura (°C) para JJA. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

O perfil da média zonal da temperatura (Figura 42 a) ao longo das latitudes para o período MAM, assim como os demais períodos do ano, segue o padrão descrito por PEIXOTO e OORTH (1992), com maiores temperaturas nas regiões tropicais, decrescendo em direção aos polos.

As diferenças de temperatura entre os experimentos do período posterior a 1950 (GSM e CTRL\_pos) e o CTRL\_pre (Figura 42 b) indicam que assim como o período DJF, no hemisfério norte o impacto é maior do que no hemisfério sul.

Entre 90°S e aproximadamente 50°N as diferenças se mantêm menores do que 0,5°C e positivas. Entre 50°N e a região polar norte, o aumento de temperatura chega a pouco mais de 3,5°C no CTRL\_pos e 3,5°C no GSM. Este efeito do aumento de temperatura no hemisfério norte é o mesmo já abordado no período DJF.

Apesar do aquecimento dos experimentos CTRL\_pos e GSM, o experimento GSM (Figura 42 c) apresenta menor aquecimento do que CTRL\_pos, devido a retirada de energia do sistema causada pela diminuição da TSI no período de mínima atividade solar.

Esta diferença chega a aproximadamente 0,5°C a menos do que CTRL\_pos nas latitudes altas do hemisfério norte e se mantêm até aproximadamente 0,2°C nas demais latitudes, indicando que a diminuição da TSI causa uma queda global de temperatura a 2 metros de altura.

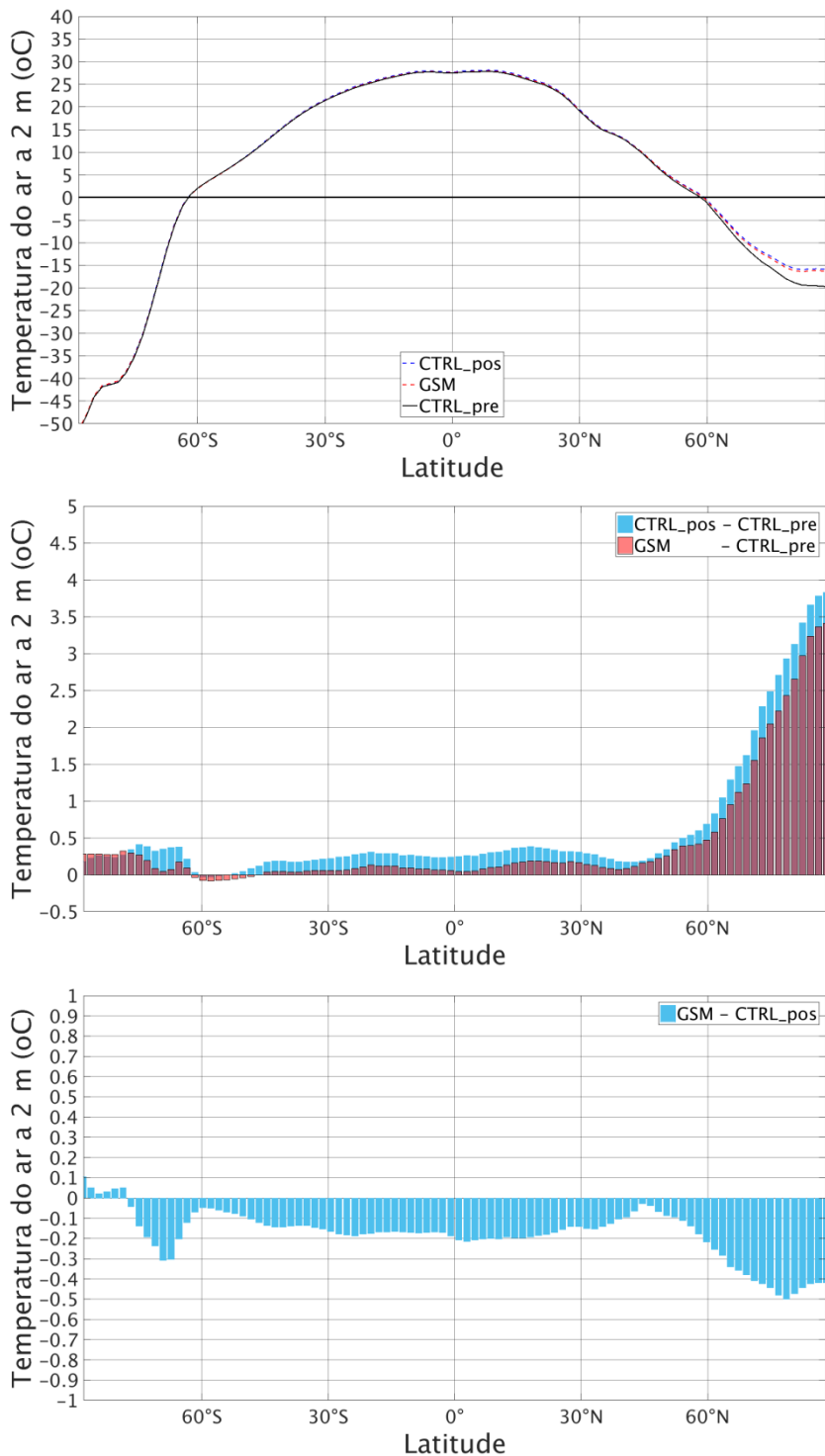


Figura 42 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para MAM. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

No período SON (Figura 43 a), o perfil da média zonal de temperatura apresenta temperaturas maiores na região tropical e diminui em direção aos polos.

A diferença entre MAM (Figura 42 a) e SON (Figura 43 a) é pequena, por serem estações de transição. Por isso, os experimentos CTRL\_pos e GSM também apresentam aumento geral de temperatura quando comparados a CTRL\_pre (Figura 43 b).

Assim como em MAM, a diferença (Figura 43 c) chega a aproximadamente 0,5°C a menos do que CTRL\_pos nas latitudes altas do hemisfério norte e se mantém até aproximadamente 0,2°C nas demais latitudes

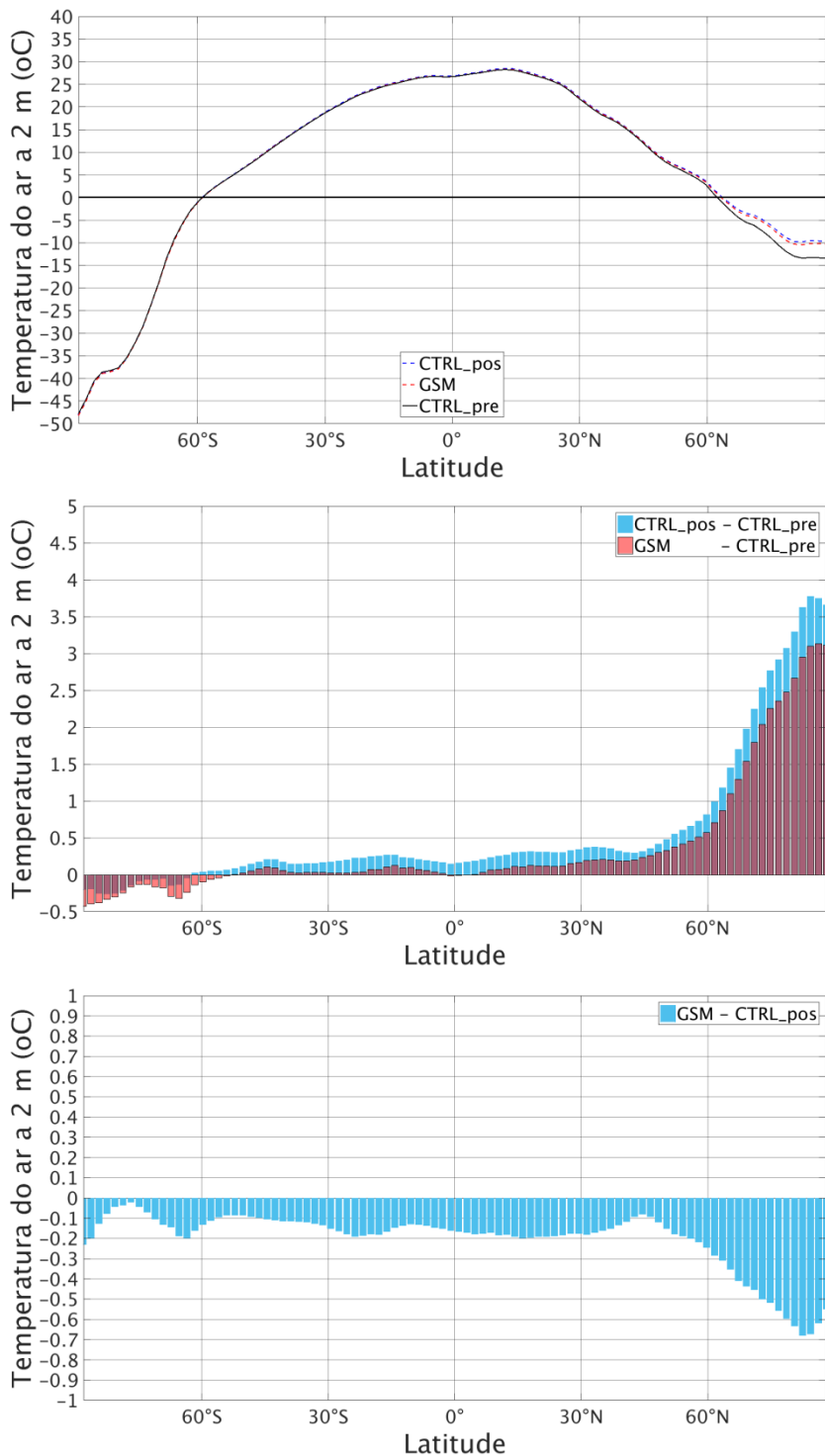


Figura 43 - Distribuições zonais de pressão atmosférica ao nível médio do mar (hpa) para SON. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

De maneira geral, houve um aumento da temperatura média zonal em ambos os experimentos CTRL\_pos e GSM quando comparados ao CTRL\_pre.

Analisando-se apenas CTRL\_pos em relação a CTRL\_pre, a diferença entre ambos é causada pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no sistema climático terrestre.

O experimento GSM, apesar de ter sua TSI diminuída, também contém o aumento de CO<sub>2</sub>.

Portanto, a diminuição da TSI não foi suficiente para equilibrar o aumento de temperatura causado pelo aumento de CO<sub>2</sub>, ou seja, mesmo retirando do sistema climático a energia do relacionada ao período de mínima atividade solar prolongada, a temperatura média global tende a aumentar, mesmo que de maneira menos intensa do que o experimento CTRL\_pos.

#### **5.4.1. Perfil vertical de temperatura**

A atmosfera, como um todo, apresenta aumento de temperatura em toda a seção vertical integrada. As maiores anomalias de temperatura no perfil vertical são encontradas nas regiões mais altas da atmosfera, acima de 400 hPa. Para DJF (Figura 44 a), o hemisfério sul apresenta anomalia negativa e o hemisfério norte positiva.

Isso indica que o aumento de CO<sub>2</sub> ocorrido após 1950 causou um aumento de temperatura nos altos níveis no hemisfério norte e queda de temperatura nos altos níveis no hemisfério sul.

Próximo à superfície, o aumento de temperatura é mais marcante no hemisfério norte, mesmo sendo um período de inverno austral. Isso poderia caracterizar uma mudança de padrão climático indicando que os invernos do CTRL\_pos são mais quentes em relação ao CTRL\_pre. Nos meses de transição MAM (Figura 44 b) o perfil é bastante parecido com JJA, embora com anomalias aparentemente mais suavizadas.

Para o período JJA (Figura 44 c), as anomalias ainda são positivas em praticamente toda a seção vertical integrada no período JJA, entretanto menos intensas que em DJF.

O hemisfério norte continua apresentando as maiores anomalias, inclusive próximo à superfície. Nos altos níveis as anomalias são menos intensas, porém ainda presentes e ambos os hemisférios apresentam anomalias negativas nas regiões acima de 200 hPa nas altas latitudes. Em SON, também período de transição, as regiões

atmosféricas de maiores anomalias negativas, no hemisfério sul, estão posicionadas no mesmo local em que aparecem em DJF.

O mesmo ocorre para as anomalias mais positivas próximo ao solo no hemisfério norte. A região abaixo de 850 hPa no hemisfério norte apresenta maior anomalia positiva de temperatura ao longo de todos os períodos, com menor intensidade em JJA, indicando que a região, por possuir maior parte de solo e não de oceano está exposta a maior diferença de temperatura em relação ao CTRL\_pre.

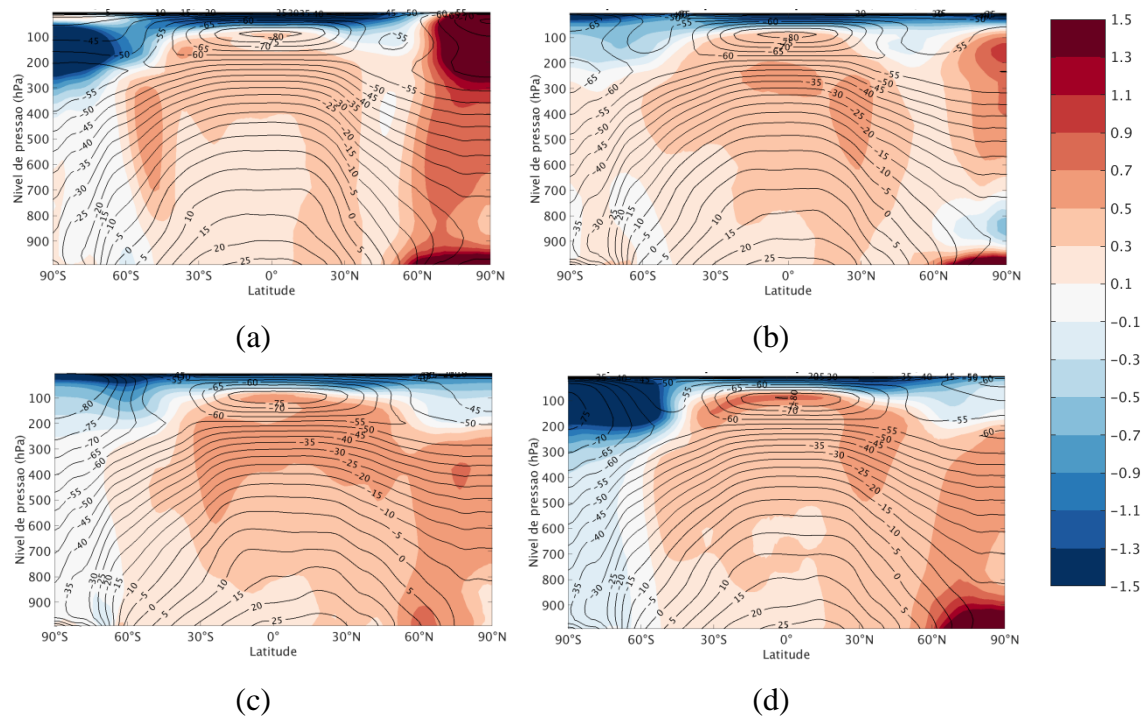


Figura 44 – Médias verticais globais zonais de anomalia de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Em (a) DJF, em (b) MAM, em (c) JJA e em (d) SON. A diferença (CTRL\_pos – CTRL\_pre) de temperatura é representada pelas cores.

A retirada de energia do sistema no período do experimento GSM indica uma queda de temperatura em praticamente toda a atmosfera em todos os períodos analisados (Figura 45).

Existem algumas exceções (anomalias positivas) na coluna vertical em aproximadamente  $50^{\circ}\text{N}$  e em altitude na região tropical de DJF (Figura 45 a), acima de 200 hPa em altas latitudes do hemisfério sul em JJA (Figura 45 c) e na mesma região em SON (Figura 45 d).

As maiores anomalias negativas aparecem em altitude (acima de 300 hPa) e nas altas latitudes do hemisfério norte. A retirada de energia do sistema climático

causou queda da temperatura média em toda a atmosfera em relação ao experimento onde somente o CO<sub>2</sub> foi aumentado, ou seja, CTRL\_pos.

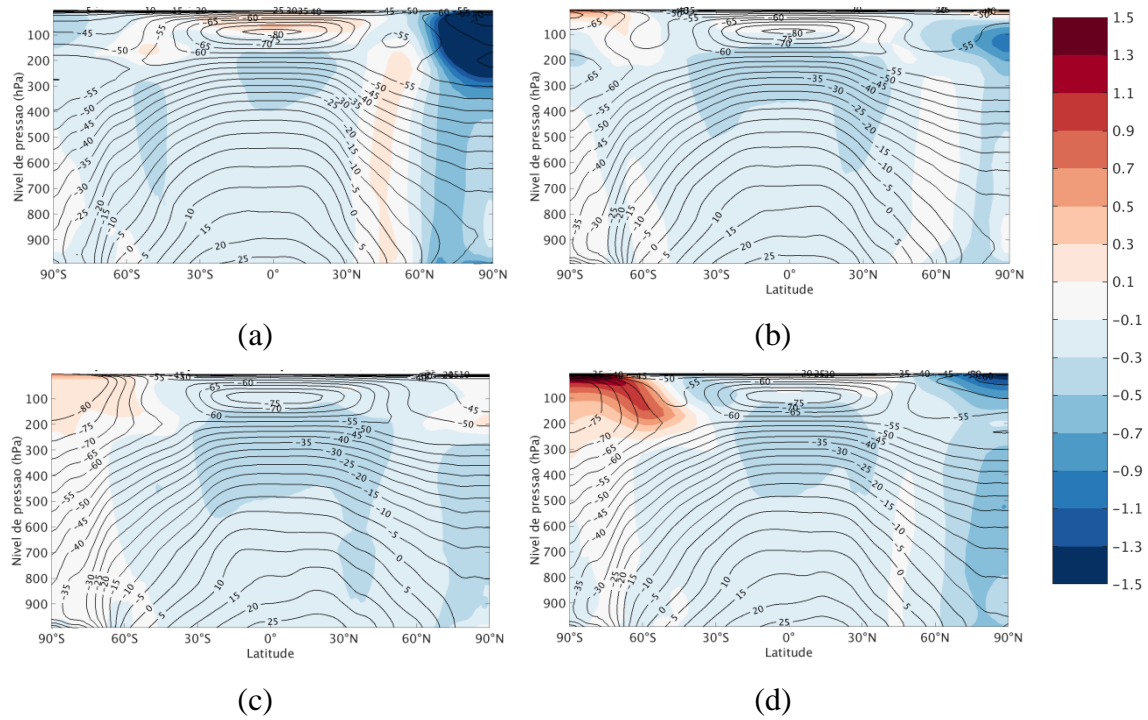


Figura 45 - Médias verticais globais zonais de anomalia de temperatura (°C). Em (a) DJF, em (b) MAM, em (c) JJA e em (d) SON. A diferença (GSM – CTRL\_pos) de temperatura é representada pelas cores.

#### **5.4.2. Distribuição espacial dos campos de temperatura a 2 m de altura**

Um aumento de temperatura global é registrado no período entre 1950 e 2000 (CTRL\_pos) quando em comparação com o período de 1850 a 1950 (CTRL\_pre) (Figura 46). Em regiões de altas latitudes do hemisfério norte este aumento é mais intenso, como também mostrado nas médias zonais (item 5.4) causando maiores impactos no clima local.

Outra região com impacto direto do aumento de temperatura é o Brasil central, com forte anomalia positiva de temperatura ao longo de todas as décadas avaliadas, possivelmente devido a expansão da área da ASAS, adentrando o continente, como mostrado anteriormente.

Poucos locais apresentam queda na temperatura, tais como Pacífico Sul, e mais pontuais na Eurásia em algumas décadas. Entretanto, este sinal de diminuição na temperatura é filtrado nas médias mais prolongadas de 30 (Figura 46 g) e 50 anos (Figura 46 f).

MENDES et al. (2010) encontraram anomalias negativas de temperatura no sul do hemisfério sul, na região da Patagônia. Neste trabalho a anomalia negativa também foi encontrada, entretanto mais deslocada para sudoeste em todos os períodos avaliados (Figura 46).

Em geral, as regiões que apresentaram anomalias positivas de temperatura (Figura 46) também apresentam anomalias positivas de PNMM (Figura 36), pois o aumento da PNMM tem como consequência a subsidência de ar, aumentando a estabilidade termodinâmica e impedindo a formação de nebulosidade.

Chama à atenção a anomalia positiva de temperatura na região central do Brasil, que se mantém em todos os períodos avaliados, e que é tratada em um item específico deste trabalho (item 5.8).

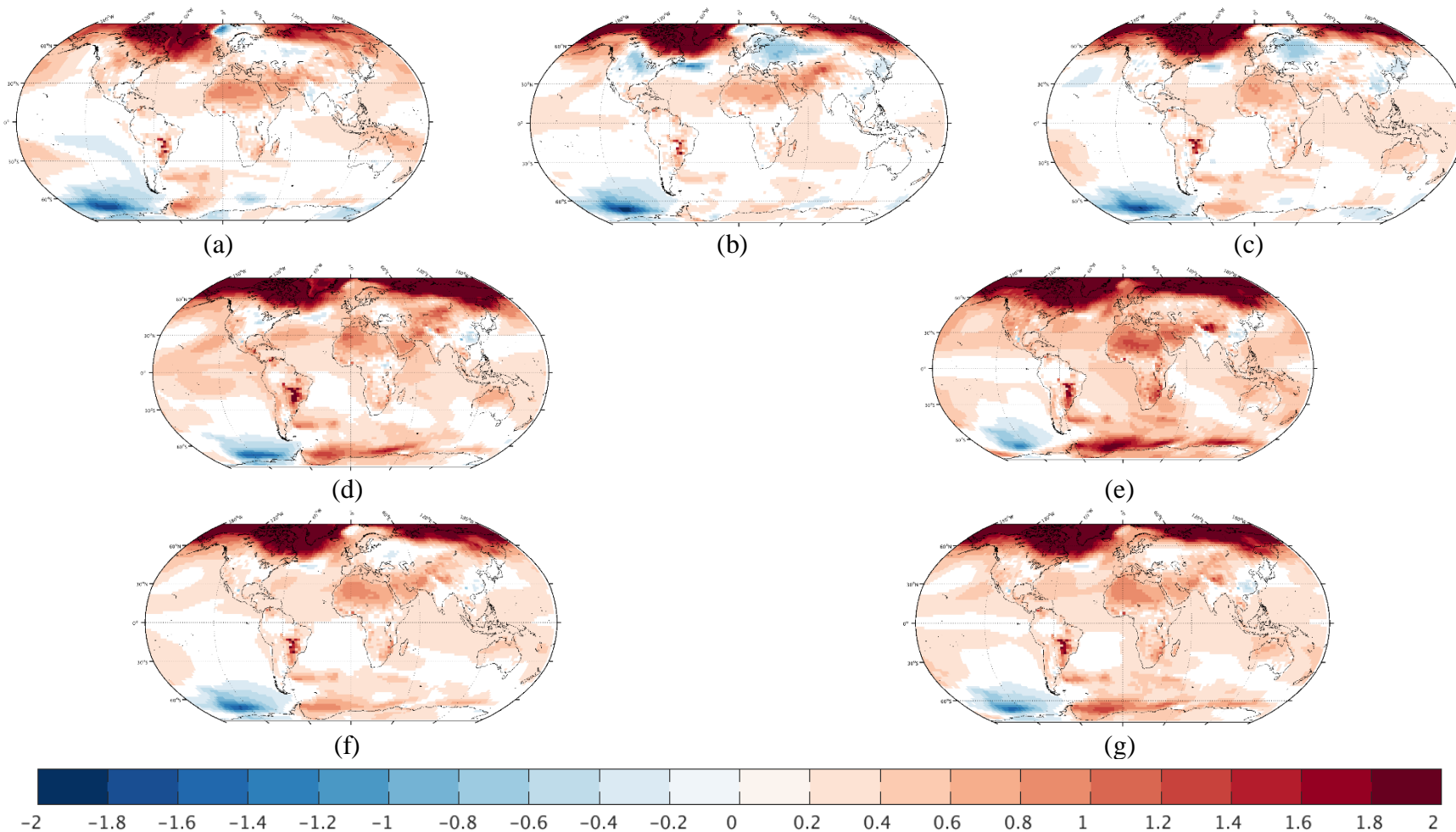


Figura 46– Campo de diferença temperatura do ar a 2 m de altura (°C) entre CTRL\_pos e CTRL\_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

Os resultados dos campos de anomalia de temperatura entre os experimento GSM e CTRL\_pre indicam que o experimento GSM (Figura 47), com menos energia sendo disponibilizada para o sistema climático, teve a tendência de desacelerar o aumento de temperatura global causado pelo rápido aumento de CO<sub>2</sub> nas últimas décadas, como visto na Figura 46.

O experimento GSM (Figura 47) também apresenta feições médias em relação a CTRL\_pre similares ao experimento CTRL\_pos em relação a CTRL\_pre. Na última década de rodada (Figura 47 e), no entanto, surge uma anomalia negativa de temperatura no centro-oeste do Atlantico Sul. Esta anomalia, no entanto, não é vista nos períodos mais prolongados de 50 (Figura 47 f) e 30 (Figura 47 g) anos.

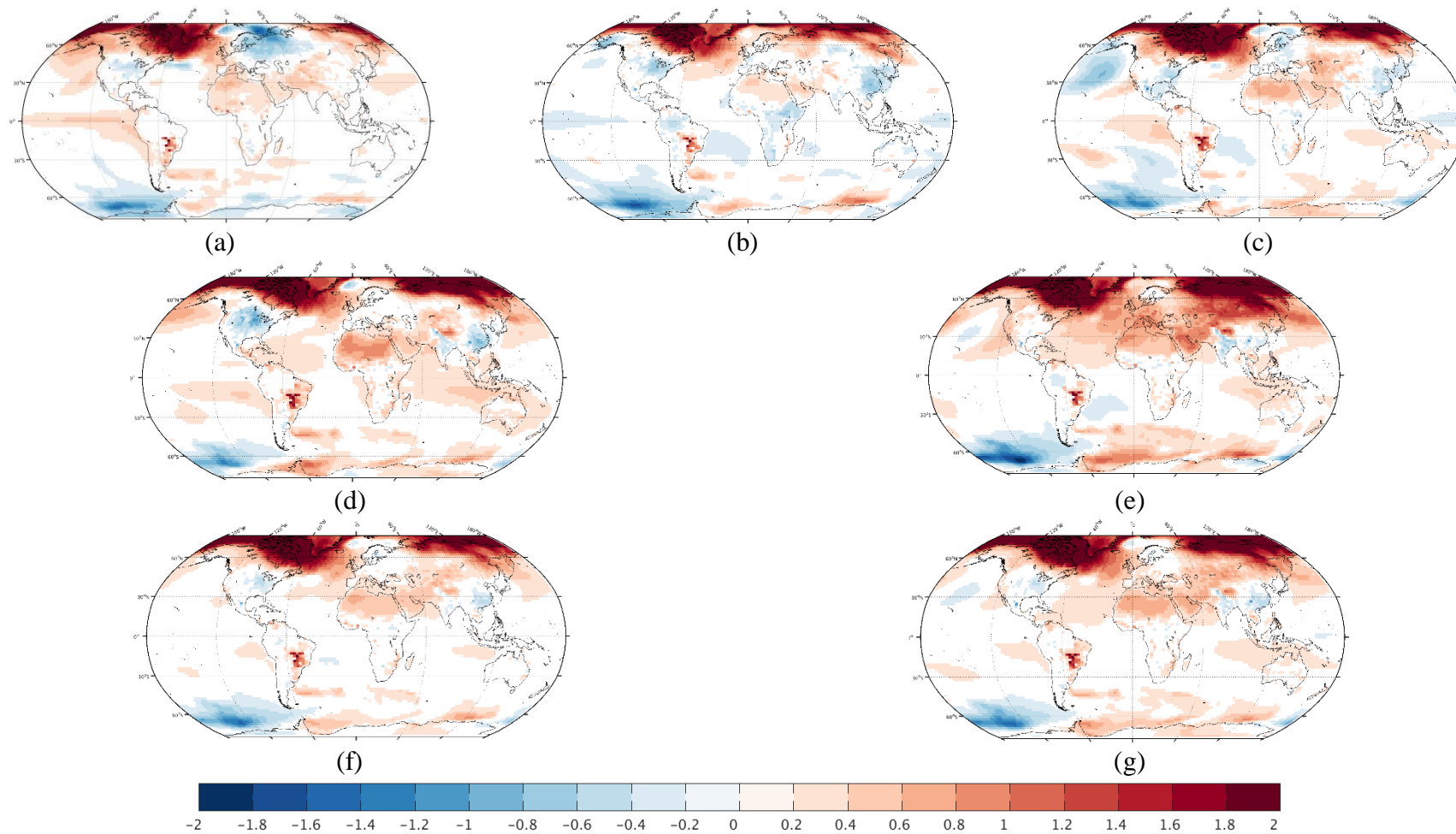


Figura 47– Campo de diferença temperatura do ar a 2 m de altura (°C) entre GSM e CTRL\_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

A diminuição da TSI causa um efeito de diminuição da temperatura global no experimento GSM quando calculada a anomalia GSM – CTRL\_pos (Figura 48). Existem algumas exceções regionais com anomalia positiva, como a parte central do Atlântico Norte (Figura 48 b, c, d), área próxima à península Antártica (Figura 48 c, d), centro da Rússia (Figura 48 b, c, e).

Apesar da existência destas anomalias positivas, algumas destas regiões apresentam em algum momento também anomalia negativa. Ao longo do tempo há uma variação de temperatura em diversas regiões. Apesar de as médias entre 1951 e 2000 (Figura 48 f) e 1971 e 2000 (Figura 48 g) indicarem pouca variação de temperatura nesta área, a oscilação já mostrada pode ter impactos sócio-ambientais e econômicos mais sérios.

A diminuição global de temperatura também foi encontrada por FEULNER e RAHMSTORF (2010) e MEEHL et al. (2013), além de ser discutida por EDDY (1976), que afirmou que a diminuição de temperatura na época do Mínimo de Maunder podem ter causado mais impactos regionais do que globais.

Na região sul do Brasil a anomalia de temperatura é negativa, principalmente na última década de integração do modelo (Figura 48 e) e que também está presente nas médias de tempo mais prolongadas (Figura 48 f, g). Vale ressaltar que a anomalia calculada é entre GSM e CTRL\_pos, portanto, as anomalias negativas indicam temperatura do experimento GSM mais baixa do que CTRL\_pos, mas ainda sim são temperaturas maiores do que CTRL\_pre.

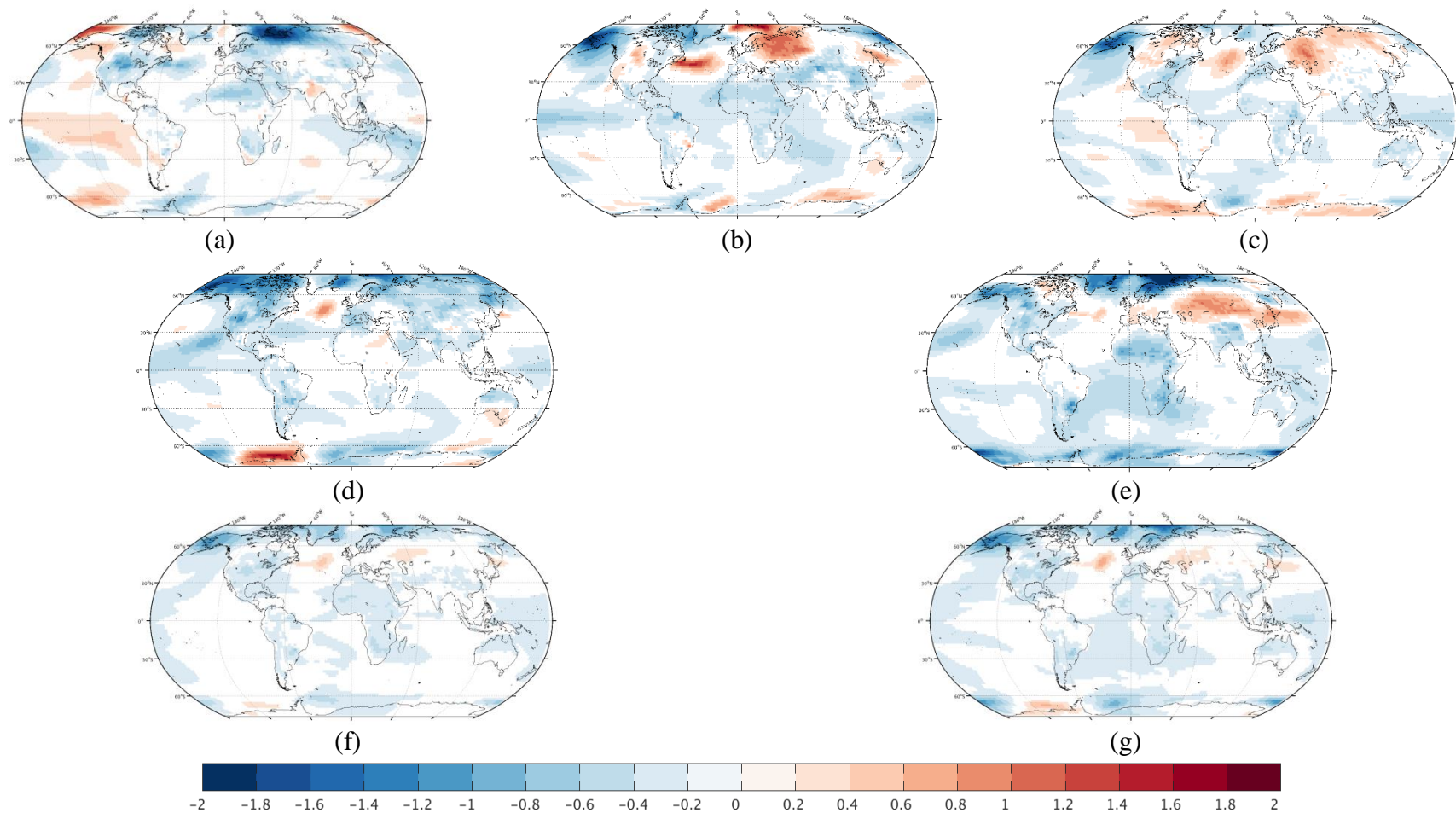


Figura 48– Campo de diferença temperatura do ar a 2 m de altura (°C) entre GSM e CTRL\_pos. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

Além da avaliação dos campos de anomalias mostrados anteriormente, as temperaturas médias globais, integradas em latitude e longitude, dos últimos trinta anos do CTRL\_pos e GSM foram comparadas com o experimento CTRL\_pre. Foi verificado um aumento de temperatura em CTRL\_pos de  $0,73^{\circ}\text{C}$  e em GSM de  $0,48^{\circ}\text{C}$  em relação à CTRL\_pre.

Em termos percentuais os valores correspondem a um incremento de 13,8% e 9,4%, respectivamente, na temperatura média global em relação a CTRL\_pre.

A variação de  $0,73^{\circ}\text{C}$  entre CTRL\_pos e CTRL\_pre é compatível com o valor de  $0,9^{\circ}\text{C}$  encontrado por HUANG et al. (2004) ao analisar o mesmo período de tempo de 30 anos da série de dados de *proxy* da América do Norte entre os anos de 1500 e 1980.

Pode-se inferir, então, que a diferença de temperatura entre CTRL\_pos e GSM, de aproximadamente  $0,25^{\circ}\text{C}$ , ocorre devido à diferença na forçante solar. Apesar de a diferença ser aparentemente pequena, os impactos regionais são muito mais intensos como visto nos campos resultantes apresentados.

## 5.5. Vento

### 5.5.1. Perfil vertical do vento

As diferenças entre as médias verticais globais zonais de temperatura e vento entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre são mostradas na Figura 49.

Devido a intensificação do gradiente meridional de temperatura, os jatos em ambos os hemisférios se fortalecem no experimento CTRL\_pos quando comparado com CTRL\_pre, tanto na análise anual (Figura 49 f) quanto sazonal (Figura 49 g, h, i, j).

Em ambos os hemisférios ocorre o deslocamento dos jatos (em 200 hPa) em direção aos polos, sendo mais intenso e mais deslocado no hemisfério sul.

A intensificação do jato ocorre devido ao maior gradiente de temperatura, causando aumento da baroclinia em altos níveis da troposfera. Isto causado pela inclusão de energia no sistema devido ao aumento do CO<sub>2</sub>, cuja concentração é maior no período posterior a 1950, que corresponde ao experimento CTRL\_pos.

O deslocamento também foi verificado por RIVIERE (2011) ao avaliar cenários futuros de aquecimento global devido ao aumento de gases de efeito estufa. Nos períodos de SON (Figura 49 j) e DJF (Figura 49 f), os jatos são mais intensos nos dois hemisférios.

De maneira geral, os níveis mais altos da atmosfera apresentam uma diminuição de temperatura (Figura 49 a, b, c, d, e). Entretanto, nos demais níveis e principalmente no hemisfério norte, a diferença de temperatura chega a mais de 1,5°C na média zonal global.

Este aumento de temperatura também é registrado nas latitudes entre 60°N e 90°N, com exceção no período de verão do hemisfério norte (JJA). Os resultados indicam que o aumento de CO<sub>2</sub> ocorrido no período posterior a 1950 causa alterações no balanço energético do sistema climático, produzindo alterações significativas nos gradientes de temperatura e na circulação atmosférica.

O deslocamento dos jatos no sentido dos polos nas últimas décadas, de maneira mais evidente no Hemisfério sul, também foi registrado por FELDSTEIN (2002), MARSHALL (2003), TRENBERTH et al. (2007), o que fundamenta os resultados aqui encontrados para a diferença entre os períodos CTRL\_pos e CTRL\_pre.

Um pequeno deslocamento e intensificação dos jatos, tanto polar quanto de latitudes médias tem importantes consequências climáticas, pois estes sistemas (de latitudes médias) estão relacionados, por exemplo, a tempestades intensas (KIDSTON et al. 2011).

Este efeito de deslocamento também foi atribuído por YIN (2005) ao aumento dos gases de efeito estufa, que foi encontrado em outros modelos de circulação geral da atmosfera utilizado no IPCC-AR4.

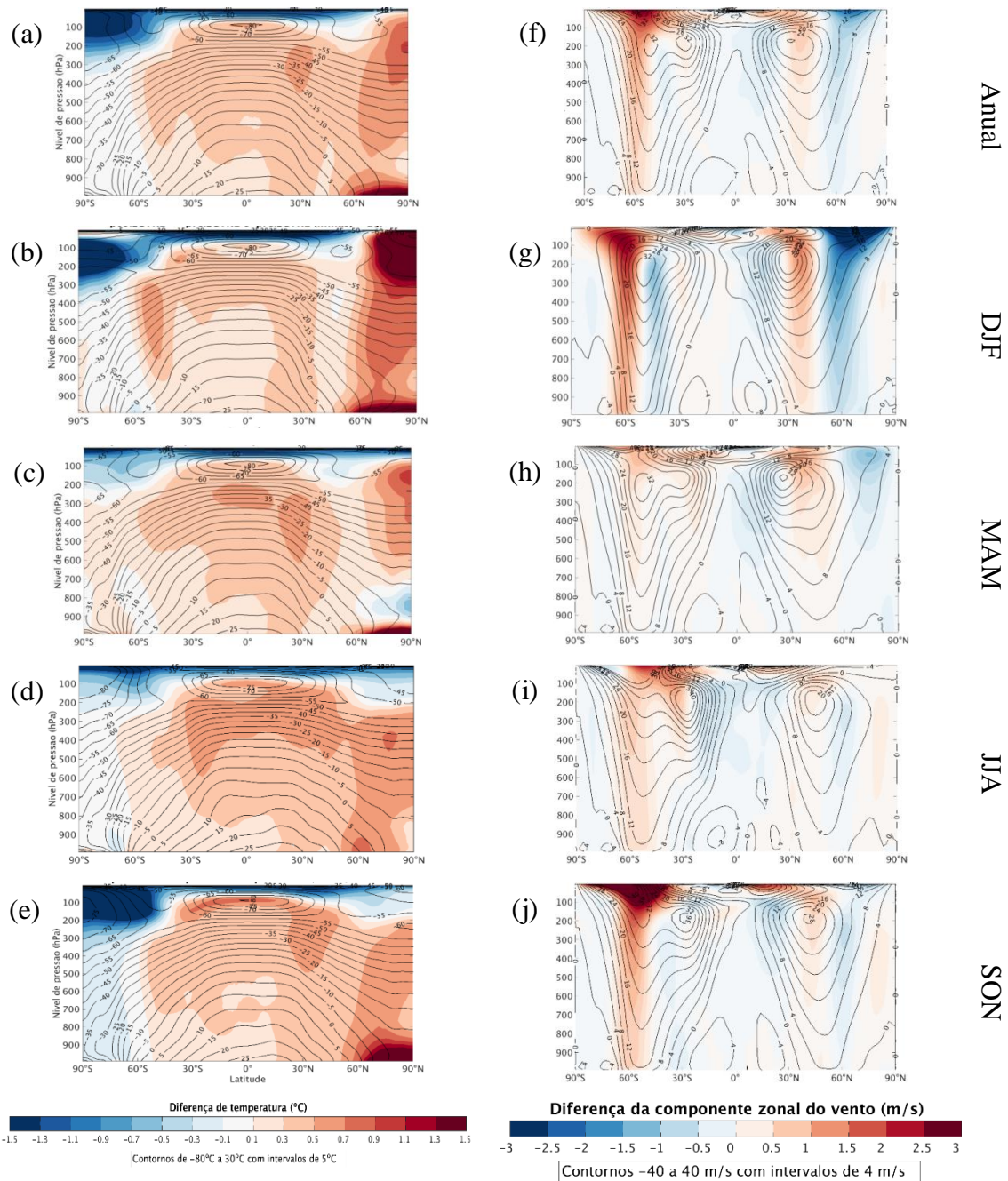


Figura 49 – Médias verticais globais zonais de temperatura e vento. Em (a), temperatura média anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL\_pre. A diferença (CTRL\_pos – CTRL\_pre) de temperatura é representada pelas cores. (b, c, d, e) como em (a), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. Em (f), componente zonal do vento anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL\_pre. A diferença (CTRL\_pos – CTRL\_pre) da componente zonal do vento é representada pelas cores. (g, h, i, j) como em (f), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente.

As diferenças entre as médias verticais globais zonais de temperatura e vento entre os experimentos GSM e CTRL\_pre são mostradas na Figura 50.

O deslocamento dos jatos, principalmente no hemisfério sul, também ocorre no experimento GSM. O aquecimento da atmosfera também acontece, porém, com menor intensidade do que em CTRL\_pos devido à diminuição da energia disponível para o sistema climático em GSM.

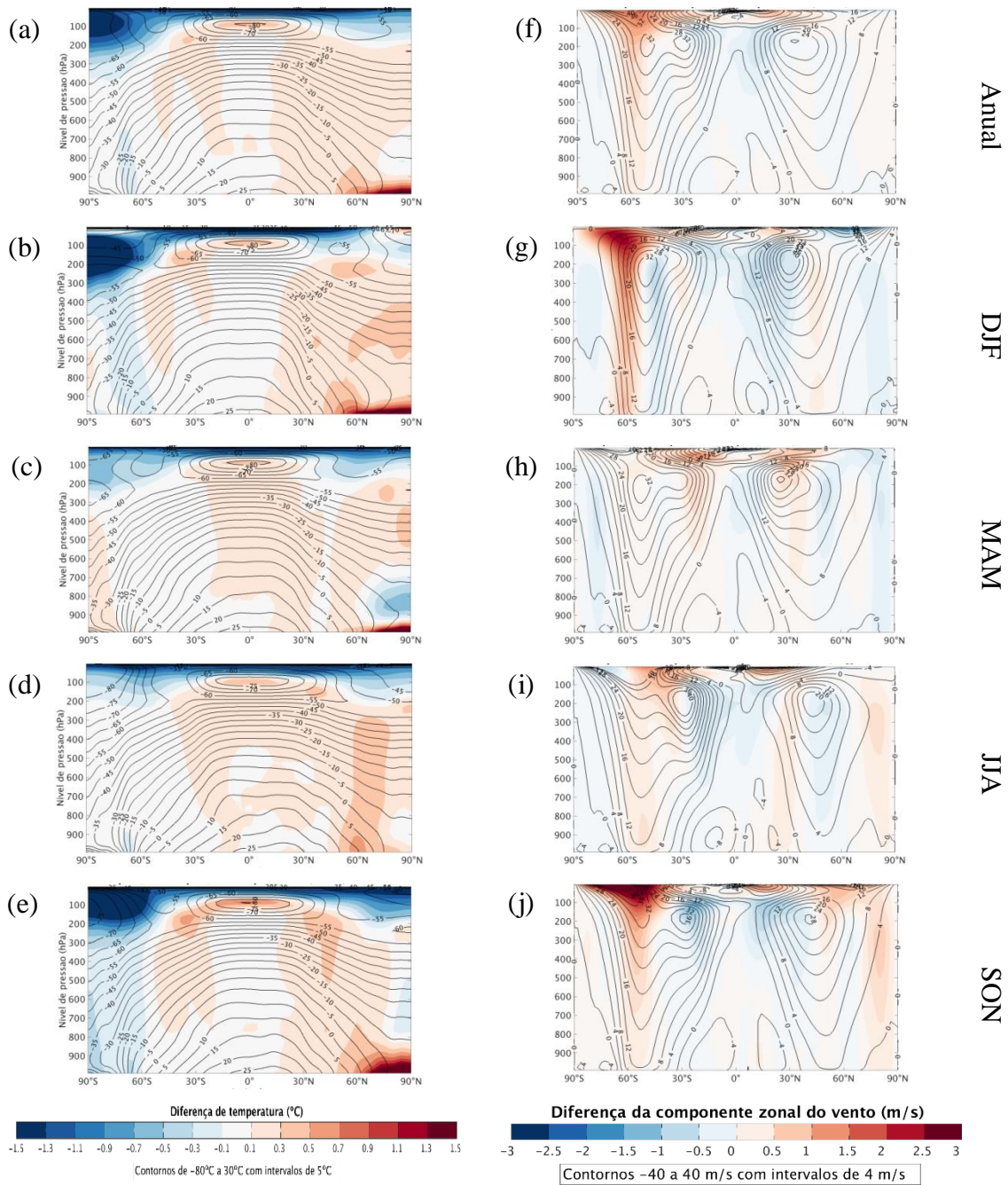


Figura 50 – Médias verticais globais zonais de temperatura e vento. (a) temperatura média anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL\_pre. A diferença (GSM – CTRL\_pre) de temperatura é representada pelas cores. (b-e) como em (a), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. (f) componente zonal do vento ( $u$ ) anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL\_pre. A diferença (GSM – CTRL\_pre) da componente zonal do vento é representada pelas cores. (g-j) como em (f), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente.

O perfil vertical da atmosfera apresenta anomalia negativa de temperatura em praticamente todo o globo no experimento GSM em relação ao CTRL\_pos em praticamente todos os períodos do ano.

As exceções ocorrem em DJF, com um forte sinal de aumento de temperatura em GSM ao longo da coluna vertical desde a superfície até aproximadamente 200 hPa por volta de 60°N.

Este local coincide com a anomalia com forte sinal positivo do vento zonal para o mesmo período. Em torno de 30°N ocorre a diminuição da intensidade do vento. Em SON também ocorre um sinal de aumento de temperatura em nos altos níveis no hemisfério sul, na região das altas latitudes.

De maneira geral, na avaliação do resultado anual, o jato apresenta pequeno deslocamento no sentido dos polos, ainda que desintensificando em aproximadamente 30° de latitude e intensificando em 60°N.

Todo o campo de vento zonal vertical apresenta anomalia negativa, ou seja, o campo de vento médio ao longo de toda a atmosfera indica vento menos intenso em GSM.

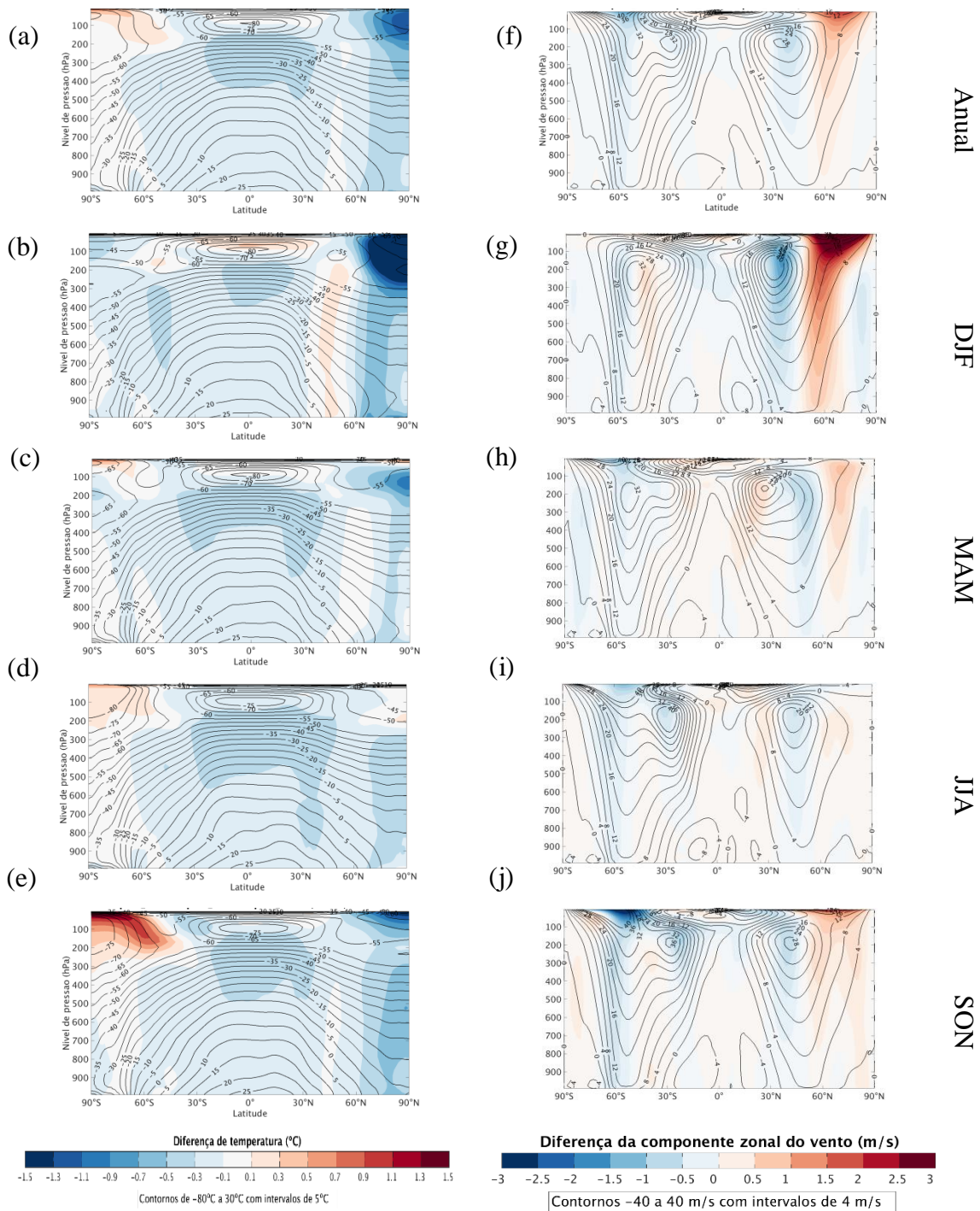


Figura 51 – Médias verticais globais zonais de temperatura e vento. (a) temperatura média anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL\_pos. A diferença (GSM – CTRL\_pos) de temperatura é representada pelas cores. (b, c, d, e) como em (a), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente. (f) componente zonal do vento ( $u$ ) anual com contornos em preto que correspondem ao CTRL\_pos. A diferença (GSM – CTRL\_pos) da componente zonal do vento é representada pelas cores. (g, h, i, j) como em (f), mas para DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente.

### **5.5.2. Distribuição espacial dos campos de anomalia do vento zonal nos níveis de 200, 850 e 1000 hPa.**

Em todos os campos de anomalias calculados entre os experimentos para o nível de 200 hPa na década compreendida entre 1950 e 1960 (Figura 52 a, d, g), o vento zonal apresenta anomalia positiva, ou seja, maior intensidade e sentido de oeste para leste (vento de oeste), em quase todo o globo, com exceção de uma faixa entre o continente africano e o oceano Pacífico.

No nível de 850 hPa (Figura 52 b, e, h), as anomalias positivas se restringem mais às latitudes médias e altas, enquanto que nas baixas latitudes a anomalia é negativa, ou seja, há desintensificação do vento neste nível. Este cenário se repete no nível de 1000 hPa (Figura 52 c, f, i). De acordo com YEH et al. (2009), o enfraquecimento dos ventos alísios é compatível com cenário de aumento de temperatura, como é o caso do CTRL\_pos em relação ao CTRL\_pre.

Os mesmos padrões são encontrados para as décadas seguintes (Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56), além dos períodos prolongados de 50 (Figura 58) e 30 (Figura 57) anos.

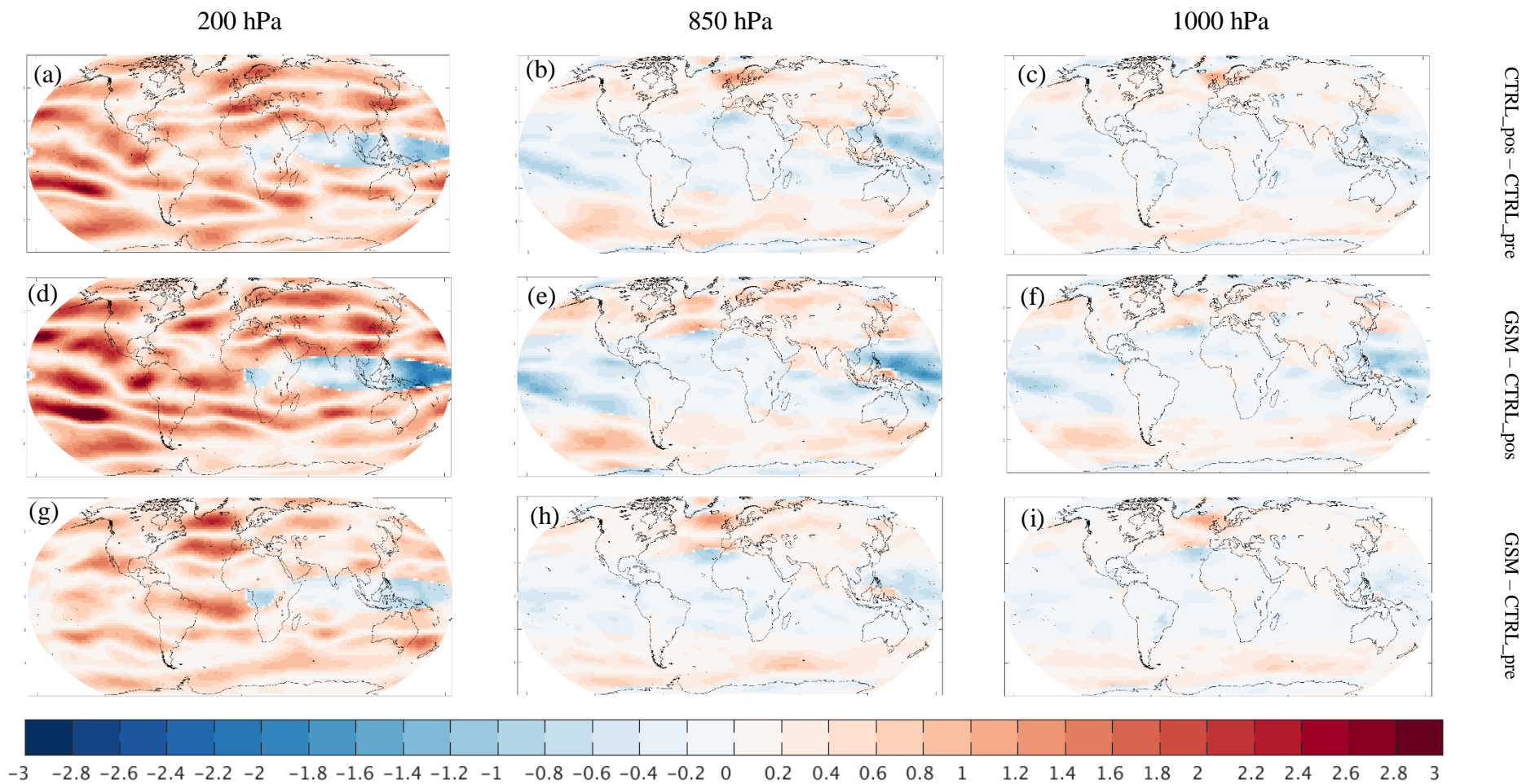


Figura 52 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1950 e 1960. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

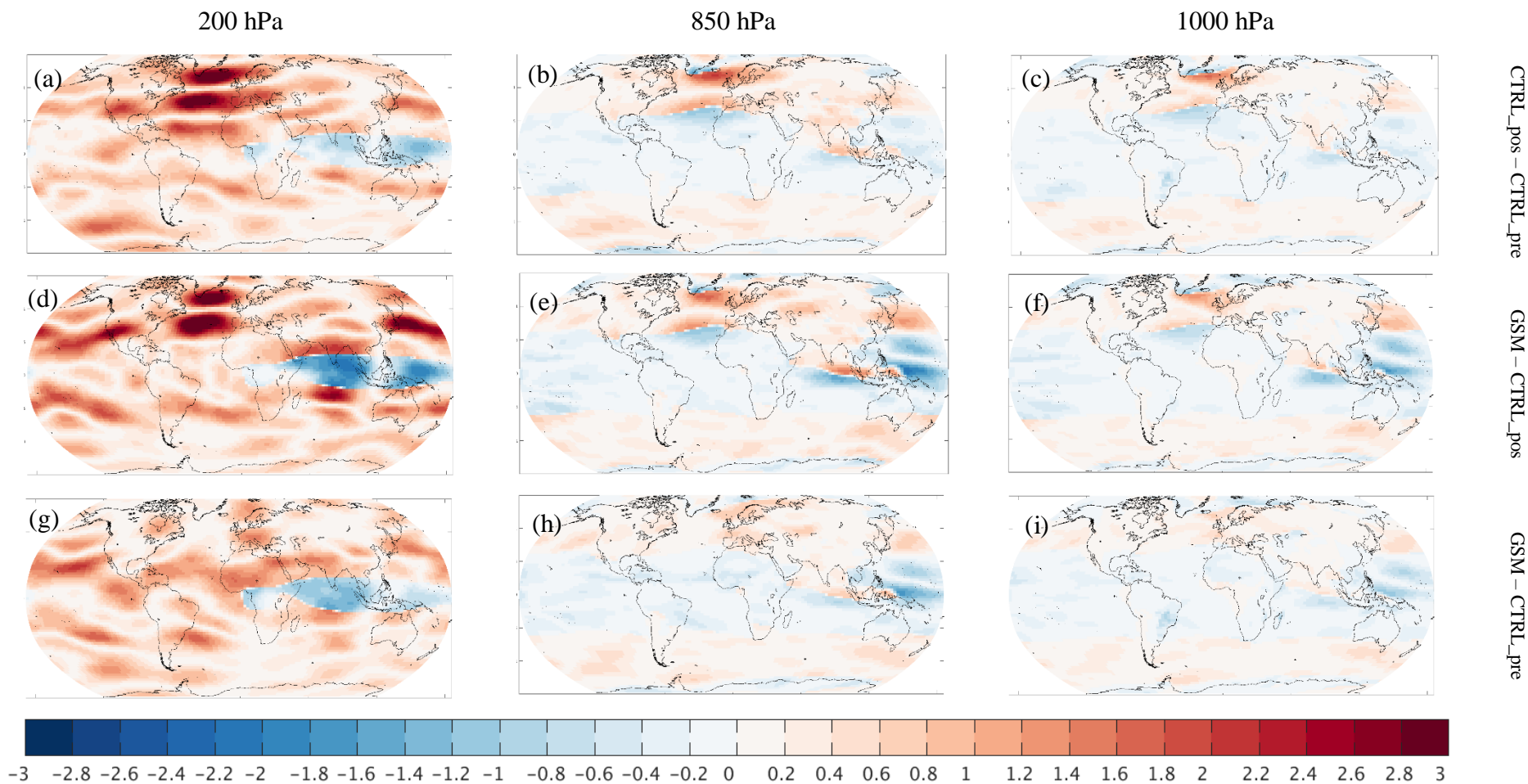


Figura 53 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1960 e 1970. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

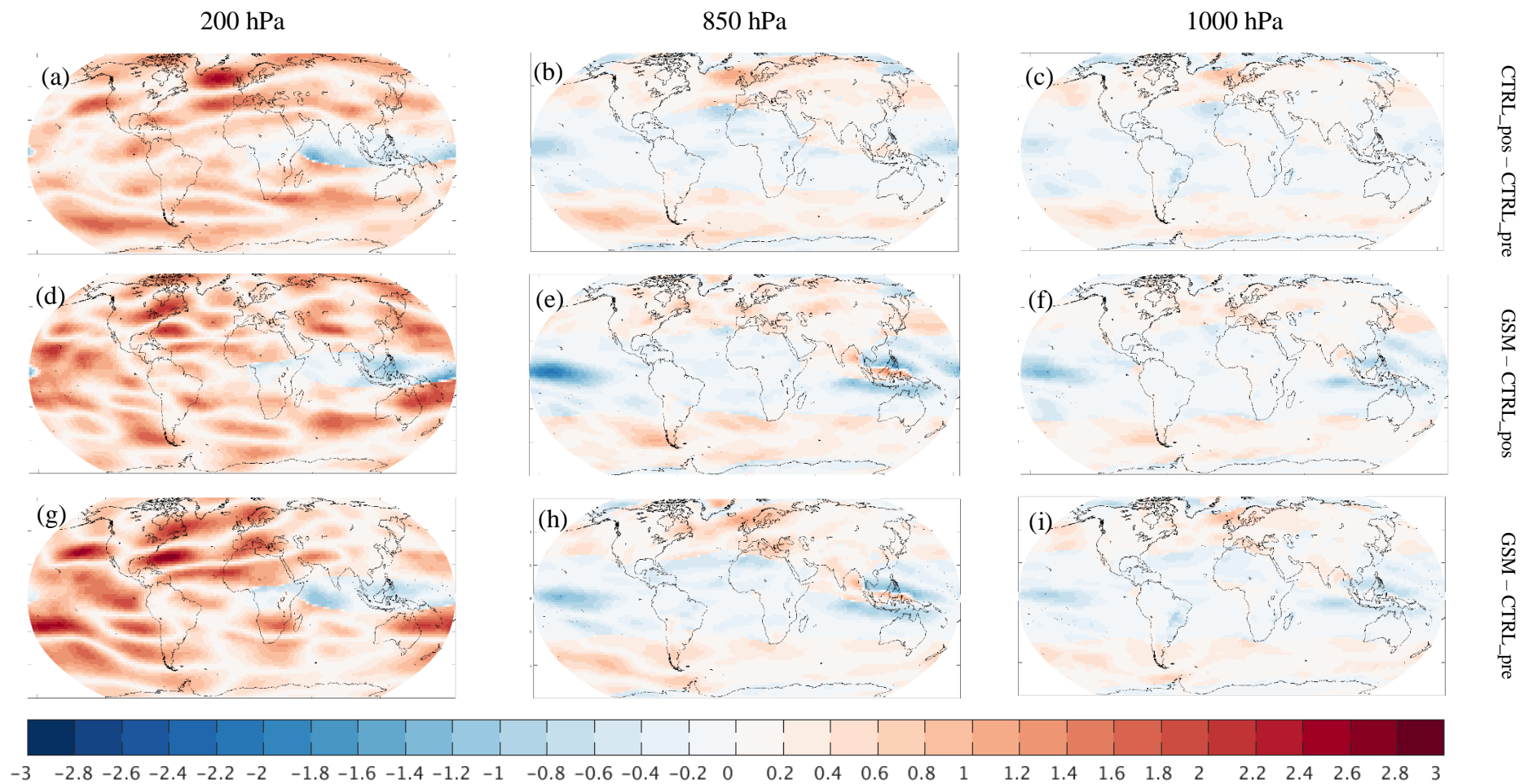


Figura 54 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1970 e 1980. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

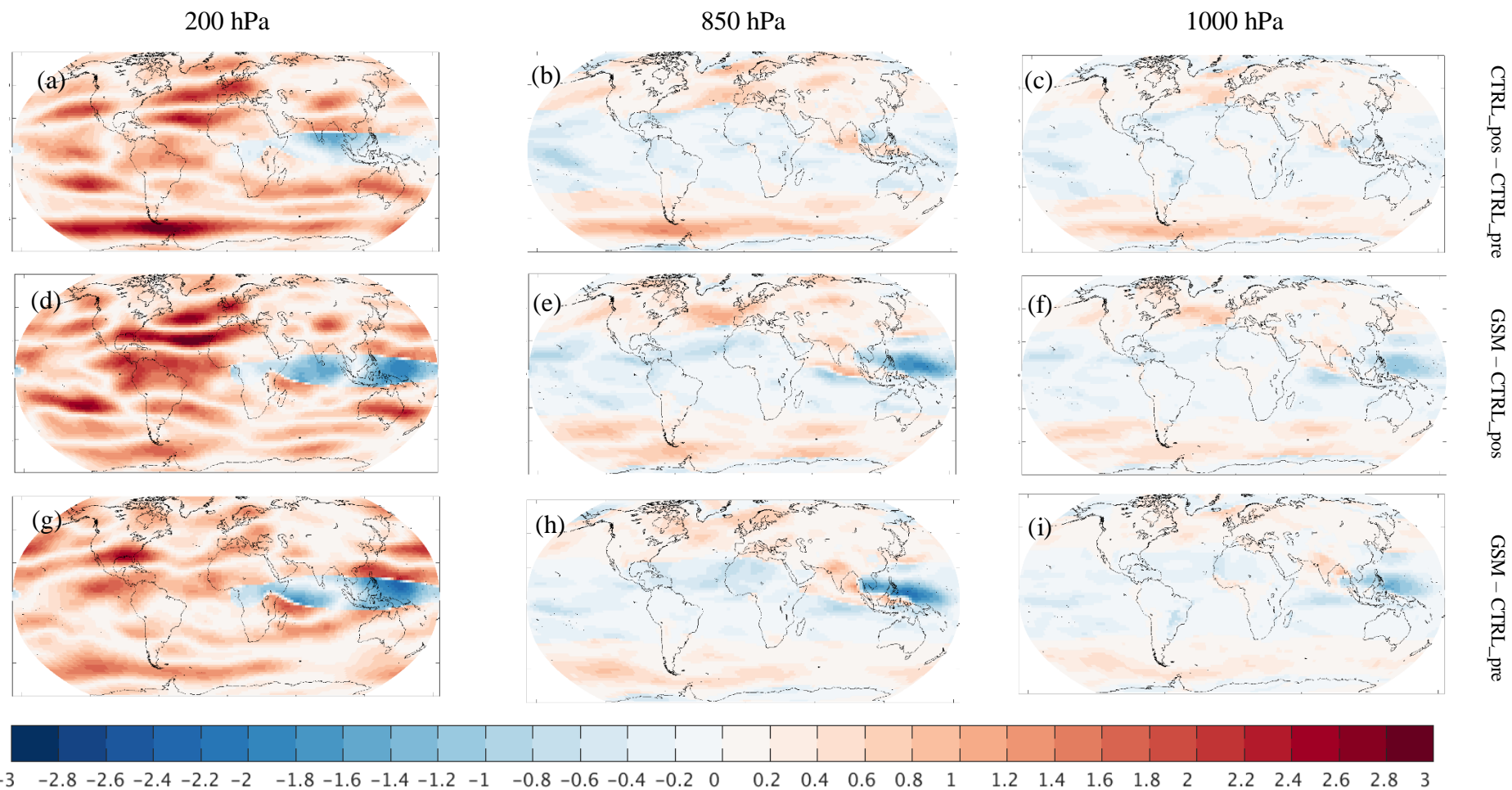


Figura 55 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1980 e 1990. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

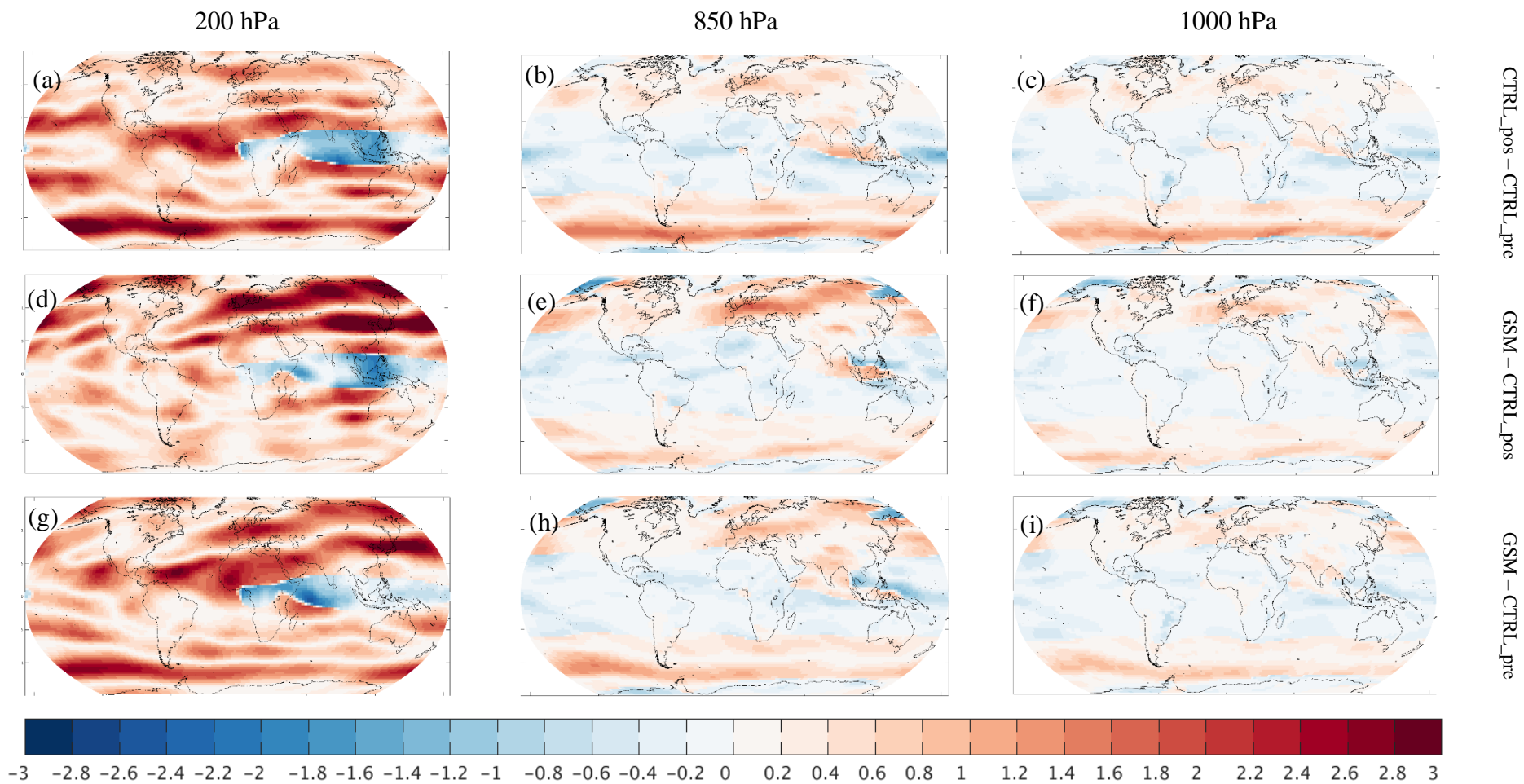


Figura 56 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde à década entre 1990 e 2000. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

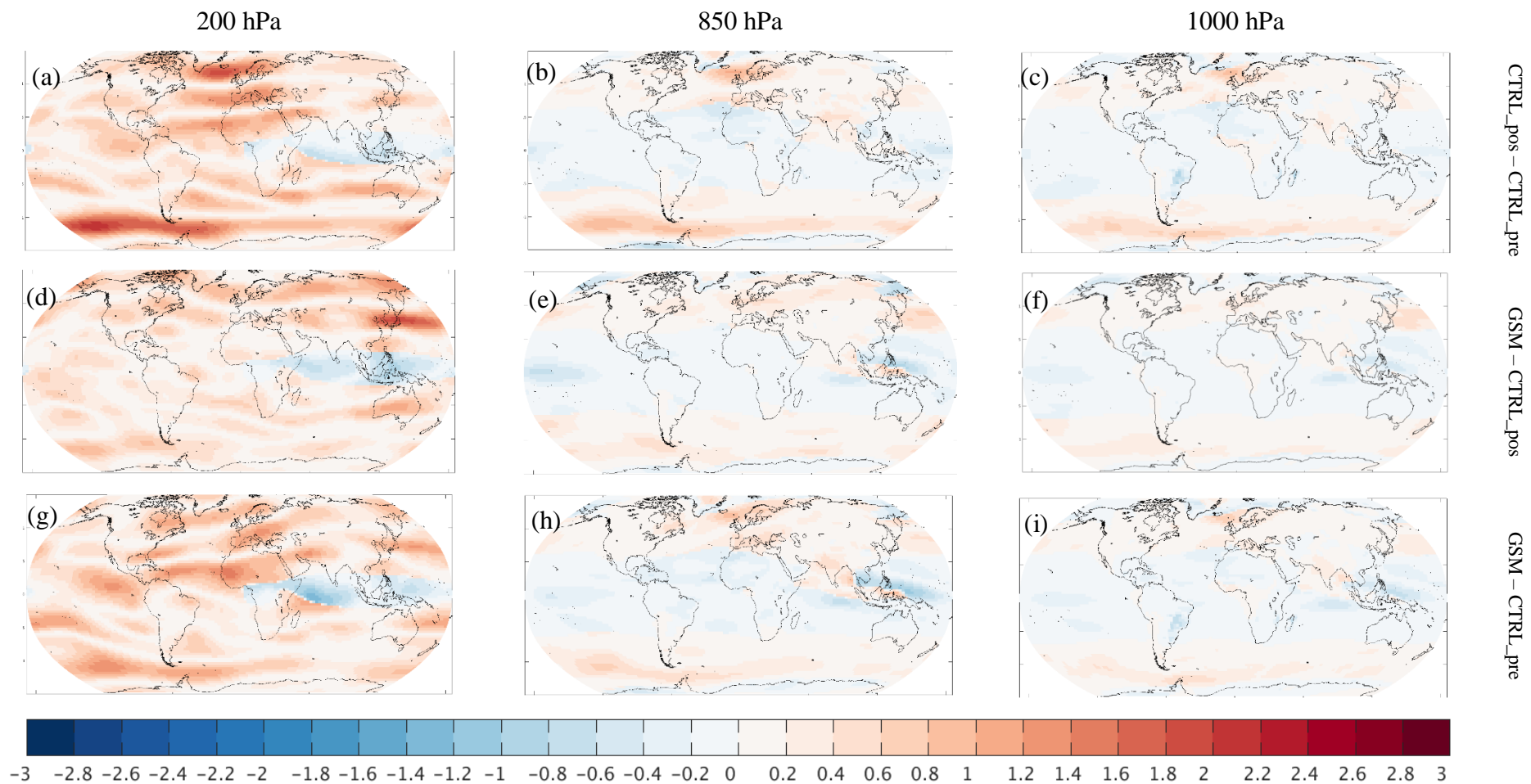


Figura 57 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde ao período entre 1950 e 2000. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

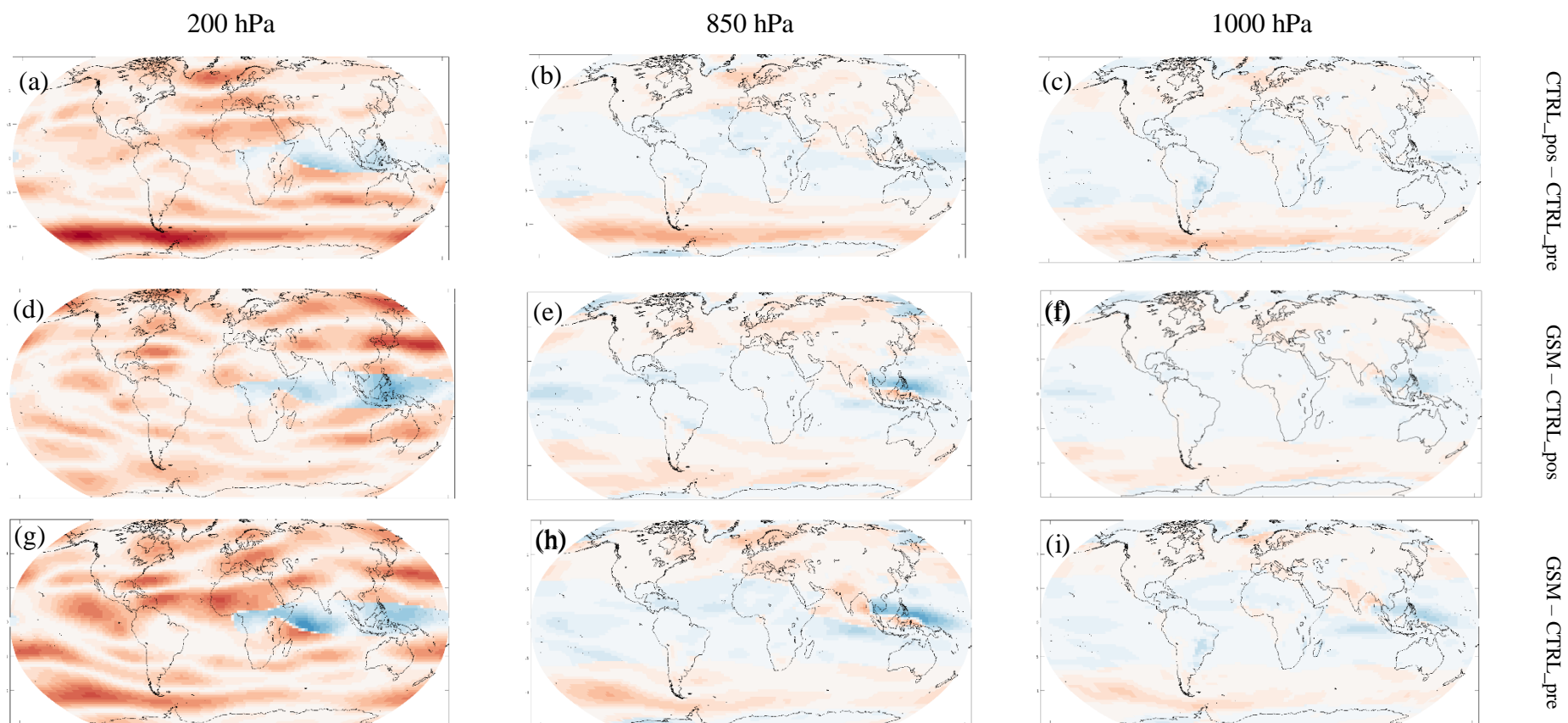


Figura 58 – Campos globais de anomalia da componente zonal do vento (m/s). O período avaliado corresponde ao período entre 1970 e 2000. Os painéis à esquerda correspondem ao nível de pressão 200 hPa, os painéis centrais correspondem ao nível de 850 hPa e os painéis à direita correspondem ao de 1000 hPa. As figuras (a), (b) e (c) correspondem anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre; (d), (e) e (f) à anomalia GSM – CTRL\_pos; (g), (h) e (i) à anomalia GSM – CTRL\_pre.

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no sistema climático foi suficiente para alterar a dinâmica atmosférica, intensificando a componente zonal do vento em 200 hPa. Além disso, nas outras camadas da atmosfera os efeitos dinâmicos também ficaram evidentes, causando alterações no escoamento atmosférico. No experimento GSM, com a diminuição da energia disponível para o sistema climático as alterações dinâmicas também ficaram evidentes.

### **5.6. Campo de anomalia de movimento vertical (ômega)**

As anomalias do movimento vertical indicam um aumento do movimento descendente (valores positivos) na região do Atlântico sul e Pacífico leste em CTRL\_pos em relação a CTRL\_pre. Este aumento do movimento descendente pode levar a um aumento da ocorrência de bloqueios atmosféricos que impedem ou retardam o avanço de sistemas frontais sobre a América do Sul, possivelmente devido a intensificação da ASAS, como mostrado anteriormente.

Esta região também apresentou anomalia positiva de pressão atmosférica, como mostrado anteriormente na Figura 36.

Algumas áreas, como a da zona de convergência do Pacífico sul e a região oeste do Pacífico apresentam anomalia negativa de movimento vertical.

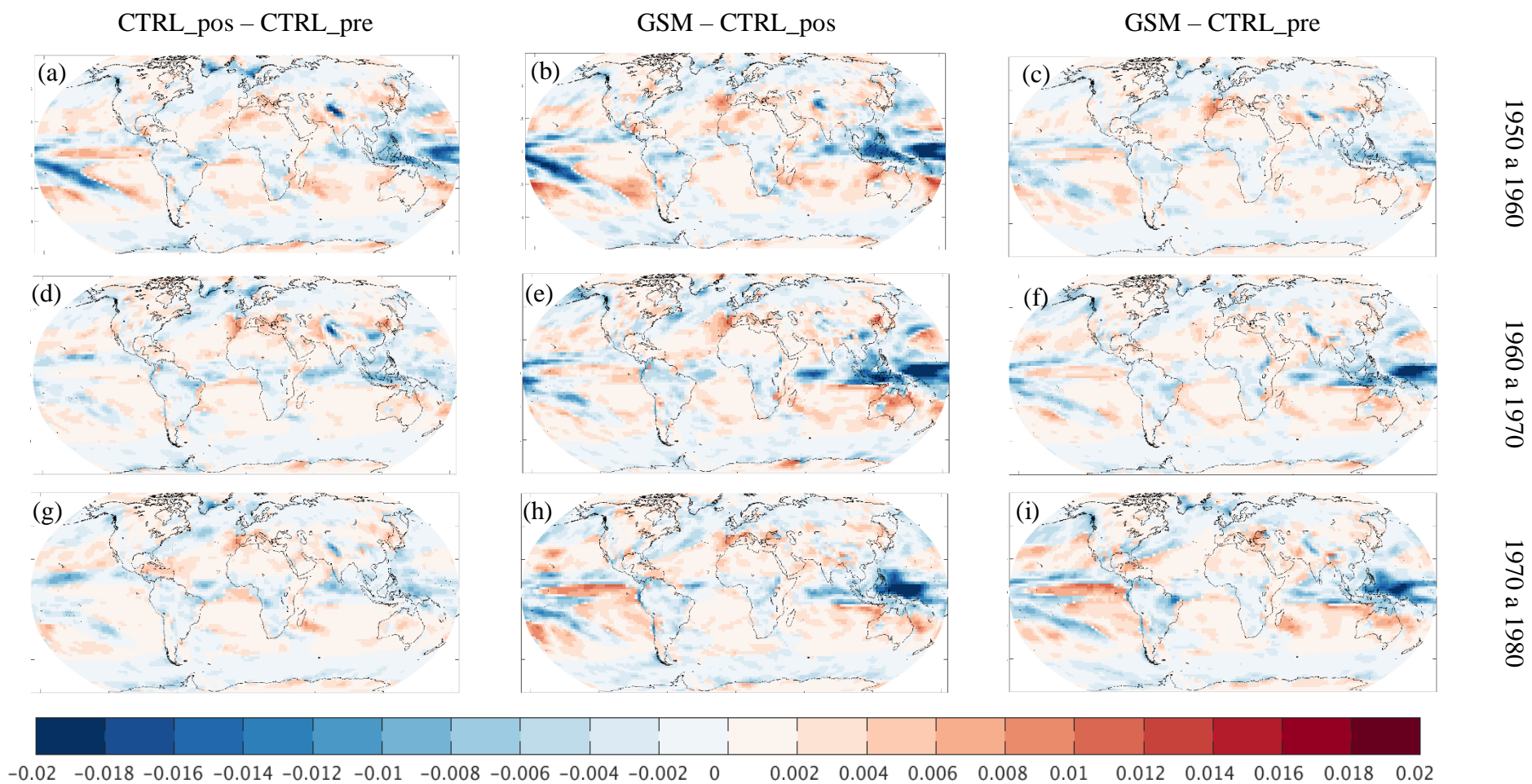


Figura 59 – Campos globais de anomalia de  $\omega$  (Pa/s) no nível de 850 hPa. Os painéis à esquerda correspondem à diferença CTRL\_pos – CTRL\_pre. Os painéis centrais correspondem à GSM – CTRL\_pos e os painéis à direita GSM – CTRL\_pre. As figuras (a), (b) e (c) correspondem à década entre 1950 e 1960. (d), (e) e (f) à década entre 1960 e 1970. (g), (h) e (i) à década entre 1970 e 1980.

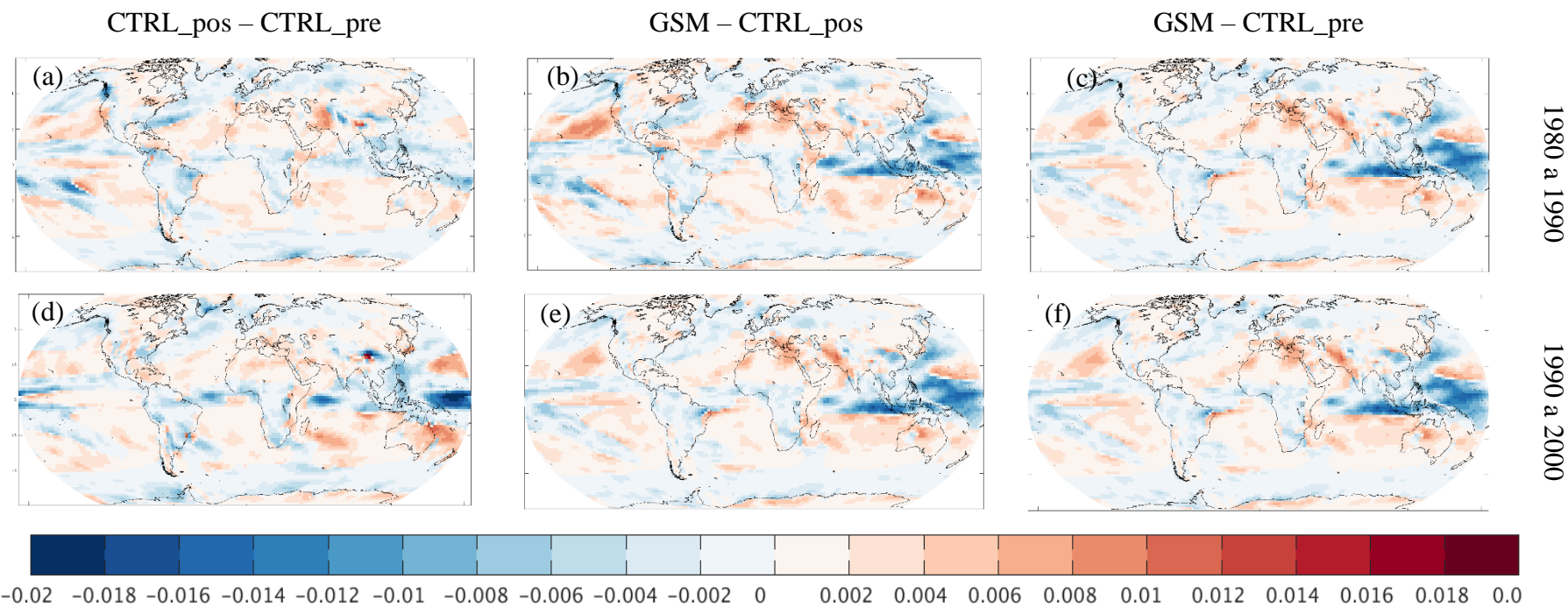


Figura 60 – Campos globais de anomalia de  $\omega$  (Pa/s) 850 hPa. Os painéis à esquerda correspondem à diferença CTRL\_pos – CTRL\_pre. Os painéis centrais correspondem à GSM – CTRL\_pos e os painéis à direita GSM – CTRL\_pre. As figuras (a), (b) e (c) correspondem à década entre 1980 e 1990. (d), (e) e (f) à década entre 1990 e 2000.

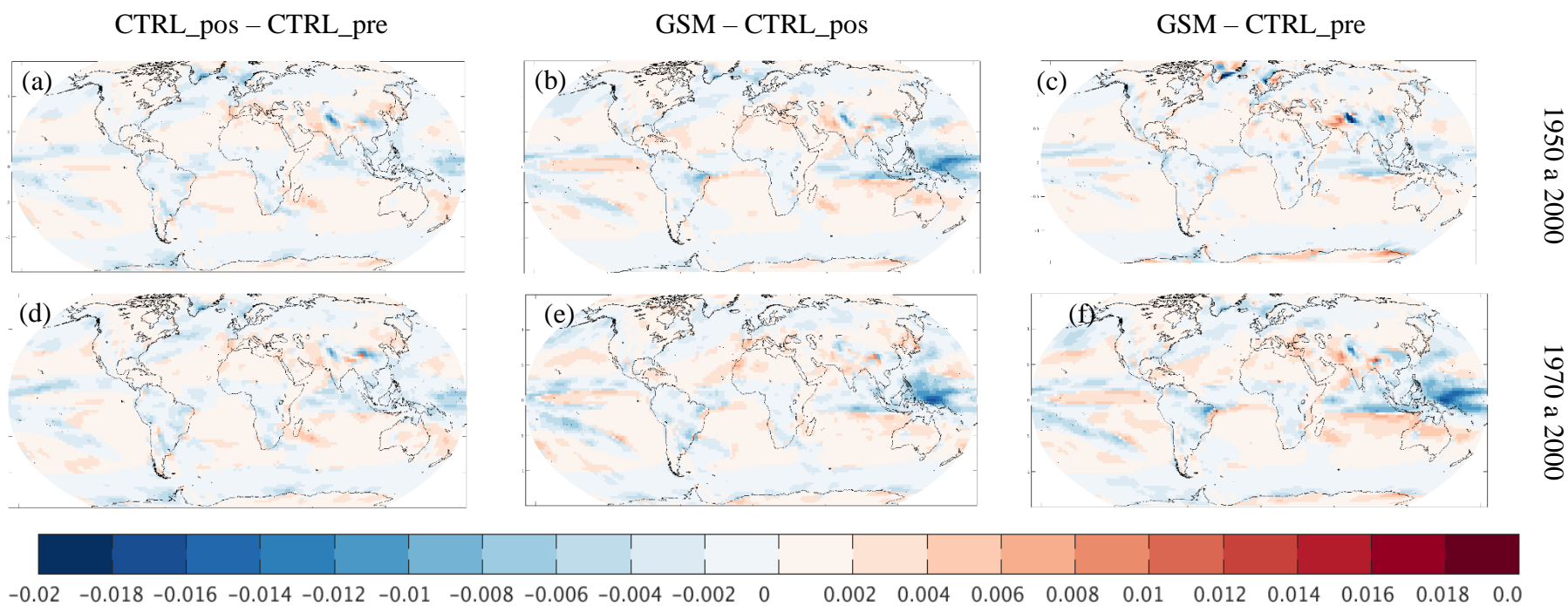


Figura 61 – Campos globais de anomalia de  $\omega$  (Pa/s) 850 hPa. Os painéis à esquerda correspondem à diferença CTRL\_pos – CTRL\_pre. Os painéis centrais correspondem à GSM – CTRL\_pos e os painéis à direita GSM – CTRL\_pre. As figuras (a), (b) e (c) correspondem ao período entre 1950 e 2000. (d), (e) e (f) ao período entre 1970 e 2000.

## 5.7. Precipitação

A série temporal de precipitação (mm/mês) integrada em todo o globo demonstra um pequeno aumento de tendência ao longo dos anos de integração até o ano de 1950 (Figura 62 a).

No período posterior a 1950, ambas as tendências apresentam crescimento ao longo do tempo, no entanto, a tendência de GSM é menor do que CTRL\_pos (Figura 62 b).

A diferença entre os dois experimentos é mostrada na Figura 62 c, chegando a diferenças de até aproximadamente 4 mm/mês.

A linha contínua entre os anos de 1850 e 1950 indica que as diferenças passam a ocorrer após a inserção do período de mínima atividade solar artificial.

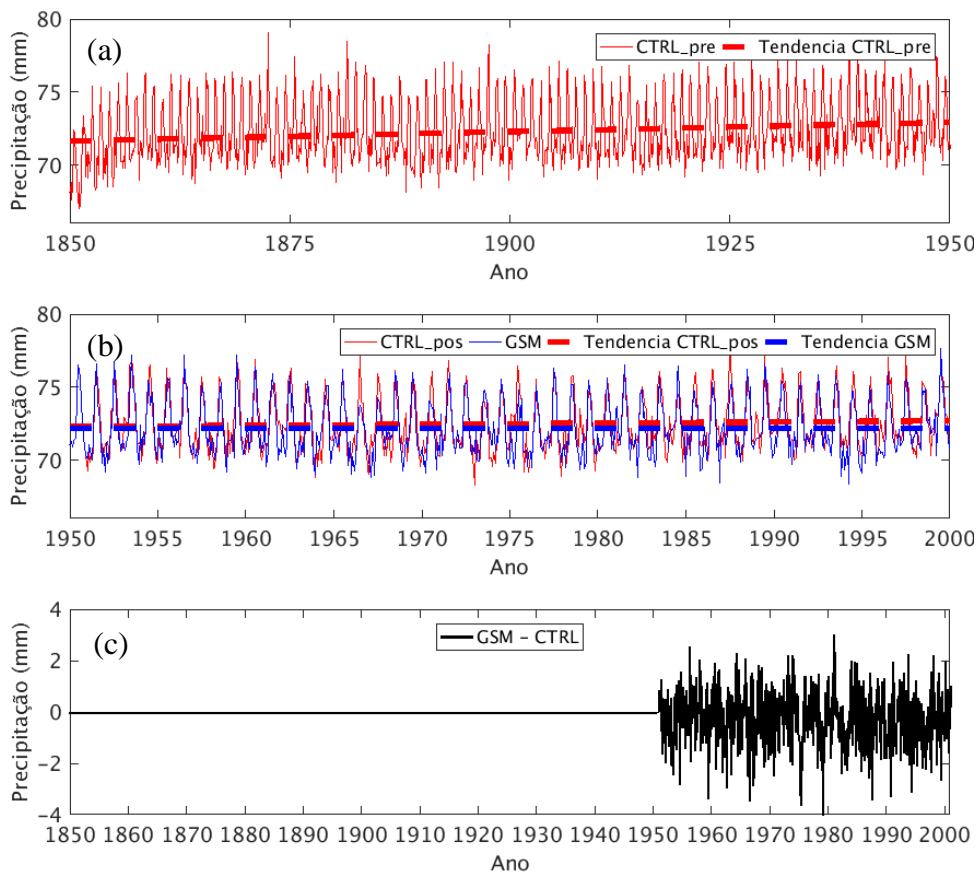


Figura 62 – Séries temporais de precipitação (mm/mês). Em (a) experimento CTRL\_pre e sua tendência. Em (b) CTRL\_pos e GSM e suas respectivas tendências. Em (c) diferença entre GSM e CTRL.

Assim como as demais variáveis meteorológicas já analisadas, a precipitação também em DJF segue o padrão encontrando por PEIXOTO e OORTH (1992) e WALISER e GAUTIER (1993) da média zonal, de maior quantidade de precipitação na região equatorial principalmente devido ao posicionamento médio da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Figura 63 a).

Na região dos cinturões de alta pressão atmosférica por volta de 30°S e 30°N a precipitação diminui, voltando a aumentar na região das baixas pressões.

Em comparação com CTRL\_pre, os experimentos GSM e CTRL\_pos indicam entre 5 e 6 mm/mês a menos de precipitação na região equatorial em média (Figura 63 b).

Neste período do ano, o pico de precipitação está localizado mais a sul devido à dinâmica da ZCIT. Percebe-se também um deslocamento para sul da diminuição da precipitação entre os casos GSM e CTRL\_pos na região tropical (Figura 63 b).

A diminuição da TSI causou um aumento de precipitação de aproximadamente 6 mm/mês na região tropical do hemisfério sul e diminuição da precipitação na região equatorial e tropical norte. Além disso, também causou diminuição da precipitação em até 3 mm/mês entre 30°N e 50°N (Figura 63 c).

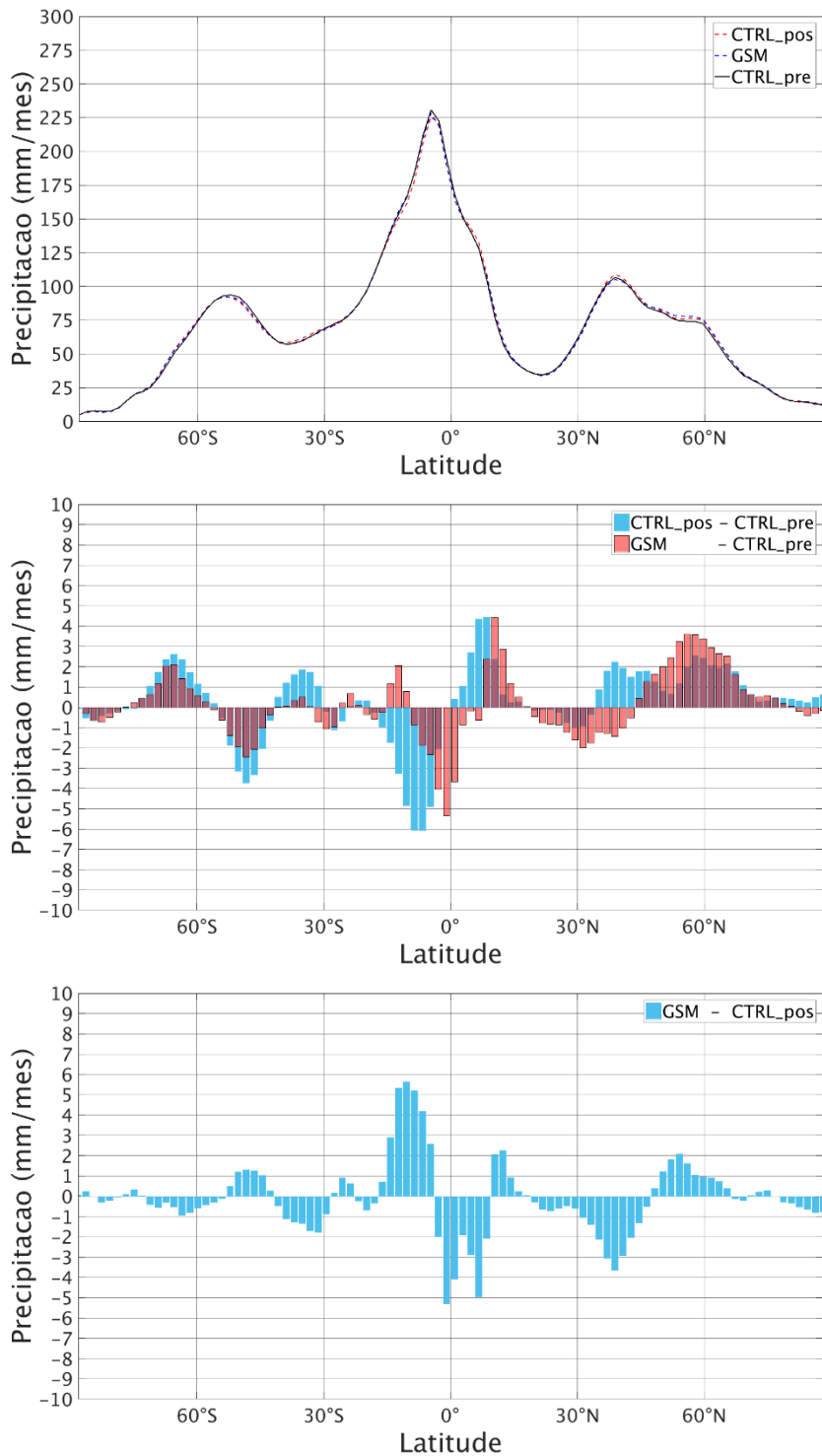


Figura 63 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para DJF. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

Para o período de JJA (Figura 62), o padrão de distribuição média zonal de precipitação também foi mantido (a), inclusive com o pico de precipitação agora no hemisfério norte, também devido à dinâmica da ZCIT.

Em relação ao CTRL\_pre, o experimento GSM apresenta diminuição da precipitação entre 15°S e 50°S e um aumento de até 6mm/mês entre o equador e 15°S e uma diminuição entre o equador e 20°N.

Como em JJA a ZCIT está localizada nesta última região descrita, a diminuição da precipitação indica uma desintensificação da ZCIT em até 5mm/mês.

Na comparação entre GSM e CTRL\_pos, na região tropical sul há uma intensificação da precipitação, enquanto que na região norte ocorre uma diminuição.

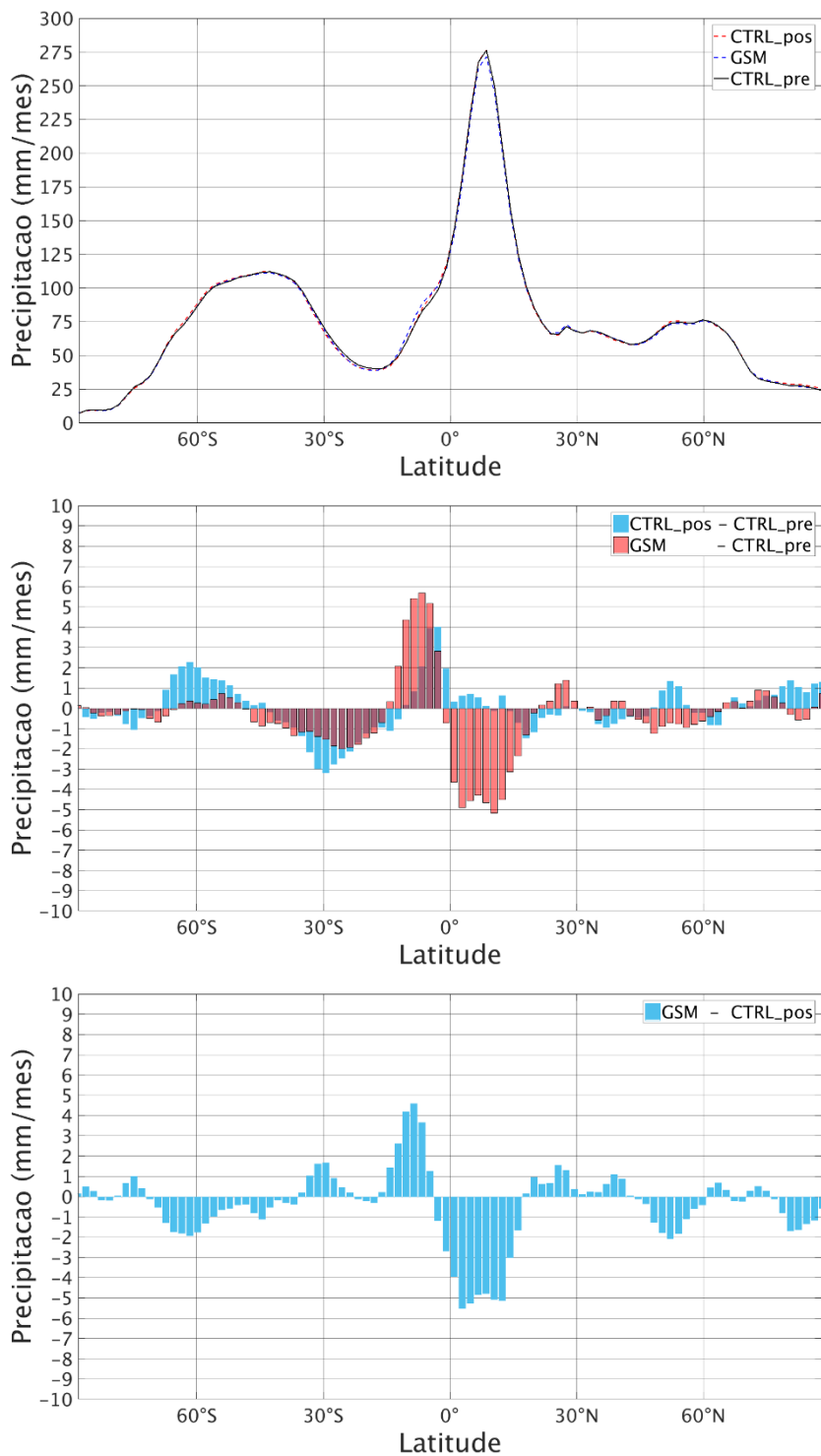


Figura 64 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para JJA. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

Para o período MAM, o pico de precipitação ainda está localizado no hemisfério sul, seguindo padrão climatológico (Figura 65 a).

A tendência no hemisfério sul para os experimento CTRL\_pos e GSM é de diminuição da precipitação, enquanto que no hemisfério norte a tendência é de aumento, principalmente na região equatorial e na região do cinturão de baixa pressão (60°N) (Figura 65 b).

No hemisfério sul a tendência é de diminuição de precipitação para ambos os experimentos (Figura 65 b).

A diferença entre GSM e CTRL\_pos indica diminuição de até 3 mm da precipitação no hemisfério sul, na região próxima ao equador. Na maior parte do hemisfério sul ocorre pouca diminuição de precipitação, de até 1 mm.

No hemisfério norte a diminuição de TSI causa aumento de precipitação entre o equador e aproximadamente 10°N, diminuindo entre 10°N e 20°N. Na região do cinturão de baixa pressão, a precipitação é menos intensa em GSM (Figura 65 c).

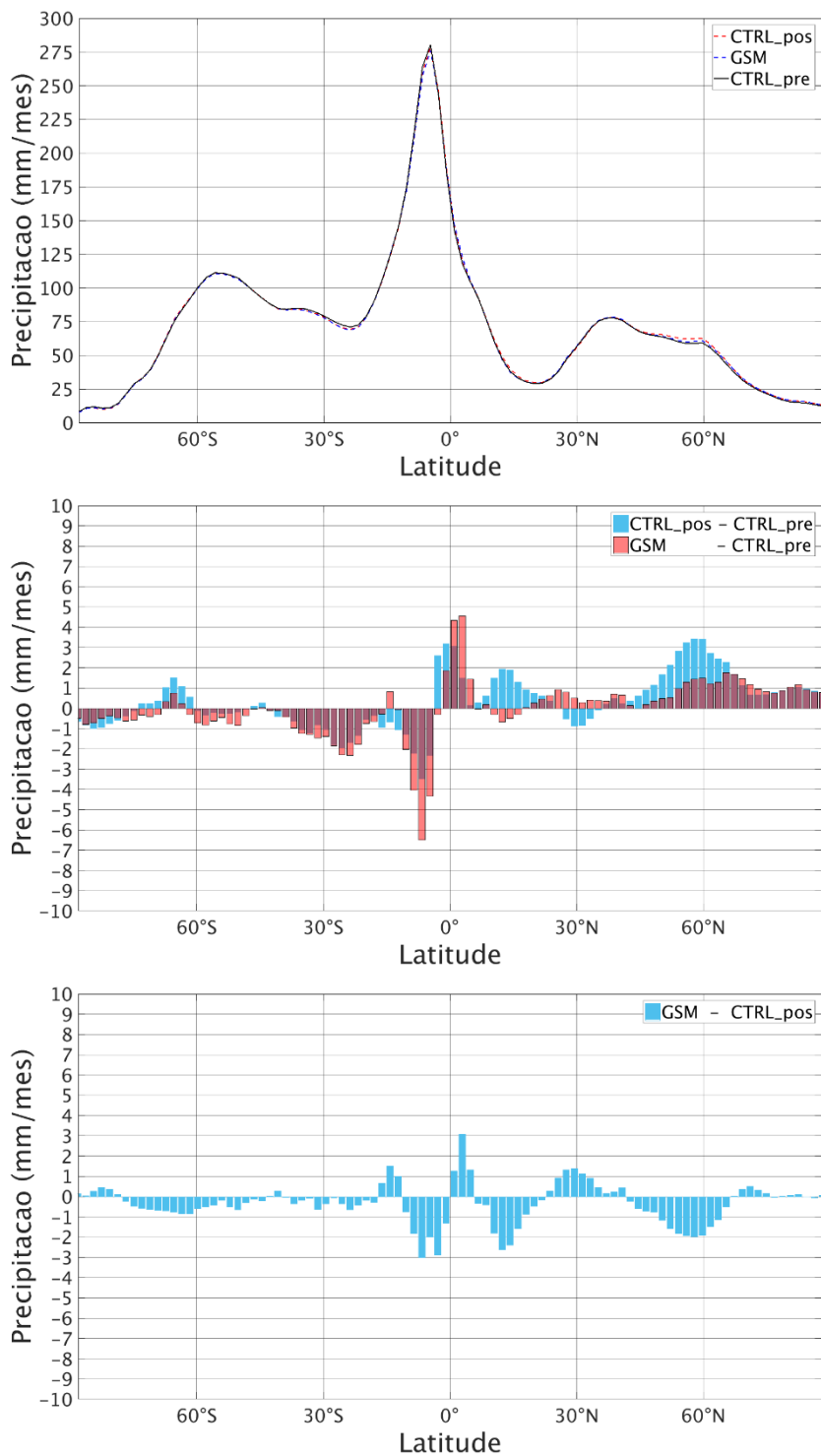


Figura 65 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para MAM. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

Para o período SON o pico de precipitação está localizado no hemisfério norte (Figura 66 a).

A precipitação do hemisfério sul apresenta grande variação positiva e negativa em diversas faixas de latitudes. Maior destaque é dado para a diminuição de precipitação na região da ZCIT de até 6 mm e de até 3 mm na região do cinturão de alta pressão do hemisfério norte e até 2 mm na região do cinturão de alta do hemisfério sul (Figura 66 b).

Na região entre 50°N e a região polar norte ocorre um aumento na precipitação nos experimentos CTRL\_pos e GSM (Figura 66 b).

A diferença entre CTRL\_pos e GSM chega a 6 mm a menos em GSM na região da ZCIT (Figura 66 c). Portanto, a diminuição da TSI causou uma diminuição da precipitação média em SON na região da ZCIT.

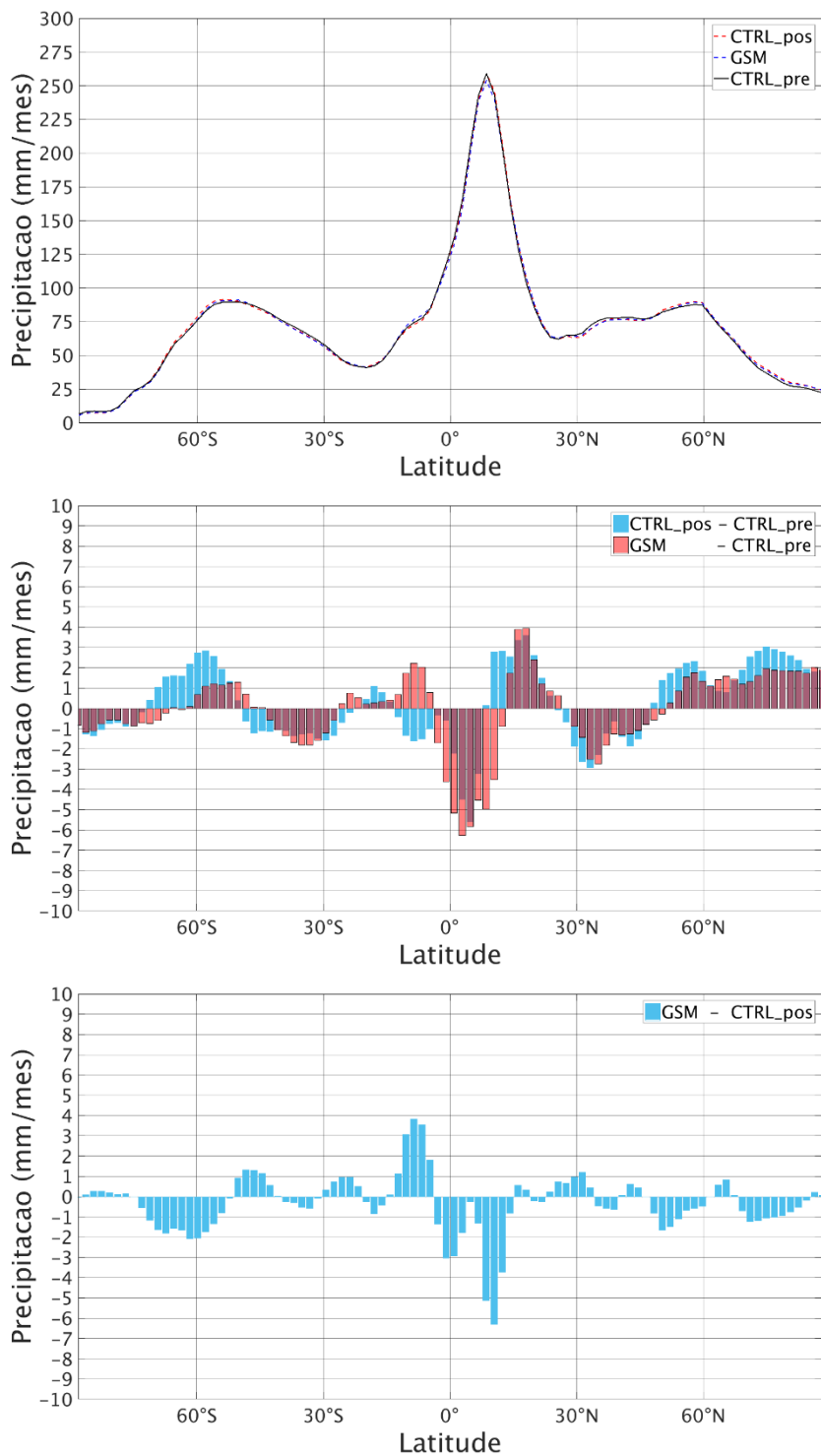


Figura 66 - Distribuições zonais de precipitação (mm/mês) para SON. Em (a) experimento CTRL\_pos é representado pela linha tracejada azul, GSM pela linha tracejada vermelha e CTRL\_pre pela linha contínua preta. As anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre e GSM e CTRL\_pre em (b). Em (c) está representada a anomalia entre GSM e CTRL\_pos, que correspondem ao mesmo período de tempo (1950 a 2000).

### 5.7.1. Distribuição espacial dos campos de anomalia de precipitação

De maneira geral, o aumento do CO<sub>2</sub> no cenário CTRL\_pos em relação à CTRL\_pre, aliado às alterações nos padrões de circulação e temperatura, causou também impactos expressivos nos campos de precipitação em todo o globo ao longo de todos os períodos analisados (Figura 67). De acordo com OTTO-BLIESNER et al. (2015), os gases de efeito estufa tem um papel importante na variabilidade da metade para o final do século XX, período este que corresponde ao experimento CTRL\_pos deste trabalho.

Ao longo dos períodos avaliados, ocorre um aumento de precipitação em CTRL\_pos na região do Pacífico equatorial, norte da América do Sul e Atlântico equatorial, que corresponde à posição média da zona de convergência intertropical (PEIXOTO e OORTH, 1992; WALISER e GAUTIER, 1993).

Durante a década entre 1950 e 1960, a região da zona de convergência do pacífico sul registra uma forte anomalia negativa de precipitação, ou seja, menos precipitação em CTRL\_pos em relação a CTRL\_pre. O mesmo ocorre na região nordeste, central e sul do Brasil (Figura 67 a).

A região do posicionamento médio da ZCIT no Atlântico, quando avaliados os períodos médios prolongados (Figura 67 f, g), apresenta anomalia positiva de precipitação (mais chuva em CTRL\_pos), que coincide com região em há anomalia positiva de temperatura da superfície do mar (Figura 74).

Nos períodos mais prolongados de médias, de 1951 a 2000 (Figura 67 f) e de 1971 a 2000 (Figura 67 g), percebem-se anomalias negativas de precipitação em quase todo o Brasil, mas principalmente na região nordeste. SILVA (2004), ao avaliar a alteração de precipitação em 80 anos de série de dados de estações meteorológicas do nordeste brasileiro, também encontrou diminuição da quantidade de chuva ao longo do tempo. Nesta mesma região foi encontrada anomalia positiva de temperatura em CTRL\_pos (Figura 46), além de anomalia positiva de pressão atmosférica (Figura 36).

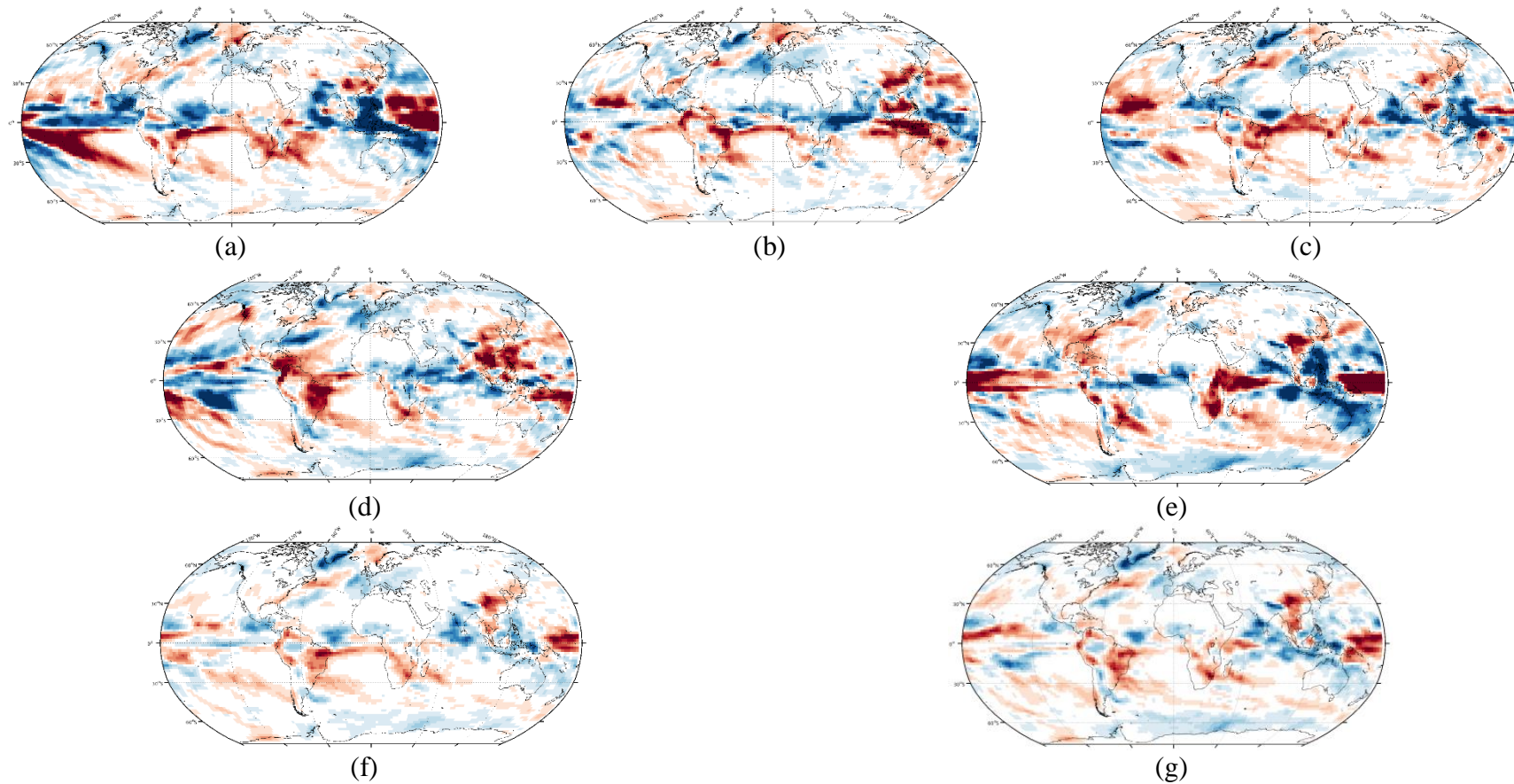


Figura 67 – Campo de diferença de precipitação (mm) entre CTRL\_pos e CTRL\_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

O mínimo prolongado de atividade solar (GSM) causa impactos no balanço de energia do sistema climático. Com isso, também ocorrem alterações nos regimes globais de precipitação nos campos de anomalias entre os experimentos GSM e CTRL\_pre (Figura 68), como já demonstrada pela correlação de campo (ítem 5.2.3) desta variável.

No hemisfério sul (Figura 68) ocidental, as regiões mais impactadas pela diminuição da chuva são o Pacífico sul e nordeste do Brasil. Os campos de anomalias apresentam feições similares às anomalias encontradas entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre.

Quando analisados os períodos prolongados (Figura 68 f, g), a retirada de energia ocorrida em GSM atua no sentido de intensificar os efeitos regionais na precipitação. Ou seja, o experimento GSM intensifica as anomalias positivas e negativas de precipitação que são também encontradas entre CTRL\_pos e CTRL\_pre, como, por exemplo, as anomalias negativas (menos chuva em GSM do que em CTRL\_pre) no Brasil e positivas no sobre a Índia e parte do Oceano Índico.

No Pacífico equatorial também são mantidas as regiões com anomalias positivas (mais chuva em GSM), como visto também nas anomalias entre CTRL\_pos e CTRL\_pre (Figura 67 f, g).

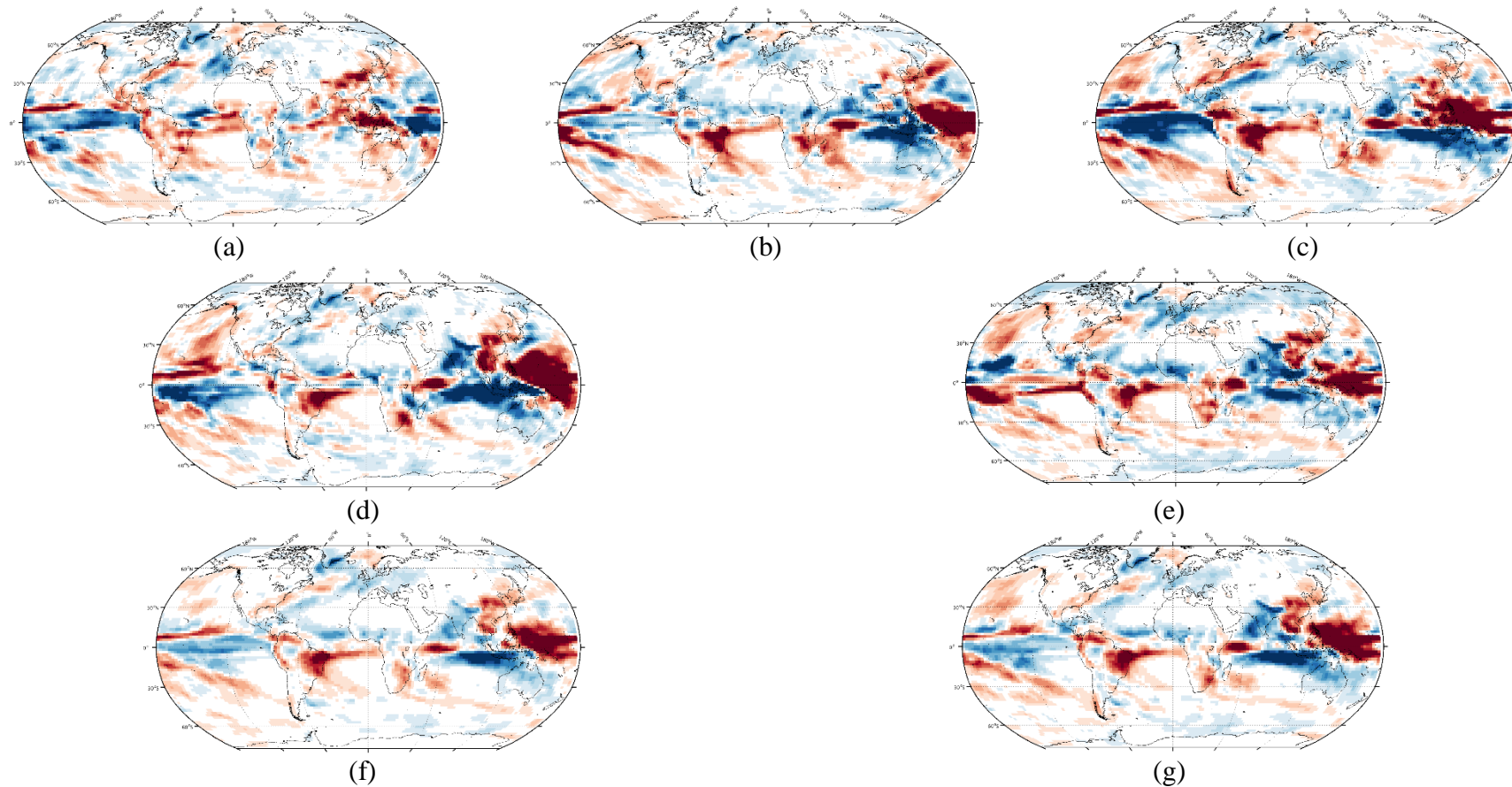


Figura 68– Campo de diferença de precipitação (mm) entre GSM e CTRL\_pre. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

Nos campos de anomalia de precipitação entre os experimentos GSM e CTRL\_pos (Figura 69), percebe-se que a menor quantidade de energia disponível para o sistema climático causou muitas variações nos campos ao longo de todas as décadas.

A região do Pacífico oeste foi a mais atingida ao longo de todo o período, apresentando grande região de anomalia negativa, ou seja, menos precipitação em GSM do que em CTRL\_pos. A área da zona de convergência do pacífico sul também é afetada com anomalia negativa em sua porção sul. Na porção norte a anomalia passa a ser positiva, indicando mais chuva em GSM.

Maior precipitação em GSM é detectada na Índia e área central do Oceano Índico, além das regiões sul e centro-oeste do Brasil nos últimos trinta anos de simulação (Figura 69 g). Nos últimos 50 anos (Figura 69 f) a média é suavizada, apesar de manter as feições encontradas no período de 30 anos.

A faixa diagonal de anomalia positiva de precipitação encontrada entre o sul do Brasil e o sul do Atlântico sul nos resultados com medias temporais prolongadas (Figura 69 f, g) pode estar associada à anomalia negativa de pressão (menor pressão atmosférica no experimento GSM) mostrada na Figura 38 (f, g). Esta anomalia negativa de pressão possivelmente enfraquece a ASAS e permite o avanço dos sistemas transientes na América do Sul e, conseqüentemente, aumenta a anomalia de precipitação nesta região.

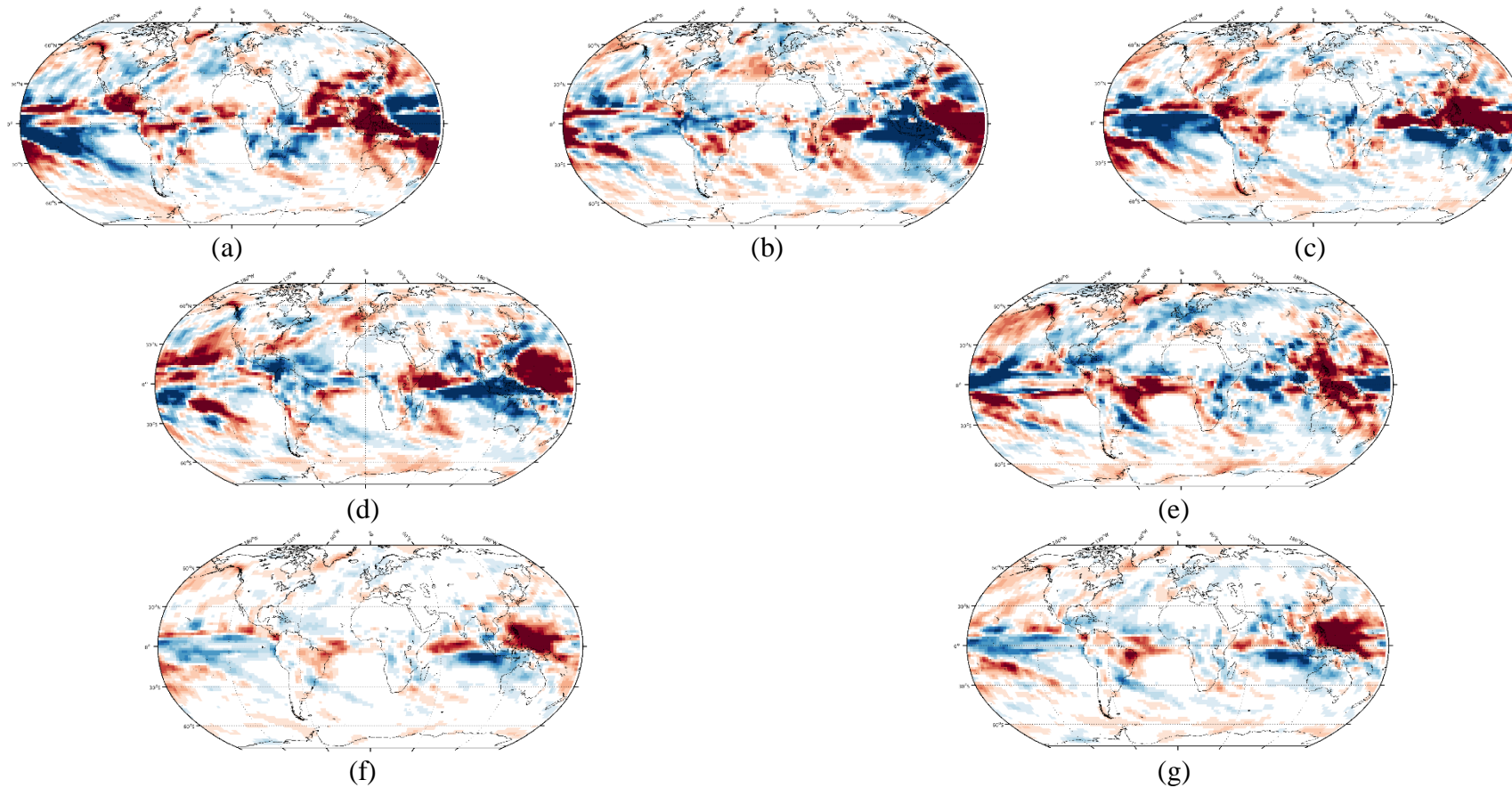


Figura 69– Campo de diferença de precipitação (mm) entre GSM e CTRL\_pos. Em (a) 1951 a 1960, (b) 1961 a 1970, (c) 1971 a 1980, (d) 1981 a 1990, (e) 1991 a 2000, (f) 1951 a 2000, (g) 1971 a 2000.

## **5.8. Precipitação, pressão e temperatura na América do Sul**

Neste item são avaliados os impactos regionais entre os experimentos CTRL\_pos, CTRL\_pre e GSM sobre a América do Sul e seus impactos sócio-econômicos.

### **5.8.1. Distribuição espacial regional de anomalias (CTRL\_pos – CTRL\_pre)**

Em todos os trimestres, a diferença de PNMM média entre CTRL\_pos (experimento com aumento de CO<sub>2</sub> em relação à CTRL\_pre) e CTRL\_pre (Figura 70) indica aumento da pressão em CTRL\_pos no Pacífico sudeste, Atlântico sul e sobre grande parte da América do Sul, com mais intensidade em DJF e SON. As regiões do Atlântico Sul e Pacífico sudeste são importantes para o regime de chuvas no Brasil, pois são regiões onde podem ocorrer os bloqueios atmosféricos, que impedem a passagem de sistemas transientes que causam precipitação e tem como consequência o prolongamento de períodos de seca no verão (MENDES et al., 2005).

A temperatura também apresenta um aumento devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> em CTRL\_pos na região central do Brasil com certa intensidade e em todos os trimestres. O aumento das condições de bloqueios atmosféricos regionais tem grande probabilidade de ocorrer em cenários de aumento de temperatura global (LUPO et al., 1997; MOKHOV e TIMAZHEV, 2015; MOKHOV e TIMAZHEV, 2019), como é o caso do experimento CTRL\_pos.

A precipitação é mais escassa em CTRL\_pos na região do nordeste brasileiro em DJF e MAM. A região norte do continente sul-americano também apresenta menor índice de precipitação em JJA.

SILVA (2004) analisou o comportamento da temperatura do ar a 2 m e umidade relativa e precipitação da região nordeste do Brasil, utilizando dados observados durante os 30 anos finais do século XX, que é o mesmo período que abrange o experimento CTRL\_pos. Os resultados indicaram um aumento gradual de temperatura (entre 0,4°C e 3,6°C dependendo da estação meteorológica) da região nordeste e diminuição da umidade relativa e precipitação. Os resultados vistos na Figura 70 também mostram aumento de temperatura e diminuição da precipitação para a mesma região avaliada por SILVA (2004).

BORGES et al. (2013) avaliaram dados de temperatura do ar a 2 metros da região central do Brasil entre os anos de 1971 e 2010 e concluíram que há um aumento entre 0,7°C e 2,1°C, dependendo da estação meteorológica avaliada.

Na região amazônica em DJF a precipitação é intensificada, bem como na Bolívia, Paraguai e partes da Argentina.

Em DJF e MAM, nota-se a presença da ZCIT no norte da América do sul, caracterizada pela faixa de maior precipitação no local, sendo, de tal maneira, intensificada no experimento CTRL\_pos. Os posicionamentos da ZCIT ao longo dos agrupamentos trimestrais estão de acordo com a climatologia provenientes de dados de satélite observada por WALISER e GAUTIER (1993).

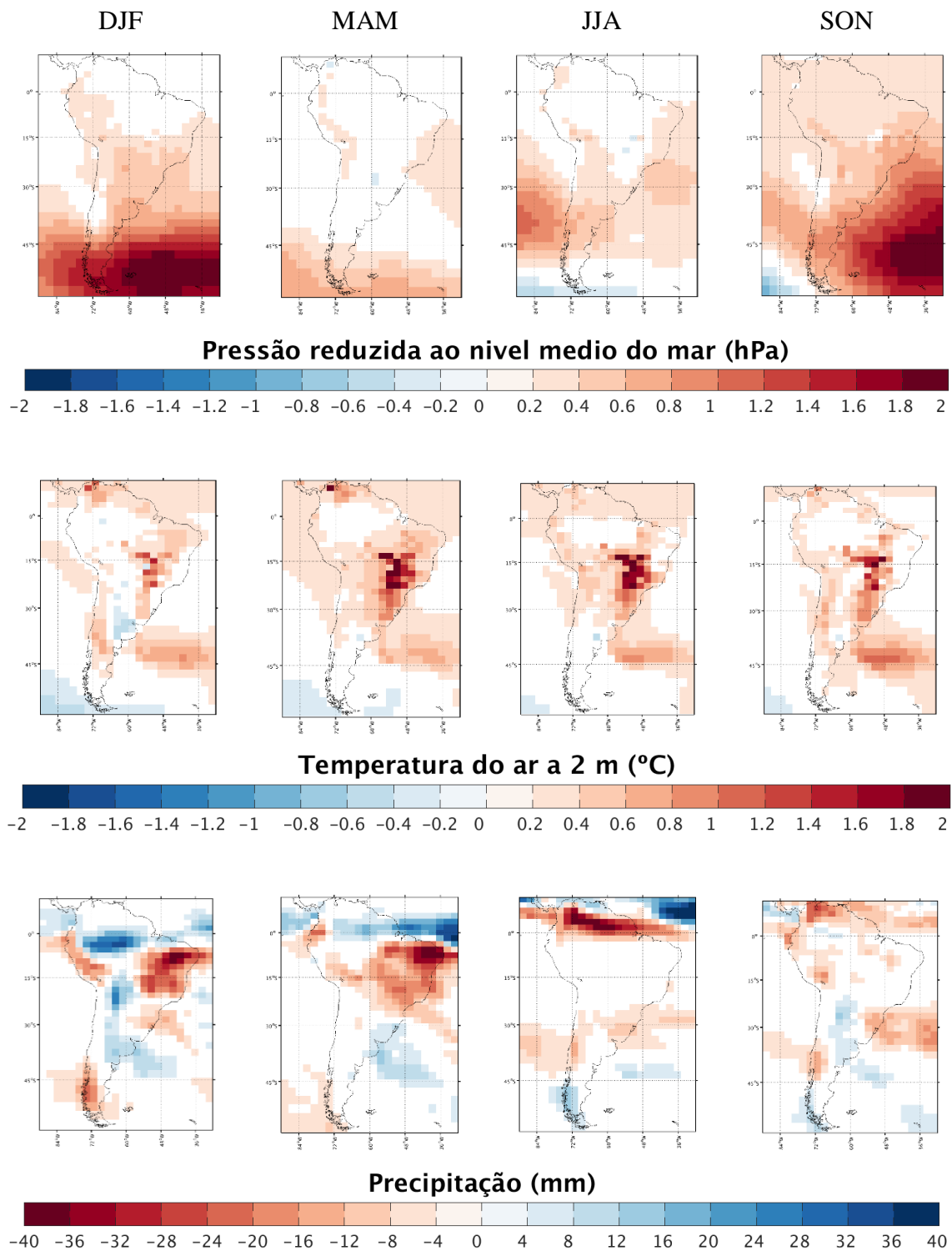


Figura 70 – Campos de diferenças entre CTRL\_pos e CTRL\_pre. As colunas são relativas aos períodos DJF, MAM, JJA e SON. Os campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) são representadas na primeira linha; a temperatura do a 2 m de altura (°C) na segunda linha e precipitação (mm) na terceira.

De acordo com o IPCC AR-3 (2001), as alterações climáticas devido à emissão de gases de efeito estufa podem levar extremos climáticos regionais, como aumento de intensidade/frequência de tempestades, ondas de calor, enchentes, etc., que causam dano físico, deslocamento de populações, afetam a produção de alimentos, a disponibilidade e qualidade de água para consumo, seja humano ou animal, além de causar o aumento de epidemias de doenças. Estes efeitos são ainda mais pronunciados em países em desenvolvimento (IPCC, 2001).

O cenário CTRL\_pos (1950 a 2000) simula o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, que é um gás de efeito estufa, em relação ao período CTRL\_pre (de 1850 a 1950). Desta forma, o experimento CTRL\_pos está sujeito às alterações climáticas aqui apresentadas.

A vulnerabilidade sócio-ambiental da população, além de sua saúde, também é afetada pela maneira como o sistema ecológico amortece ou não as alterações das características climáticas (CONFALONIERI, 2007). O ciclo de vida de diversos patógenos em seus vetores também é afetado por fatores climáticos (KOVATS et al., 2001).

A América do Sul é considerada uma região vulnerável (CONFALONIERI, 2007) às alterações climáticas devido ao perfil social de sua população em geral, com alta taxa de pobreza e problemas de governança; variabilidade climática natural, como El-Niño e La-Niña, que podem se estender por longos períodos e causar danos à população; grandes áreas metropolitanas com grandes densidades populacionais, sujeitas a enchentes e deslizamentos de terra; linhas de costa bastante longas e com alta densidade populacional, que pode sofrer com alterações dos oceanos; e, por fim, a agricultura, que pode sofrer com os impactos climáticos causando diminuição da produção de alimentação.

Para citar um caso de bloqueio atmosférico intenso e prolongado sobre o Brasil e que levou a sérias conseqüências sócio-ambientais foi o evento ocorrido em 2014, em que foi registrada anomalia negativa de mais de 300 mm de chuva durante o período de verão (COELHO et al., 2015). Foram registrados impactos desde a disponibilidade de água para o consumo quanto para irrigação, produção de energia elétrica, afetando também a produção agrícola (COELHO et al., 2015).

No ano de 2001, outro evento de seca severa no sudeste do Brasil trouxe conseqüências econômicas sérias para o setor elétrico. Nesta época o sistema elétrico do país ainda não era interconectado como atualmente, então a transferência de energia

elétrica entre as regiões do país não era possível. Desta forma, a população foi forçada a adotar medidas para diminuição do consumo de energia elétrica (COELHO et al., 2015).

### **5.8.2. Distribuição espacial regional de anomalias (GSM – CTRL\_pos)**

No caso das anomalias entre os experimentos GSM e CTRL\_pos (Figura 71), percebe-se uma diminuição da PNMM na Argentina, Pacífico sudeste e Atlântico sudoeste em DJF, MAM e SON. Em JJA, a PNMM no sul da América do sul e região oceânica adjacente é intensificada.

A temperatura, de maneira geral, apresenta anomalia negativa (menores temperaturas no experimento GSM) no continente em todos os meses em relação à CTRL\_pos. A exceção é a região sudeste do Brasil que apresenta um aumento pontual em DJF e MAM.

Na distribuição espacial das anomalias regionais de precipitação (Figura 71), o norte e nordeste brasileiros apresentam anomalias negativas (menos chuva no experimento GSM em relação à CTRL\_pos). O sudeste, parte do centro-oeste e parte do sul indicam anomalia positiva em DJF. Em MAM o sul do Brasil apresenta anomalia negativa, bem como o nordeste. O sudeste continua com anomalia positiva. No período de JJA grande parte da América do Sul não apresenta anomalias. No entanto, em SON parte do Brasil, Paraguai, Bolívia e norte da Argentina apresentam anomalia negativa de precipitação.

Assim como CTRL\_pos, o experimento GSM contém alteração da concentração de CO<sub>2</sub>, estando portanto também sujeito às alterações climáticas descritas no ítem anterior. Percebe-se pela anomalia de precipitação entre o experimento GSM e CTRL\_pos na região do nordeste brasileiro que esta anomalia se intensifica. Portanto, mesmo em um cenário com menor energia disponível (simulado pela diminuição da TSI) para o sistema climático a região nordeste do Brasil sofre com menos chuva do que o cenário atual (relativo ao experimento CTRL\_pos) já afetado com a diminuição de chuvas (SILVA, 2004).

EDDY (1976) argumenta que o período do Mínimo de Maunder causou impactos climáticos regionais mais intensos do que impactos globais, e o resultado mostrado na Figura 71 sugere que o mesmo ocorre no experimento GSM.

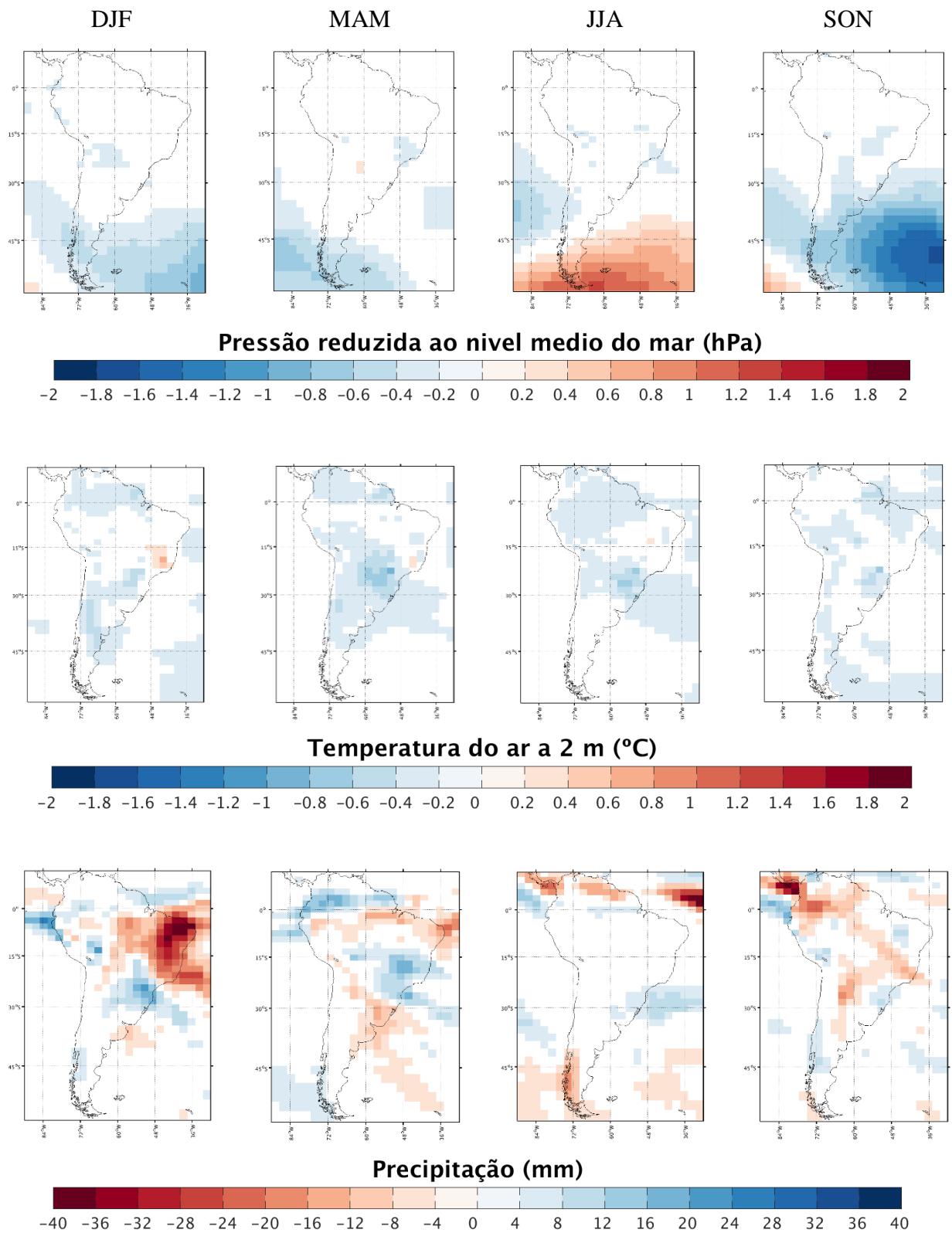


Figura 71 – Campos de diferenças entre GSM e CTRL\_pos. As colunas são relativas aos períodos DJF, MAM, JJA e SON. Os campos de pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (hPa) são representadas na primeira linha; a temperatura do a 2 m de altura (°C) na segunda linha e precipitação (mm) na terceira.

## 5.9. Oceano

O ciclo anual do balanço do fluxo de calor na superfície global do oceano, integrada mensalmente, e o mesmo ciclo separado por hemisfério do experimento CTRL\_pre (1850 a 2000) é mostrado na Figura 72.

No hemisfério sul, o maior valor positivo ocorre em dezembro, enquanto que o valor mais negativo ocorre em junho. Para o hemisfério norte, o maior valor positivo ocorre em junho e valor mais negativo em dezembro.

Este é o comportamento típico do fluxo de calor na superfície do oceano, pois cada hemisfério tem seu maior fluxo de calor no período de verão e o menor valor no período de inverno, como observado por ASSAD (2009) e SANCHO (2015).

O fluxo global de calor tende a ser dominado pelo hemisfério sul, devido à maior quantidade de água em comparação com o hemisfério norte.

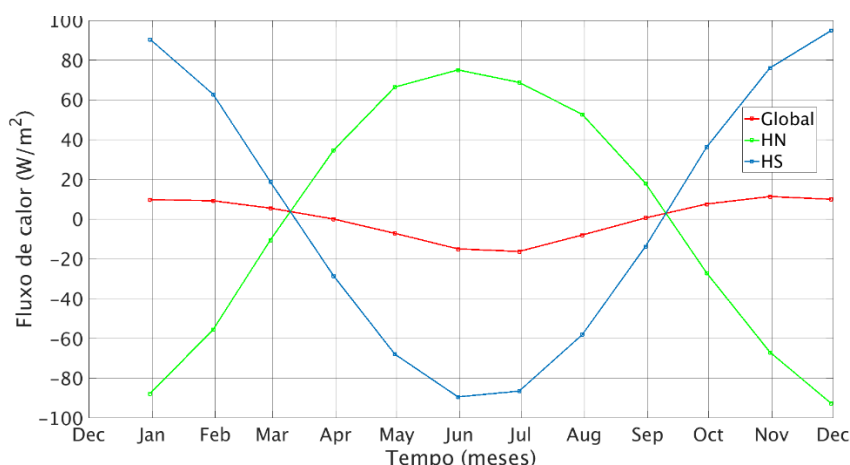


Figura 72 – Médias mensais do fluxo de calor ( $Wm^{-2}$ ) na superfície do oceano. A linha vermelha representa o fluxo integrado em todo o oceano. A linha verde representa o fluxo integrado no hemisfério norte e a linha azul integrado no hemisfério sul.

As séries temporais da temperatura da superfície do mar (TSM) integrada globalmente para os experimentos CTRL e GSM são representadas na Figura 73.

De maneira geral, percebe-se uma tendência de aumento da TSM ao longo do tempo em ambos os experimentos, da mesma forma que a temperatura a 2 m também apresentou aumento (Figura 39).

A partir de 1950 ocorre a diferenciação das TSM devido à diminuição da TSI, evidenciando um aquecimento menos intenso no experimento GSM.

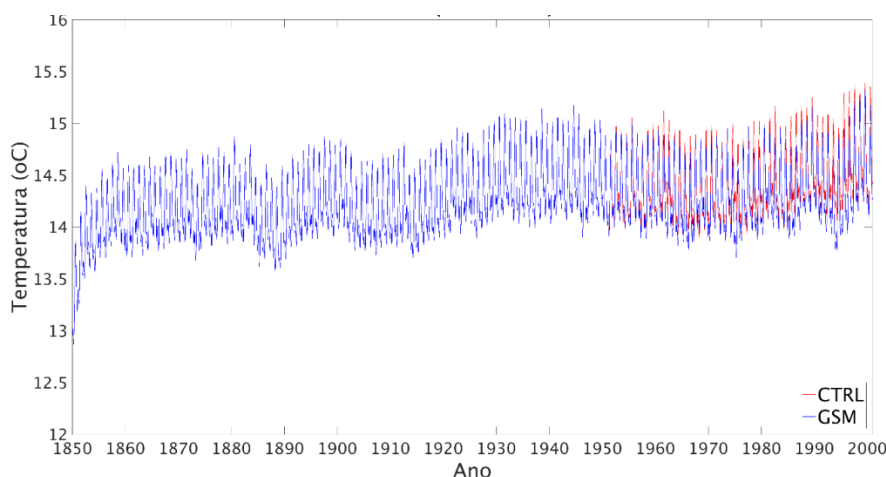


Figura 73 – Série temporal de TSM (°C) integrada no oceano global. A linha vermelha representa o experimento CTRL e a linha azul o experimento GSM.

Nos campos de anomalia de TSM de CTRL\_pos – CTRL\_pre na Figura 74 (a, b) e GSM – CTRL\_pre Figura 74 (c, d), percebe-se algumas regiões com diferenças positivas bem demarcadas, como as regiões próximas à Groenlândia (norte do Atlântico norte), região sul do Atlântico sul (área da confluência Brasil-Malvinas) e na região entre o continente africano e a Antártida, indicando um aquecimento destas regiões em ambos os experimentos CTRL\_pos e GSM em relação ao período de 1850 a 1950.

Na região ao redor da Groenlândia o aquecimento pode impactar a formação da Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), com consequências na Circulação Termohalina Global (THC) SANCHO (2015).

Nestes experimentos, percebe-se um ligeiro resfriamento na porção central do Atlântico Sul e um resfriamento maior na região sul do Pacífico e na região norte da costa leste da América do Norte e próximo à Islândia.

De acordo com WANG et al. (2019), que avaliou as diferenças entre cenários climáticos futuros de aquecimento e de resfriamento da TSM global, o cenário aquecido (que neste trabalho corresponde a CTRL\_pos) mostrou aumento de amplitude dos eventos de ENSO, enquanto o efeito contrário, de diminuição da amplitude, foi encontrado no cenário resfriado.

A anomalia GSM - CTRL\_pos (Figura 74 e, f) indica que, na maior parte dos oceanos, a TSM tende a ser menor no experimento GSM com algumas exceções (como também encontrado por MEEHL et al., 2013) como a porção central do Atlântico Norte, e um pequeno sinal de aumento de temperatura no Pacífico Norte próximo ao Japão.

A diminuição da TSI para um nível menor foi capaz de refletir uma diminuição da TSM global. Neste tipo de cenário, como analisado por WANG et al. (2018), aos eventos de ENSO tem a tendência de diminuir de amplitude, com consequências, por exemplo, no regime de precipitação no Brasil.

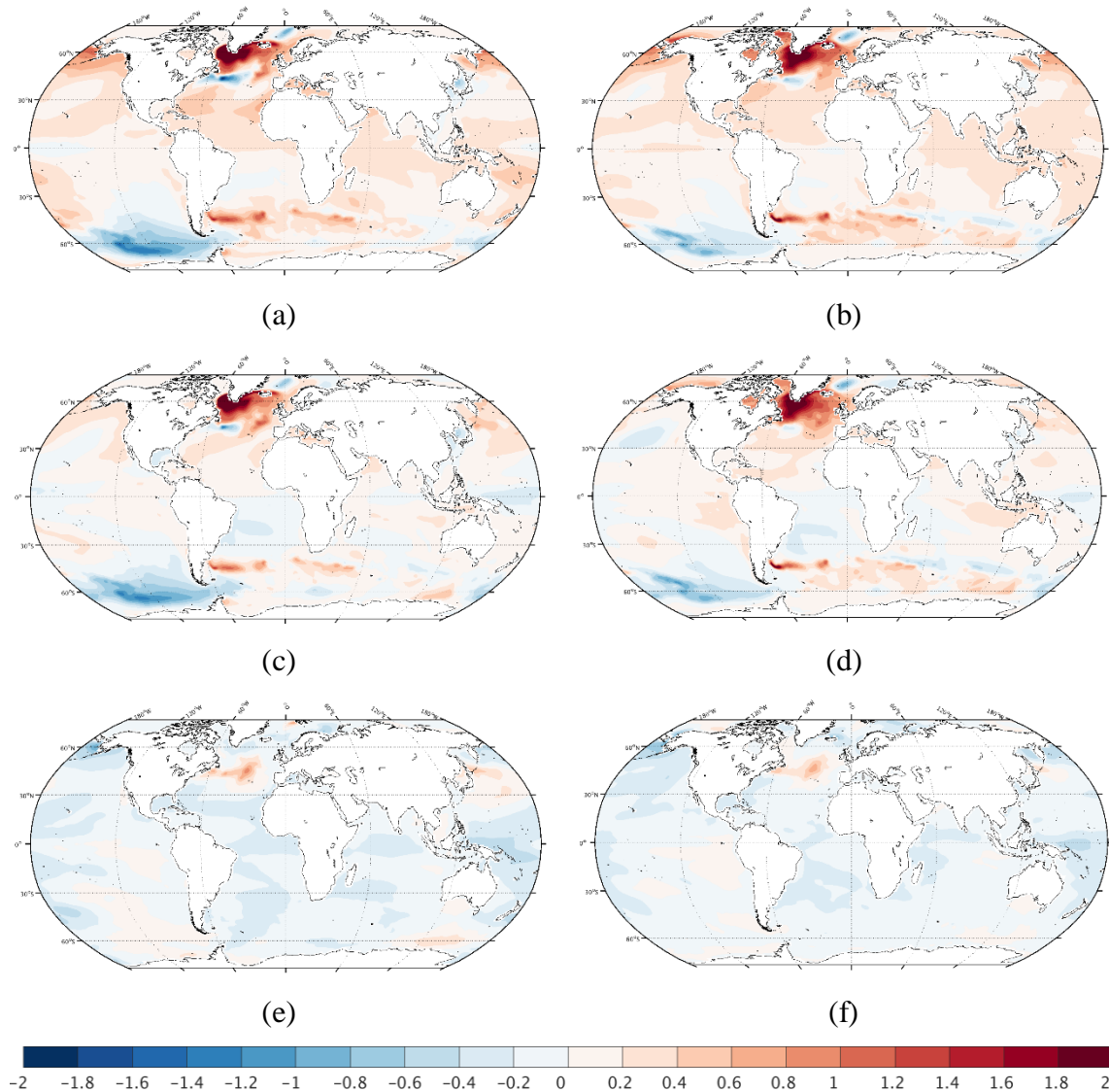


Figura 74 - Anomalias de TSM entre os experimentos. Em (a, b) CTRL\_pos – CTRL\_pre; em (c, d) GSM – CTRL\_pre; Em (e, f) GSM - CTRL\_pos. As figuras à esquerda representam o período DJF e as figuras à direita representam o período JJA.

Os campos de temperatura superficial da água mediada nos primeiros 5 metros dos experimentos CTRL\_pre, CTRL\_pos e GSM para a América do Sul são mostrados na Figura 75.

O destaque é dado para a região da Confluência Brasil Malvinas (CBM) no verão (DJF) e inverno (JJA) do hemisfério sul. Esta região da CBM, devido ao seu forte gradiente de temperatura, é considerada uma das regiões oceânicas mais energéticas do mundo (GORDON, 1989; CHELTON et al., 1990), variando seu posicionamento entre cerca de 35°S e 36°S (LEGECKIS e GORDON, 1982; CAMPOS et al., 1999) e cerca de 38°S e 40°S (CIOTTI et al., 1995; CAMPOS et al., 1999).

As temperaturas mais altas são provenientes da Corrente do Brasil (CB), que margeia o litoral brasileiro quase por inteiro em direção ao sul, tendo origem na região tropical, enquanto as menores temperaturas são provenientes da Corrente das Malvinas (CM), que carregam as águas mais frias da Corrente Circumpolar Antártica em direção à região equatorial.

Este encontro entre as duas correntes oscila entre um posicionamento mais a sul no verão (Figura 75 a, b, c), quando fortalecido pela CB e mais a norte no inverno (Figura 75 d, e, f), sendo fortalecido pela CM e influenciado pelo campo de vento local (LEGECKIS e GORDON, 1982; PICKARD e EMERY, 1990; CIOTTI et al., 1995; CAMPOS et al, 1999). Este padrão é encontrado nos três experimentos.

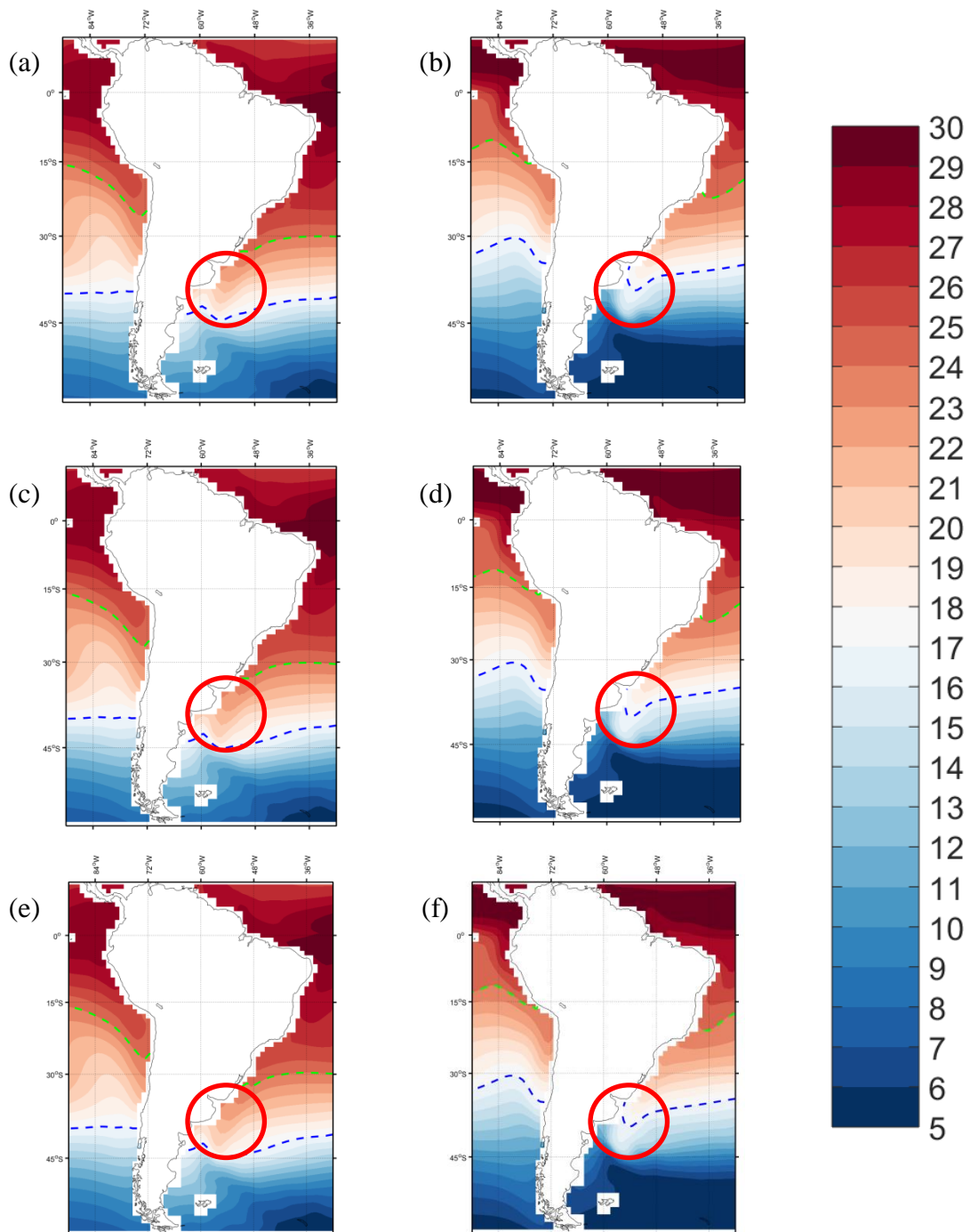


Figura 75 - Representação da sazonalidade da confluência Brasil-Malvinas de acordo com o campo de temperatura do primeiro nível vertical a partir dos experimentos CTRL\_pre (a, b), CTRL\_pos (c, d) e GSM (e, f). As figuras à esquerda representam os campos em DJF e as figuras à direita JJA. O destaque em vermelho representa a região da CBM. Linha tracejada azul indica a isoterma de 17°C e a linha tracejada verde a isoterma de 24°C, como recomendado por WAINER et al. (2000).

As anomalias de TSM entre os experimentos, com foco na porção sudoeste do Oceano Atlântico Sul, são mostradas na Figura 76.

Percebe-se que a anomalia entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre indica um aquecimento em CTRL\_pos na região da CBM, tanto em DJF (Figura 76 a) quanto JJA (Figura 76 b), sendo mais intenso em JJA. Portanto, o período entre 1950 e 2000 é mais aquecido nesta região quando comparado com o período entre 1850 e 2000.

A anomalia entre GSM e CTRL\_pre (Figura 76 c, d) também segue o mesmo padrão de aquecimento na região da CBM, demonstrando que o período de menor TSI não foi capaz de frear o aquecimento ocorrido no período posterior a 1950 quando comparado ao período entre 1850 e 2000.

Ao analisar a anomalia entre GSM e CTRL\_pos (Figura 76 e, f), ou seja, ambos os experimentos cobrindo o mesmo período de tempo, percebe-se que na região da CBM a diferença chega a  $-0,3^{\circ}\text{C}$  na média do período, indicando que o período com TSI reduzida foi capaz de resfriar a TSM nesta região tanto em DJF quanto em JJA.

Como consequência desta anomalia negativa, os sistemas frontais que atingem a região tenderiam a se manter mais a sul, alterando o regime de precipitação na região sul do Brasil (CATALDI et al., 2010).

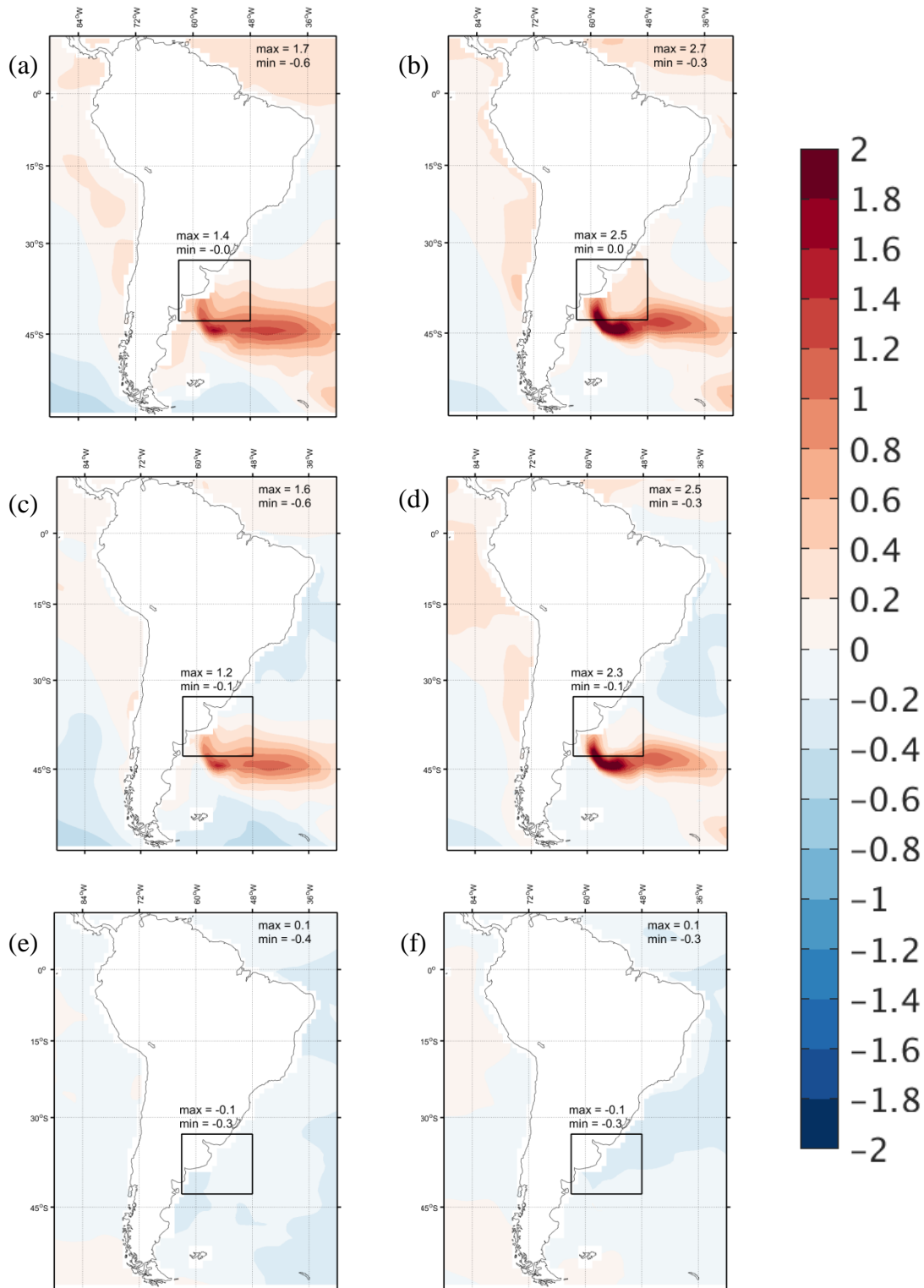


Figura 76 – Anomalia de TSM entre os experimentos. (a, b) CTRL\_pos – CTRL\_pre, (c, d) GSM – CTRL\_pre e (e, f) GSM – CTRL\_pos. As figuras à esquerda representam os campos no verão (DJF) e as figuras à direita representam os campos no inverno (JJA) do hemisfério sul. O destaque indica a região da CBM (CATALDI, 2010). “Max” e “min” indicam os valores máximo e mínimos das anomalias de TSM.

## 5.10. Escoamento superficial

Os resultados avaliados neste ítem são provenientes do modelo de escoamento superficial MOSART.

As anomalias de descarga direta de água líquida são bastante ressaltadas nos locais que concentram grandes volumes de água continentais, tais como os Grandes Lagos, na América do Norte, Rio Amazonas, na América do Sul, Lagos Vitória e Lago Tanganyika, na África, Mar Negro, Mar Cáspio, Lago Balkash entre Europa e Ásia, além da península Antártica.

A descarga de água líquida apresenta sazonalidade, mostrada pelas diferenças entre os campos em dezembro (Figura 77 a, b, c) e junho (Figura 77 d, e, f) As maiores anomalias são verificadas em junho em todos os experimentos no hemisfério norte, por ser verão.

O experimento CTRL\_pos, quando comparado com CTRL\_pre, indica menor quantidade de água descarregada na América do Norte e África em dezembro. Na América do Sul o CTRL\_pos indica um pouco mais de água líquida de maneira espalhada pelo continente.

A Península Antártica, por sua vez, apresenta indícios de grande quantidade de água líquida no experimento CTRL\_pos. Em junho, a anomalia negativa se espalha sobre a Europa e Eurásia.

As anomalias de GSM – CTRL\_pre (Figura 77 b) são mais ressaltadas na América do Sul, principalmente no Rio Amazonas, indicando que GSM possui mais água líquida do que CTRL\_pre.

O mesmo padrão é encontrado entre Europa e Eurásia. Na África o cenário se inverte, indicando anomalia negativa, ou seja, CTRL\_pre com maior quantidade de água.

Como ocorrido com CTRL\_pos, o experimento GSM também apresenta maiores anomalias sobre a Europa e Eurásia em junho (Figura 77 e). O Rio Amazonas apresenta anomalia negativa mais intensa também em junho.

As maiores anomalias GSM – CTRL\_pos ocorrem em junho (Figura 77 f) no Rio Amazonas, com menos água em GSM do que em CTRL\_pos, além da América do Norte, com o mesmo cenário.

Na Eurásia a situação é invertida, com mais água disponível em GSM do que em CTRL\_pos. Em dezembro (Figura 77 c), as anomalias são menos intensas e esparsas,

mas afetam a região nordeste do Brasil com menos água disponível. Já o sul do Brasil apresenta anomalia positiva, indicando maior quantidade de água.

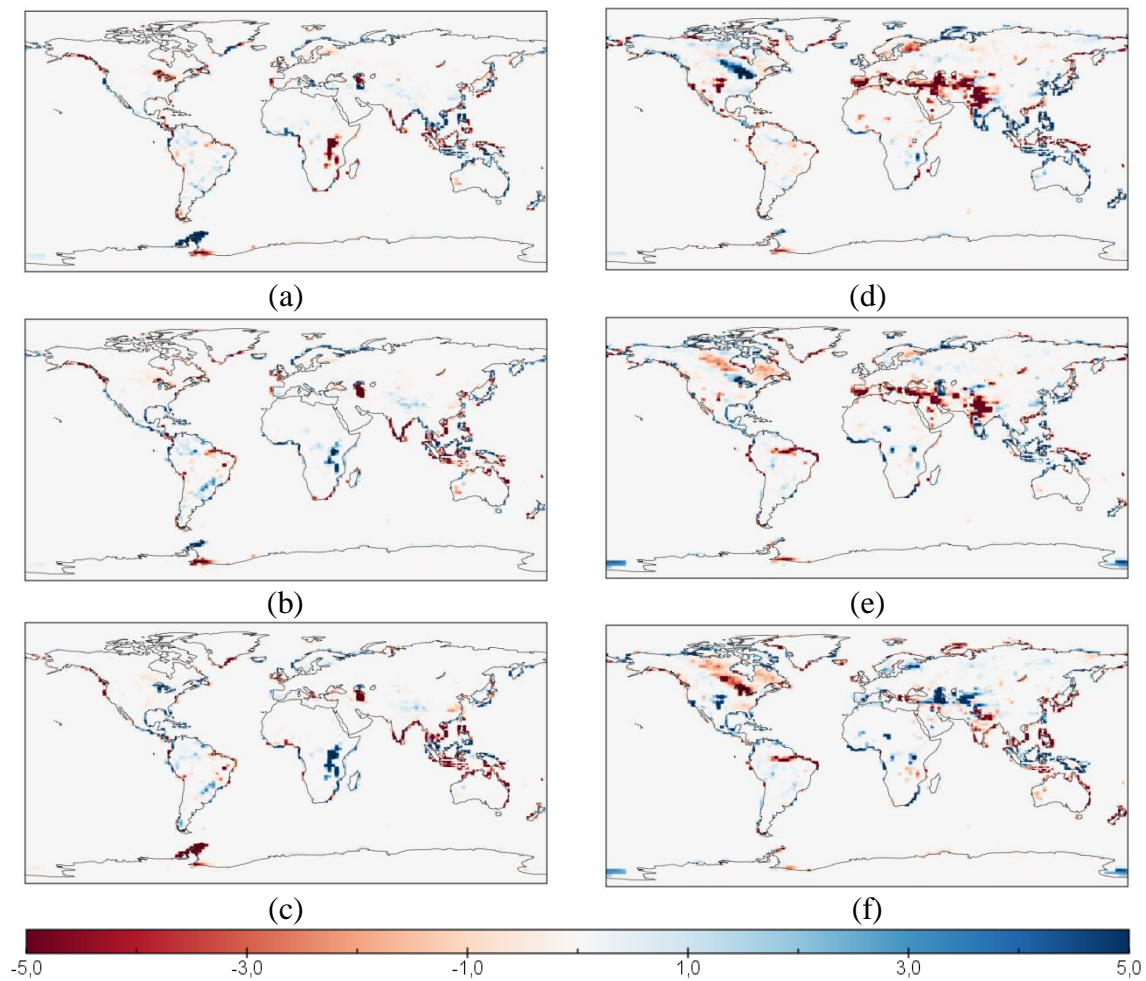


Figura 77 - Anomalias descarga direta de água líquida ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente.

### 5.11. Gelo marinho

Os resultados avaliados neste ítem são provenientes do modelo de gelo marinho CICE.

A espessura de gelo, que é dependente da temperatura do ar (HUNKE, 2010), apresenta anomalia negativa, ou seja, valores de CTRL\_pre maiores do que CTRL\_pos, em praticamente todos os locais cobertos de gelo no hemisfério norte e sul, com anomalias positivas (CTRL\_pos maior do que CTRL\_pre) em apenas alguns pontos da Antártida em dezembro.

Os valores máximos positivos chegam a aproximadamente 11 m próximo à península Antártica, e os mais negativos a -4 m no Ártico, próximo ao nordeste da Eurásia (Figura 78 a).

Em junho a anomalia negativa de maior amplitude (-3 m) permanece no sudeste da Eurásia e a maior anomalia positiva (11 m) ocorre a norte da Eurásia, com algum sinal de mesma intensidade a leste da península Antártica (Figura 78 d) e menor intensidade, mas ainda positiva no Ártico, ao norte da Europa.

O mesmo padrão de diminuição da espessura de gelo próximo ao nordeste da Eurásia (aproximadamente -4 m) e aumento da espessura próximo à península se mantém na anomalia entre GSM – CTRL\_pre (Figura 78 b, e). Entretanto, a região da Groenlândia apresenta certo aumento da espessura de gelo (aproximadamente 9 m) tanto na porção oeste quanto leste em GSM em dezembro e em junho (Figura 78 b, e).

Há um aumento da espessura de gelo em praticamente todo o Ártico no experimento GSM (anomalias positivas) quando calculada a anomalia GSM – CTRL\_pos para dezembro (Figura 78 c).

A região ao redor da Groenlândia apresenta aumento da espessura de gelo em GSM. Na Antártida há uma variação de aumento e diminuição da camada, sendo que as maiores anomalias positivas (aproximadamente 8 m) ocorrem à oeste da península Antártica e os valores mais negativos (aproximadamente -8 m) ocorrem à leste do mesmo local.

Em junho (Figura 78 f), as maiores anomalias positivas são registradas no noroeste da América do Norte e norte da Eurásia.

A região nordeste da Eurásia apresenta anomalia negativa, ou seja, diminuição da espessura de gelo. A Groenlândia permanece com aumento da espessura também em junho, salvo a região leste.

Estes resultados estão de acordo com os resultados apresentados para a temperatura do ar a 2 m, que mostram um aumento de temperatura no experimento CTRL\_pos em relação a CTRL\_pre (Figura 46) e uma diminuição da temperatura a 2 m no experimento GSM em relação a CTRL\_pos (Figura 48).

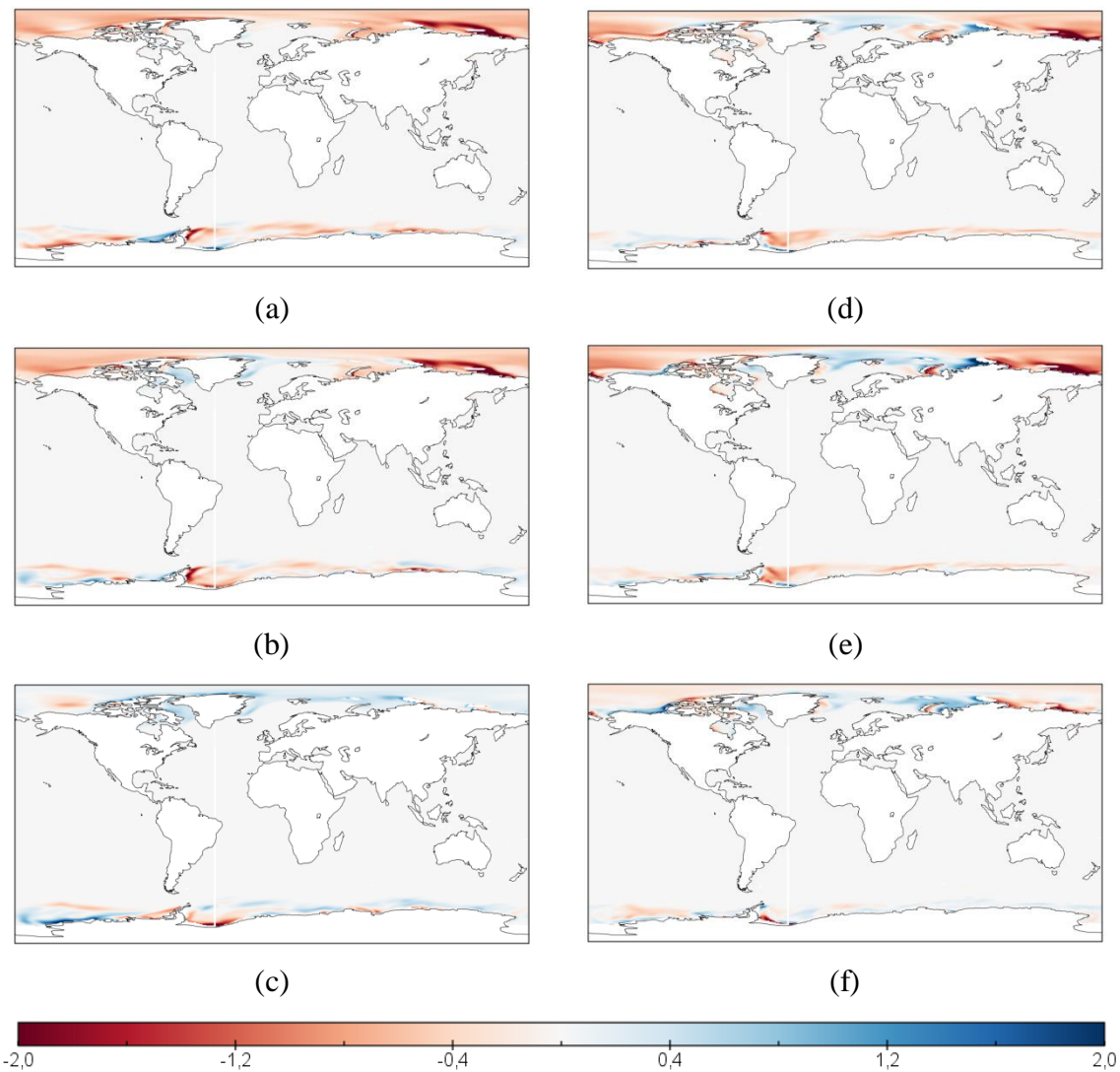


Figura 78 – Anomalias de espessura de gelo (m). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente.

No período compreendido pelo experimento CTRL\_pos ocorre uma diminuição global (anomalia negativa) da fração de área coberta por gelo em relação à CTRL\_pre em dezembro, com exceções pontuais (anomalia positiva) próximos à Groenlândia e passagem de Drake (Figura 79 a).

Em junho, mais locais apresentam anomalia positiva e as anomalias negativas têm área diminuída, pois é período de verão no hemisfério norte (Figura 79 d).

O mesmo padrão se repete quando avaliada a anomalia GSM – CTRL\_pre, entretanto a região da Groenlândia passa a apresentar anomalia positiva, indicando aumento da fração de gelo em GSM (Figura 79 b).

Em junho (Figura 79 e), o padrão é similar ao da Figura 79 (d). A anomalia GSM – CTRL\_pos (Figura 79 c, f) indica aumento geral da fração de área coberta por gelo em GSM, devido à menor quantidade de energia solar disponível para o sistema climático.

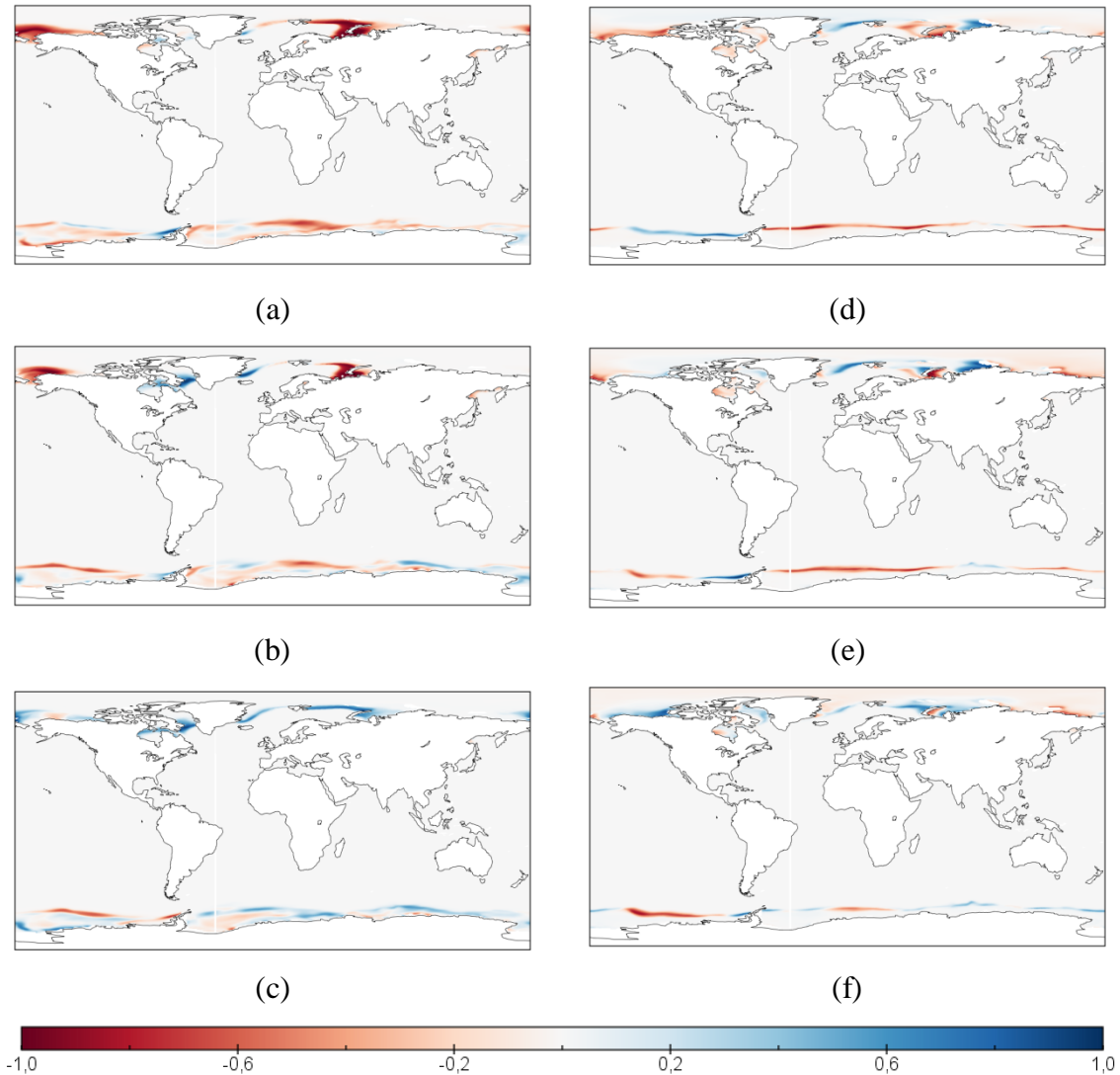


Figura 79 – Anomalias de fração de área coberta por gelo. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente.

A taxa de derretimento de gelo evidencia a sazonalidade esperada, com maior derretimento no período de verão, ou seja, no hemisfério sul em dezembro (Figura 80 a, b, c) e no hemisfério norte em junho (Figura 80 d, e, f).

Percebe-se uma anomalia negativa (maior derretimento em CTRL\_pre do que em CTRL\_pos) marcante na Antártida, com exceção da porção oeste da península Antártica em dezembro (Figura 80 a).

Em junho o cenário se inverte, com maior derretimento (anomalias positivas) em CTRL\_pos no Ártico, com exceção do nordeste da Eurásia. O mesmo padrão é encontrado nas anomalias GSM – CTRL\_pre tanto em dezembro (Figura 80 b) quanto em junho (Figura 80 e). As anomalias GSM – CTRL\_pos (Figura 80 c, f) indicam maior derretimento de gelo em junho no experimento GSM em relação ao CTRL\_pos no Ártico (anomalias positivas).

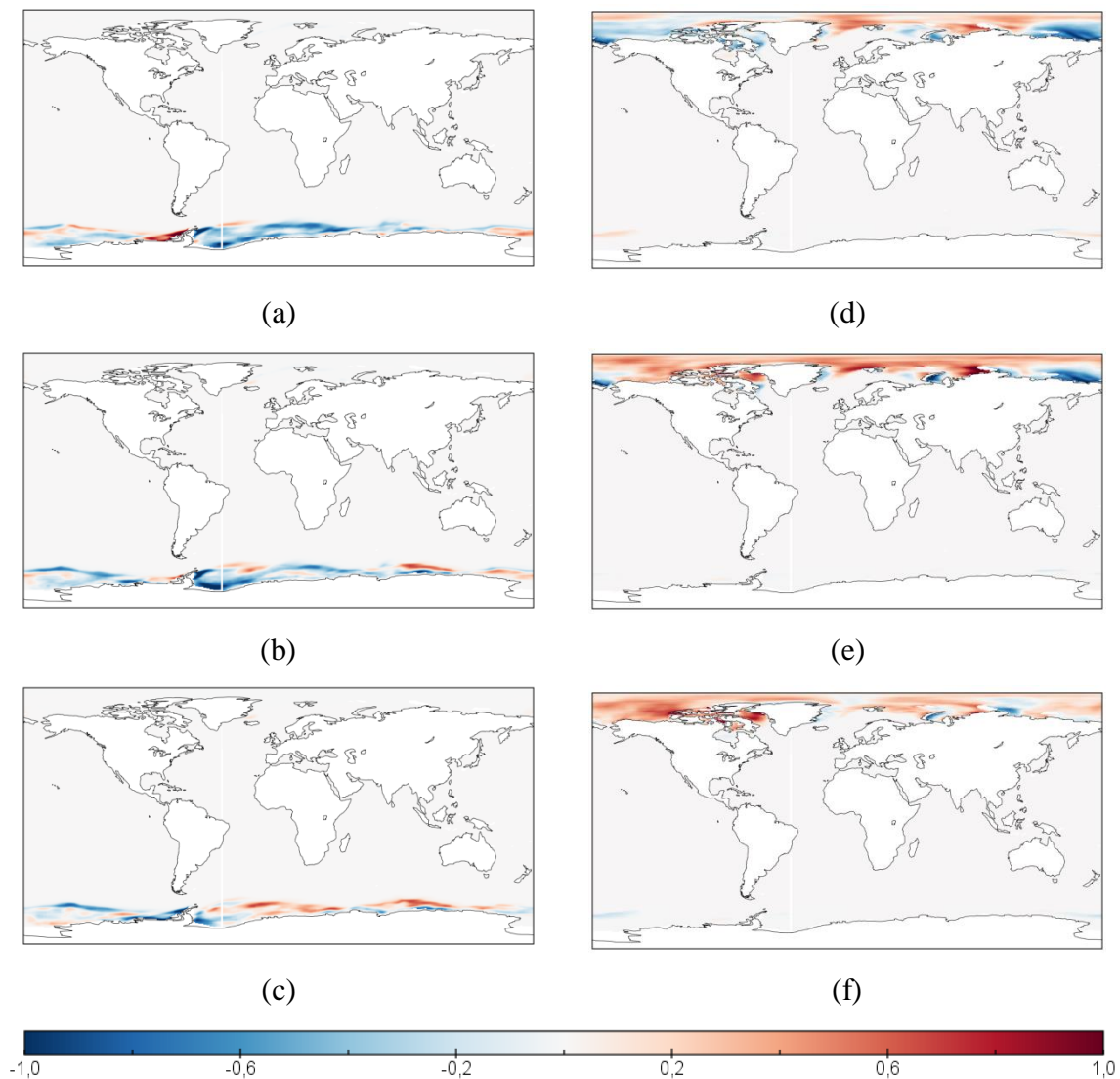


Figura 80 – Anomalias de taxa de derretimento de gelo (cm/dia). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as diferenças fossem ressaltadas, devendo, portanto, ser avaliada apenas qualitativamente.

A cobertura de gelo, espessura da camada de gelo e seu derretimento são características importantes para a previsão do clima futuro da Terra.

Sua variabilidade natural e sua variação forçada externamente podem causar alterações no albedo e, conseqüentemente, alterar o regime de geração ou derretimento de gelo, com efeitos de feedback que podem amplificar o efeito de aquecimento ou resfriamento local (CHAPMAN e WALSH, 1993; LAXON et al., 2003; HUNKE, 2010).

As alterações climáticas que causam aumento da taxa de derretimento do gelo induzem a diminuição da espessura da camada de gelo.

Caso o cenário de derretimento seja prolongado, a camada de gelo se torna ainda menor (LAXON et al., 2003). Uma consequência mais direta da diminuição da área coberta por gelo é a alteração da biodiversidade local.

A Antártida, por exemplo, possui menos do que 1% de área permanentemente livre de gelo, que abriga praticamente toda a biodiversidade da região. Enquanto em regiões como a savana africana e florestas tropicais, onde a competição por alimento tem um impacto maior na distribuição das espécies, a biodiversidade na Antártida é dirigida por outros fatores, como a disponibilidade de água, luz solar e nutrientes (LEE et al. 2017; CONVEY et al., 2014).

O aumento ou a redução da espessura da camada de gelo, além da área coberta por gelo altera as barreiras físicas a que as espécies estão sujeitas (LEE et al. 2017). Ainda é incerto como as comunidades naturais do local reagiriam a um cenário mais quente e com maior derretimento de gelo, como o cenário CTRL\_pos, bem como o cenário mais frio e com menor derretimento, como o cenário GSM.

A península Antártica, por ser a região mais afetada pelo derretimento, diminuição da espessura e diminuição da área de gelo também exibe grande potencial para o estabelecimento de espécies não-nativas invasivas no cenário CTRL\_pos. Por outro lado, em GSM, as espécies locais podem ser extintas devido ao aumento da espessura e área coberta por gelo.

## 5.12. Superfície terrestre

Os resultados avaliados neste ítem são provenientes do modelo de superfície terrestre CLM.

A espessura da camada seca do solo é importante para o cálculo do fluxo de calor latente das áreas não-vegetadas. A resistência do solo à evaporação depende diretamente da espessura da camada seca (SWENSON e LAWRENCE, 2014).

Quanto maior a espessura, maior é a resistência à evaporação (SWENSON e LAWRENCE, 2014). Fica evidenciada a diferença da espessura da camada seca entre os meses de dezembro e junho.

Nota-se que a espessura é maior em CTRL\_pos em grande parte da Europa e mais localizada em alguns pontos do continente africano. Na América do Norte a variação é positiva também em CTRL\_pos tanto em dezembro (Figura 81 a) quanto em junho (Figura 81 b).

A Austrália chama a atenção por ter variação negativa, ou seja, a espessura é menor em CTRL\_pos do que em CTRL\_pre, bem como em parte da América do Sul.

Para o Brasil, tanto nas anomalias de GSM – CTRL\_pre (Figura 81 b, e) quanto GSM – CTRL\_pos (Figura 81 c, f) a espessura da camada seca é maior no GSM na região do Nordeste e menor na região sul, quando comparado ao CTRL\_pos.

Isso indica que com a diminuição da energia do sistema, o solo das regiões Norte e Nordeste passam a apresentar maior resistência à evaporação. Os valores são maiores (em módulo) em dezembro do que em junho, devido ao verão e inverno. Estes resultados também se refletem no regime de chuvas da região, contribuindo para a intensificação da anomalia negativa de precipitação em GSM, como mostrado no ítem 5.8.2.

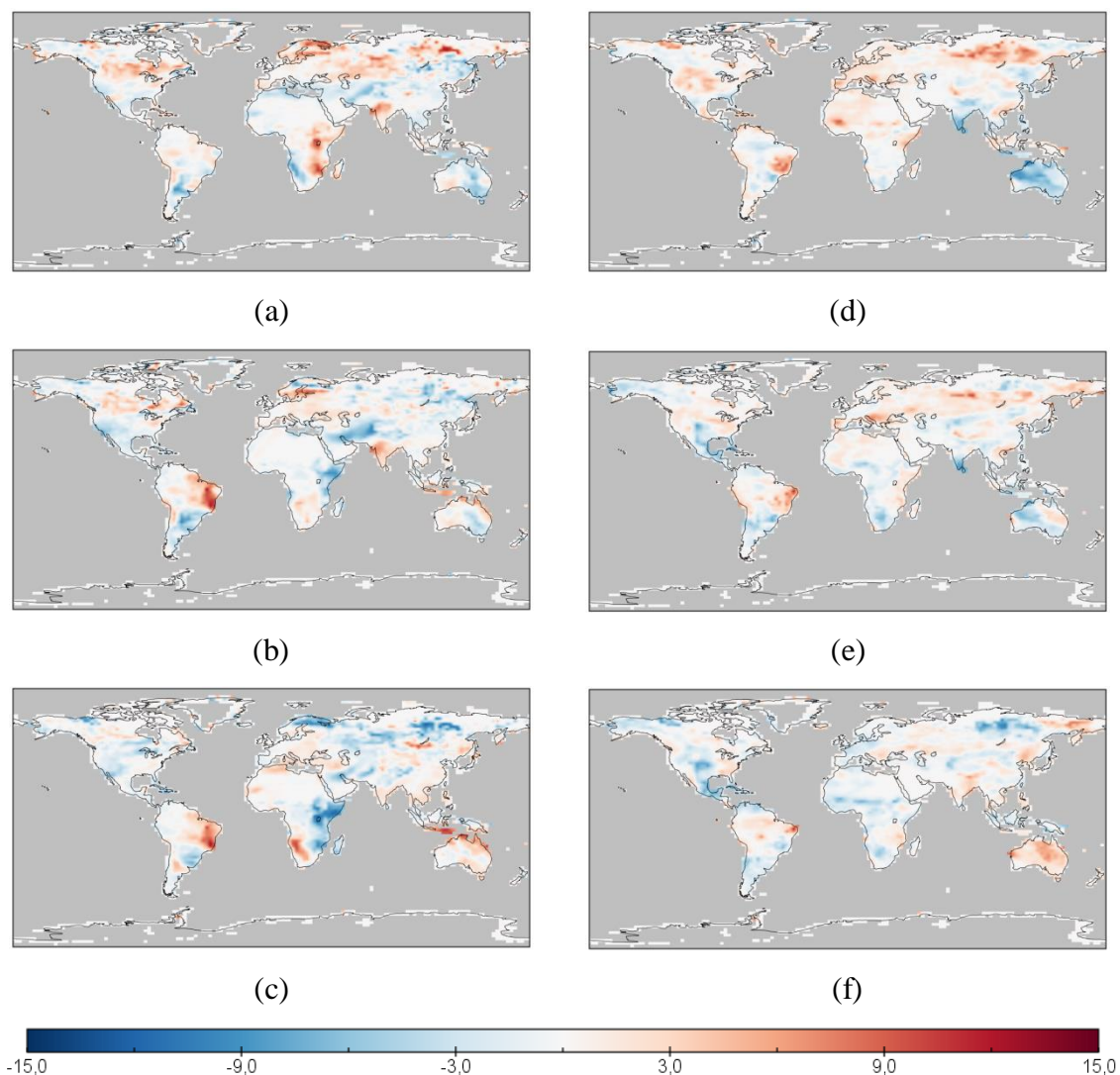


Figura 81 - Anomalias de espessura da camada seca (mm) do solo. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos.

No período de inverno do hemisfério norte, representado pelo mês de dezembro na Figura 82 (a), nota-se anomalias negativas da fração de solo coberto por neve, ou seja, valores do experimento CTRL\_pos menores do que CTRL\_pre, na região norte da Europa, além do norte da China, Mongólia e sudeste da Rússia.

A região central da Ásia apresenta anomalia positiva (CTRL\_pos maior do que CTRL\_pre), ou seja, aumento da fração de cobertura de neve. Na América do Norte, a fração diminuiu em CTRL\_pos.

O padrão praticamente se mantém no campo de anomalia entre GSM e CTRL\_pre (Figura 82 b), entretanto, na região central da Ásia a anomalia negativa se intensificou, indicando maior área com neve tanto em GSM (Figura 82 b) quanto em CTRL\_pos (Figura 82 a).

As maiores anomalias negativas que ocorrem entre GSM e CTRL\_pos (Figura 82 c) também ocorrem nas regiões anteriormente descritas, mas com área um pouco menor da Europa (em comparação com as anomalias da Figura 82 a e b) e de maneira intercalada na faixa entre 35°N e 75°N.

De maneira geral, para o mês de dezembro (Figura 82 a, b, c) as anomalias negativas se concentram nas regiões de baixa altitude em relação ao nível do mar na Europa e leste da Ásia, enquanto as anomalias positivas se concentram nas regiões mais altas, como o Himalaia.

Outra região que apresenta aumento da quantidade de neve tanto em GSM em relação à CTRL\_pre (Figura 82 b) quanto em relação a CTRL\_pos (Figura 82 c) é a região litorânea da Groenlândia.

Porém, quando esta região é avaliada na anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre (Figura 82 a), percebe-se uma diminuição da cobertura de neve.

Em junho, por ser verão no hemisfério norte, a quantidade de neve diminui, com as diferenças mais localizadas nas altas latitudes do hemisfério norte (Figura 82 d, e, f).

As anomalias são predominantemente negativas em CTRL\_pos – CTRL\_pre, indicando uma diminuição da cobertura de neve com o passar do tempo (CTRL\_pos). Anomalias positivas são encontradas apenas pontualmente na América do Norte (Figura 82 d).

Em GSM – CTRL\_pre (Figura 82 e), na parte norte da Eurásia surgem anomalias positivas e negativa intercaladas, bem como no norte da América do Norte. Em GSM – CTRL\_pos (Figura 82 c), as anomalias no norte da Eurásia e América do Norte são positivas, indicando um aumento da cobertura de neve no experimento GSM. Este resultado está de acordo com LOCKWOOD (2010), que indica que a Eurásia registra invernos mais severos em períodos de mínima atividade solar.

A análise da região da Groenlândia segue o mesmo padrão do mês de dezembro, com diminuição da cobertura de neve na anomalia CTRL\_pos – CTRL\_pre (Figura 82 d) e aumento da cobertura em GSM – CTRL\_pre (Figura 82 e) e GSM – CTRL\_pos (Figura 82 f).

Estes resultados demonstram o argumento de que a diminuição da TSI e consequente diminuição da quantidade de energia disponível para o sistema climático tem impactos regionais, como também descrito por EDDY (1976) para o período do Mínimo de Maunder.

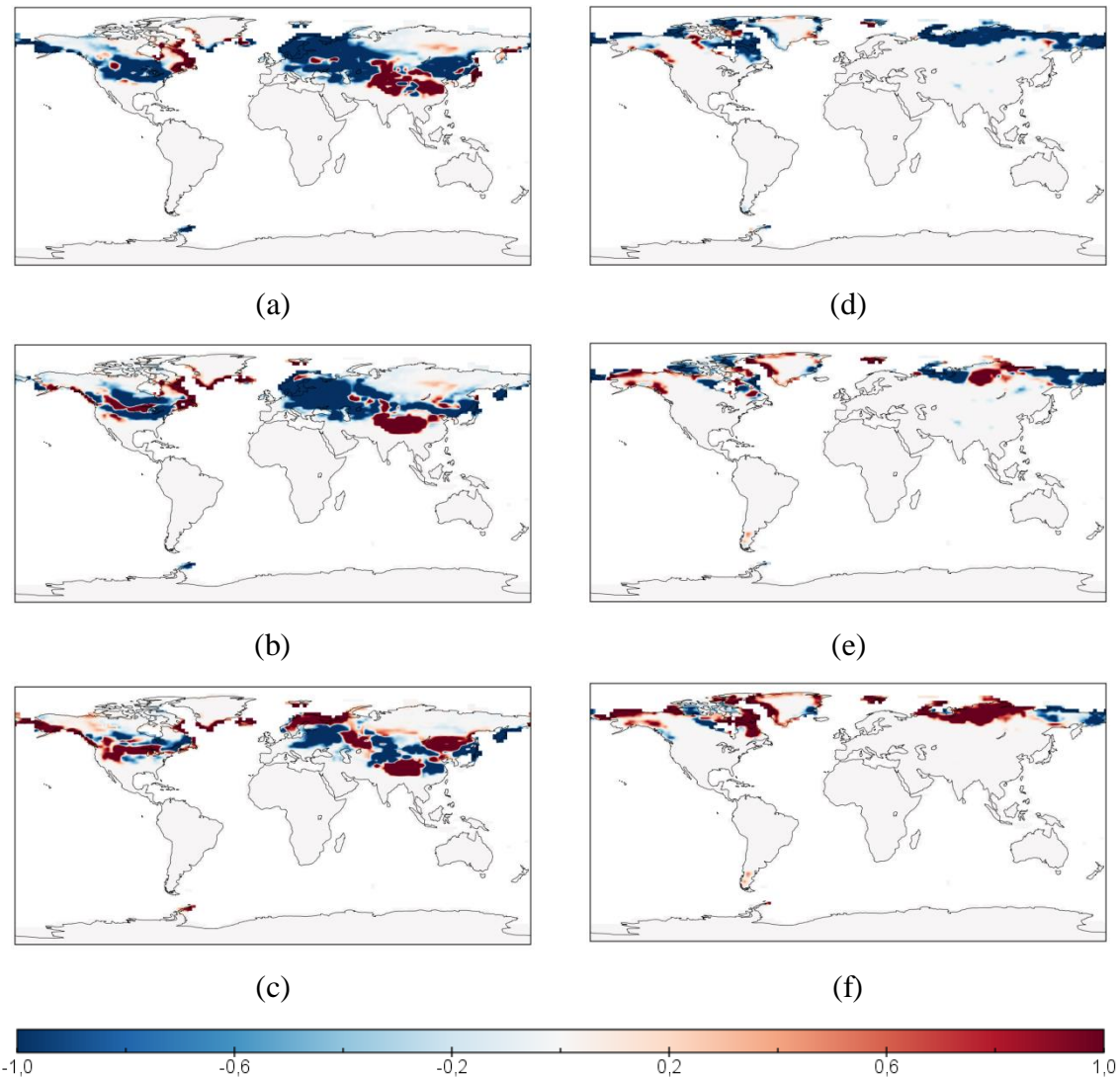


Figura 82 - Anomalias de fração do solo coberto por neve. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as anomalias ficassem mais evidentes, sendo avaliadas, portanto, apenas qualitativamente.

Como o modo de biogeoquímica do CLM é ativado por padrão (LAWRENCE et al., 2018), a variável “topo do dossel” é prognóstica. Apesar disso, nota-se que não há variação entre os resultados dos meses de dezembro (Figura 83 a, b, c) e junho (Figura 83 d, e, f).

A porção leste da América do Norte, Europa e região entre o leste europeu e Rússia, além de Japão e parte da Amazônia apresentam aumento da altura do topo dos dosséis no CTRL\_pos em relação ao CTRL\_pre.

A América central, parte da América do Sul, África, China e sudeste da Ásia apresentam diminuição da altura do dossel. Os resultados das anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre (Figura 83 a) e GSM – CTRL\_pre (Figura 83 b) são bastante similares.

Isto é explicado ao avaliar os resultados encontrados da anomalia GSM – CTRL\_pos (Figura 83 c), que indicam pequenas diferenças entre os dois experimentos.

As diferenças mais significativas são anomalias positivas, ou seja, aumento do topo dos dosséis no experimento GSM no sudeste da África, sul do Brasil, e parte da América Central (Figura 83 c).

As poucas anomalias negativas (diminuição do topo dos dosséis em GSM) ocorrem na região central da América do Norte e de maneira esparsa na Eurásia (Figura 83 c).

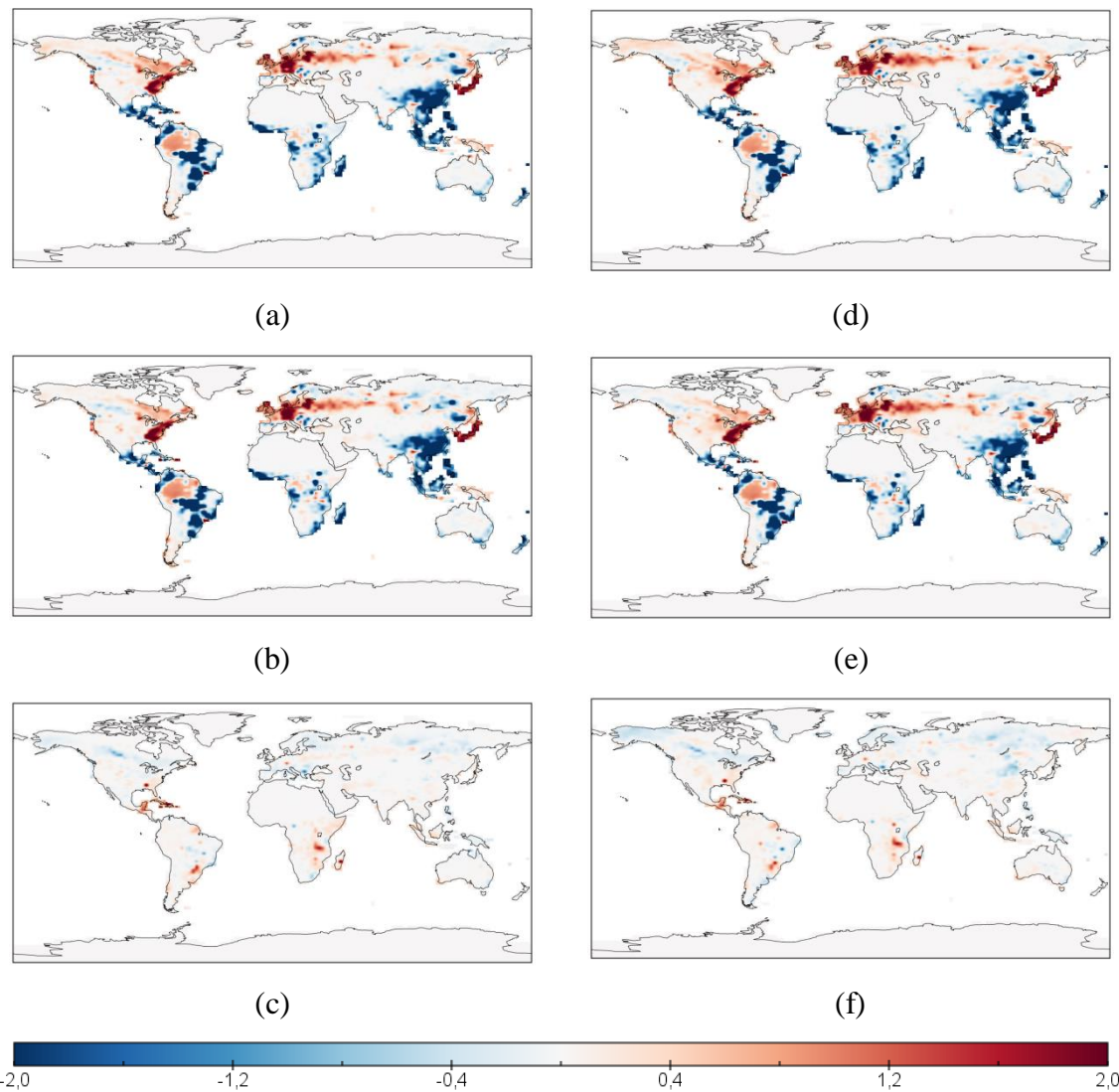


Figura 83 - Anomalias topo de dossel (m). Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (b), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (c) e (d), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (e) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as anomalias ficassem mais evidentes, sendo avaliadas, portanto, apenas qualitativamente.

As diferenças encontradas apenas nas anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre (Figura 84 a, d) e GSM – CTRL\_pre (Figura 84 b, e), sendo ausentes em GSM – CTRL\_pos (Figura 84 c, f), entre as PFTs relativas às árvores de folhas largas perenes de ambiente tropical geraram incerteza quanto à evolução das PFTs ao longo do horizonte de previsão dos experimentos.

Estes resultados deram indícios de que as PFTs seguem uma taxa fixa de variação, independentemente de forçantes dos modelos que compõem o sistema.

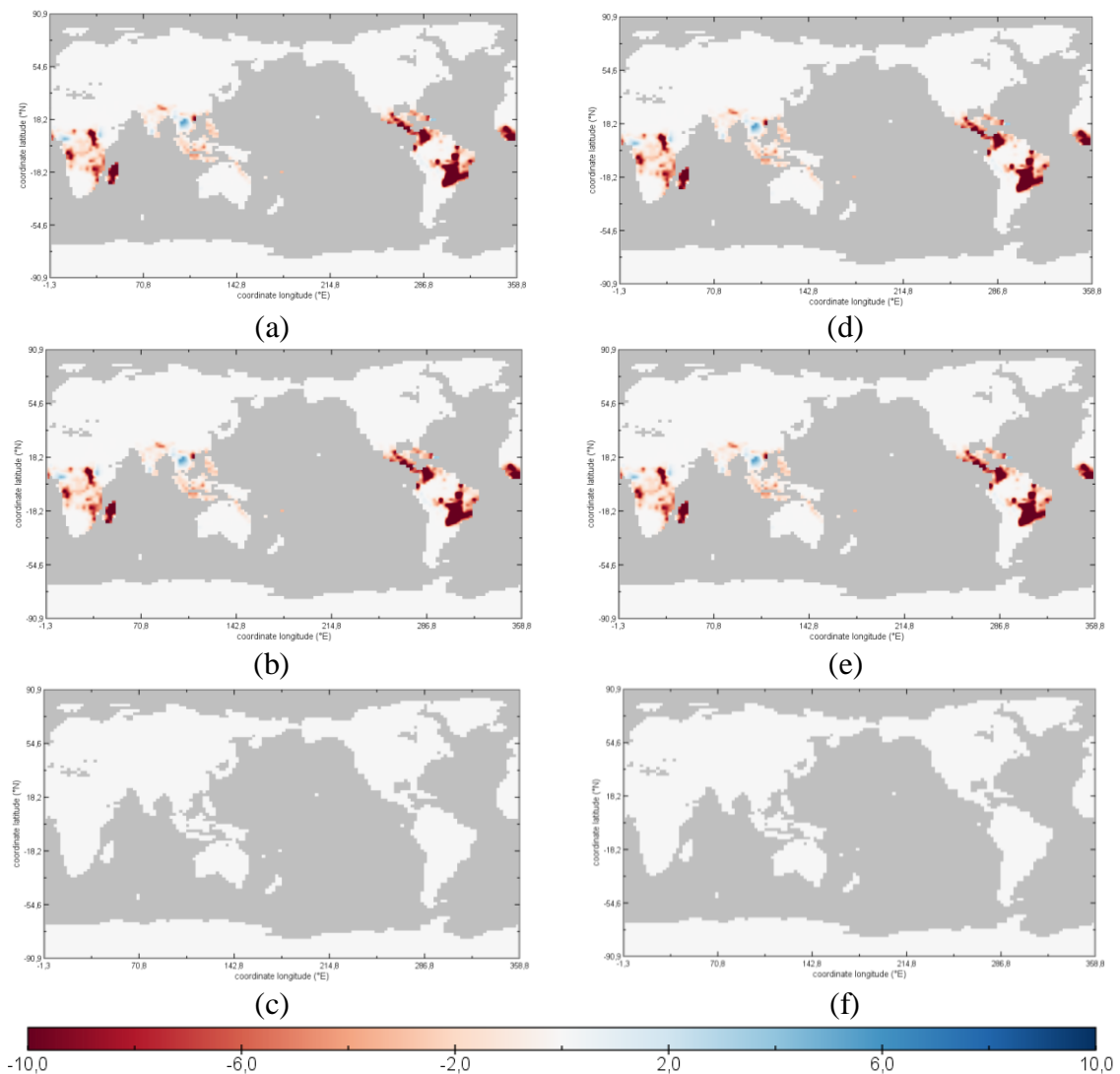


Figura 84 – Anomalias PFT relativo à árvores de folhas largas perenes tropicais. Os painéis à esquerda representam o mês de dezembro e os painéis à direita o mês de junho. Em (a) e (d), anomalias CTRL\_pos – CTRL\_pre. Em (b) e (e), anomalias GSM – CTRL\_pre e em (c) e (f), anomalias GSM – CTRL\_pos. A escala de cores foi ajustada para que as anomalias ficassem mais evidentes, sendo avaliadas, portanto, apenas qualitativamente.

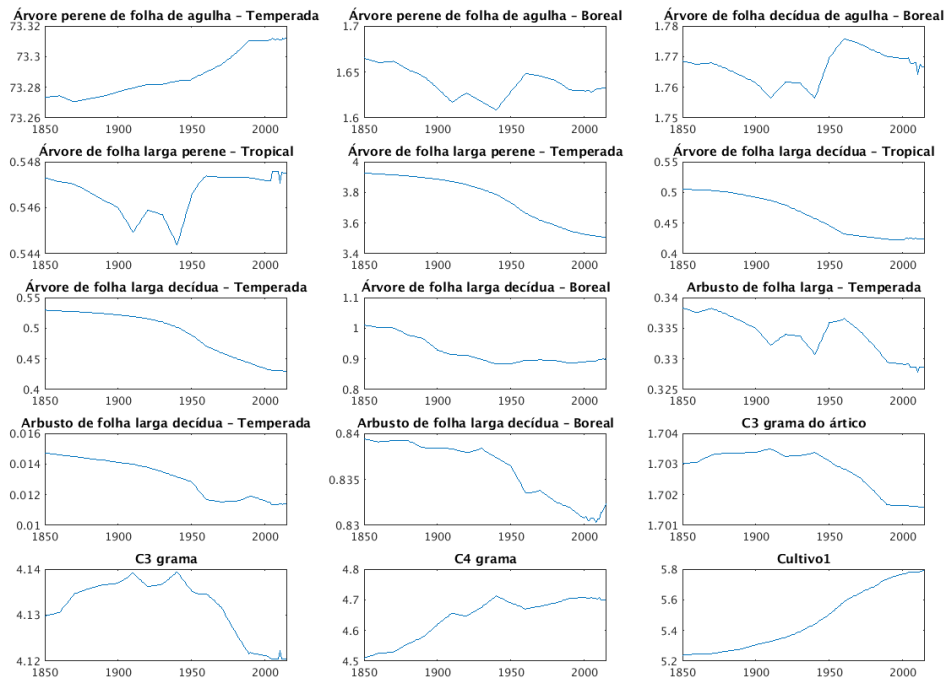
Por este motivo, foi necessário investigar como e se as PFTs variam ao longo da integração do modelo.

O CLM utiliza em sua inicialização um arquivo (landuse.timeseries\_1.9x2.5\_hist\_78pfts\_CMIP6\_simyr1850-2015\_c170824.nc) com séries temporais para cada ponto de grade com a evolução de todas as PFTs.

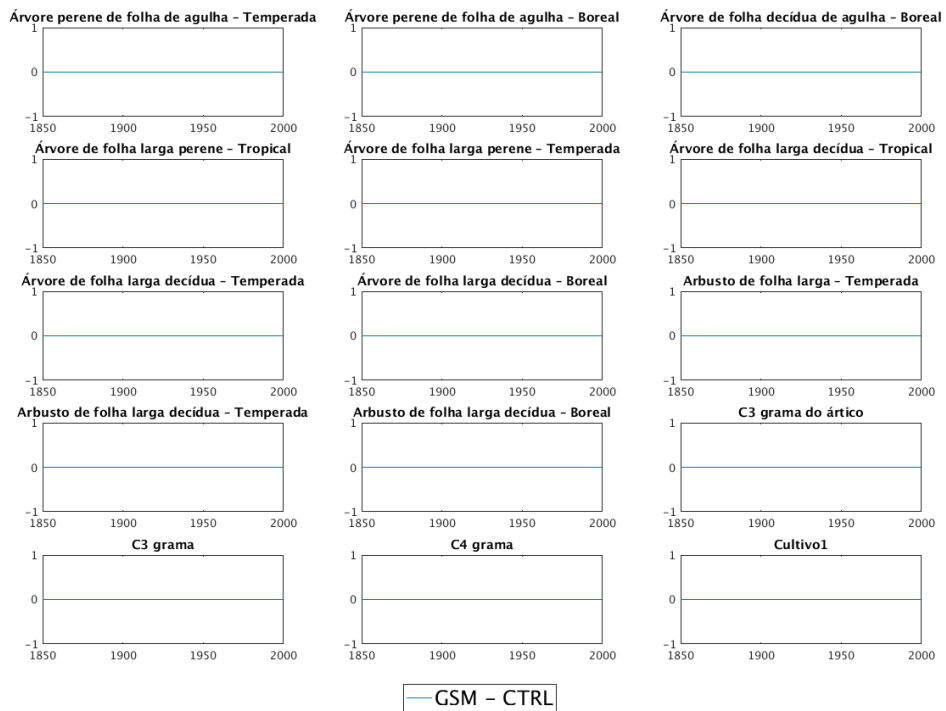
Na Figura 85 (a) são mostradas as séries temporais com as médias globais (médias calculadas em latitude e longitude) de cada PFT.

As séries indicam variações em todas as PFTs ao longo do tempo. Por outro lado, quando calculadas as anomalias das PFTs entre os experimentos GSM e CTRL (Figura 85 b), nota-se que as PFTs não se alteraram, indicando que são prescritas no modelo.

Portanto, as PFTs do CLM não evoluem de forma diferente quando o sistema é colocado sob a atuação de um forçante, mesmo sendo o solar.



(a)



(b)

Figura 85 - séries temporais com as médias globais (médias calculadas em latitude e longitude) de cada PFT, relativas aos tipos de vegetação do CLM. Em (a), séries temporais prescritas no modelo CLM. Em (b), as anomalias GSM – CTRL, indicando que todas as PFTs se mantêm ao longo das simulações.

### 5.13. Sumário dos resultados

Neste trabalho foram elaborados dois experimentos iniciais para testes do modelo de sistema terrestre CESM em sua versão 1.0. Os testes foram elaborados para verificar a correta instalação do modelo e suas respostas à grande alteração (+10%, que corresponde a  $+136 \text{ Wm}^{-2}$ ) do forçante solar. As primeiras verificações executadas foram com respeito às feições climáticas das médias zonais da pressão atmosférica e temperatura do caso controle (EXPi\_CTRL), sendo comparadas com as mesmas médias zonais provenientes das reanálises ERA-Interim e Reanálise II. As médias zonais apresentaram resultados bastante similares às reanálises e aos resultados encontrados na literatura utilizando a análise das médias zonais do comportamento médio das variáveis. Posteriormente foi verificado que os modelos componentes do CESM mostraram alterações nos resultados do experimento com o forçante solar modificado (EXPi\_TSI10p) em relação ao caso controle compatíveis com o aumento de energia disponível para o sistema. Com isso, considerou-se que o CESM poderia ser utilizado como ferramenta para investigar um cenário com forçante solar mais compatível com a realidade atual.

Foram elaborados dois experimentos com o novo forçante solar. Este novo forçante solar é o utilizado no CMIP6, que foi gerado com maior rigor, com um cenário mais similar às variações solares observadas desde o século XV e às projeções mais atuais de atividade solar.

O primeiro experimento, CTRL, foi executado com o forçante solar do CMIP6 sem alterações e utilizando o *compset* BHIST iniciando no ano 1850 e finalizando no ano 2000, que contém também aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  ao longo do tempo. Este experimento foi dividido em duas partes: CTRL\_pre, com início em 1850 e fim em 1950; e CTRL\_pos, com início em 1950 e fim em 2000.

O experimento CTRL apresentou características climáticas médias zonais compatíveis com as reanálises ERA-Interim e Reanálise 2, da mesma forma que o experimento controle inicial. Foram feitas análises das características verticais médias de vento e temperatura, além da verificação da disposição espacial das feições de altas e baixas pressões, além dos posicionamentos das regiões com maiores e menores temperaturas. Após a verificação da compatibilidade entre as feições avaliadas entre CTRL e as reanálises, considerou-se que a versão mais atual do CESM (versão 2.0) também poderia ser utilizada para simular o período de mínima atividade solar, com a vantagem de possuir versões mais atuais dos modelos componentes do sistema.

O segundo experimento, GSM, foi executado com o forçante solar do CMIP6 com alteração após o ano 1950, período no qual foi inserido um mínimo prolongado de mínima atividade solar para simular um período similar ao Mínimo de Maunder. O experimento GSM também contém aumento de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo.

A única diferença entre os experimentos CTRL e GSM é o forçante solar a partir do ano 1950.

Os campos de pressão atmosférica indicam grande variabilidade horizontal no período entre 1950 e 2000 (CTRL\_pos) em comparação ao período entre 1850 e 1950 (CTRL\_pre). Na região da América do Sul, foram encontradas anomalias positivas indicando aumento de pressão atmosférica em CTRL\_pos, que tem capacidade de provocar episódios de bloqueio atmosférico, com grandes impactos sócio-econômicos como os que ocorreram no Brasil em 2001 e 2014. Foi observado também um aumento da temperatura em diversos locais do globo, além do aumento de temperatura na atmosfera como um todo. Em relação ao vento, foi observado um deslocamento dos jatos em 200 hPa no sentido dos pólos. A região da ZCIT sobre o Atlântico apresentou mais precipitação em CTRL\_pos. Em todo o Brasil a precipitação é mais escassa, principalmente na região nordeste. Este resultado está de acordo com trabalhos que utilizaram dados observados e concluíram que a região nordeste vem apresentando sistematicamente diminuição na quantidade de chuva ao longo das últimas décadas. Estas alterações das características climáticas foram causadas pelo aumento da concentração do CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre, sendo esta a diferença entre o período do experimento CTRL\_pos em comparação ao período do experimento CTRL\_pre. A região do oceano Atlântico sudoeste indica um aumento da TSM na região da CBM. Portanto, o período entre 1950 e 2000 é mais aquecido nesta região quando comparado com o período entre 1850 e 2000. Na América do Sul o CTRL\_pos indica a presença mais de água líquida de maneira espalhada pelo continente, menor espessura de gelo nas regiões de altas latitudes e maior derretimento de gelo.

Os resultados do experimento GSM (entre 1950 e 2000) em relação à CTRL\_pre indicam também grande variabilidade horizontal de pressão atmosférica. De uma maneira geral as anomalias de pressão, temperatura e precipitação são mais suavizadas no experimento GSM em relação à CTRL\_pre. Entretanto, a intensificação dos possíveis episódios de bloqueios atmosféricos também está presente. Com relação à temperatura, foi observado que o período prolongado de mínima atividade solar causou uma desaceleração no aumento da temperatura global, mesmo o experimento GSM

estando sujeito ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub>. Na região da América do Sul, GSM apresenta mais água líquida do que CTRL\_pre, além de ser observado aumento da espessura de gelo próximo ao nordeste da Eurásia e na Groenlândia.

O experimento GSM, em relação à CTRL\_pos, resultou em intensificação da anomalia negativa de precipitação entre o experimento na região do norte e nordeste do Brasil. Portanto, mesmo em um cenário com menor energia disponível (simulado pela diminuição da TSI) para o sistema climático a região nordeste do Brasil sofre com menos chuvas do que o cenário atual (relativo ao experimento CTRL\_pos) já afetado com a diminuição de chuvas. A TSM na região da CBM também foi reduzida. Na região do Rio Amazonas é registrada maior quantidade de água em GSM, diferente do nordeste brasileiro, em que é verificada menor quantidade de água e maior espessura de solo seco. Em praticamente todo o Ártico há aumento da espessura de gelo.

A compilação dos resultados para a América do Sul é mostrada na Figura 86. Os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre utilizaram a TSI proveniente do CMIP6, como indicado na Figura 86 (a). O experimento GSM foi configurado com decréscimo na TSI, como indicado na Figura 86 (b).

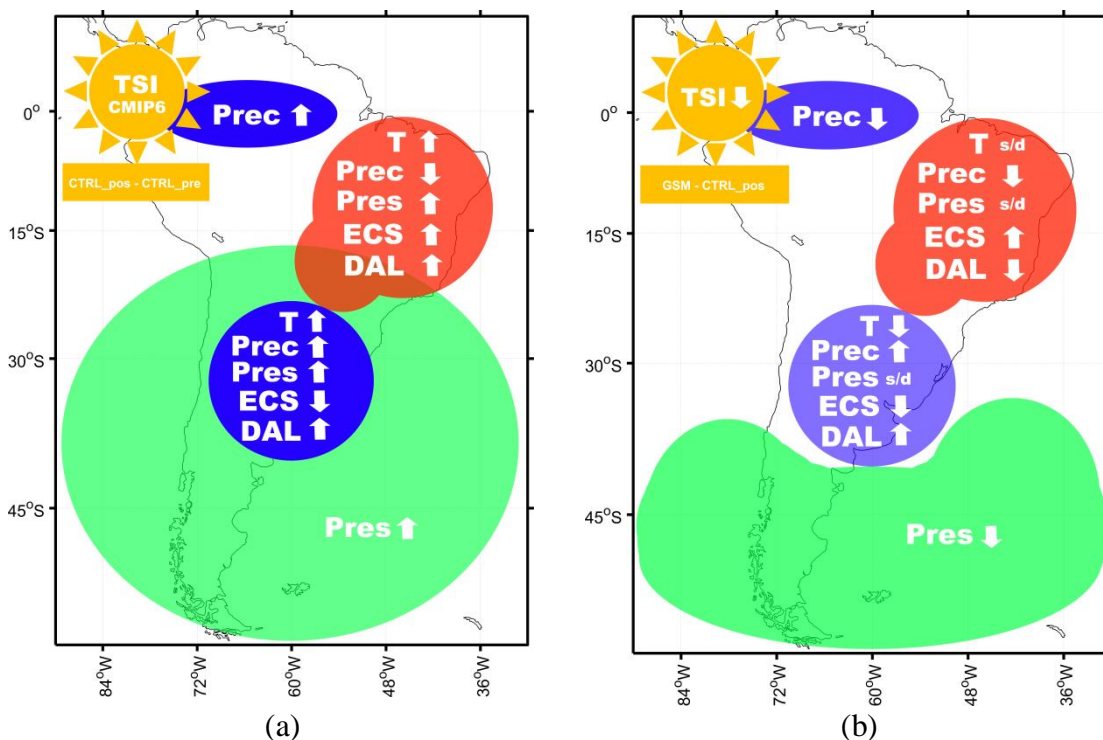


Figura 86 – Ilustrações com a compilação dos resultados das anomalias entre CTRL\_pos e CTRL\_pre em (a) e GSM e CTRL\_pos em (b). As setas indicam o aumento ou decréscimo de Temperatura a 2m de altura (T), Precipitação (Prec), Pressão atmosférica reduzida ao nível do mar (Pres), Espessura da camada seca (ECS) e Descarga direta de água líquida (DAL). A indicação s/d indica que não há diferença

entre os experimentos, cuja subtração é igual ou próxima de zero.

Os efeitos demonstrados nos resultados desta tese e compilados na Figura 86 (a), que corresponde às anomalias entre os experimentos CTRL\_pos e CTRL\_pre, ou seja, uma representação do clima atual, podem ser percebidos em dados observados publicados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (Figura 87).

As vazões fluviais observadas pelo operador apresentam diminuição na região nordeste e sudeste entre os períodos de 2013 a 2018 (Figura 87 b) quando comparados com o período entre 1993 e 2012 (Figura 87 a). Isto está de acordo com os resultados das anomalias dos experimentos (Figura 86 a), que mostram diminuição da precipitação, aumento de temperatura, pressão e espessura da camada seca. Este cenário é compatível com o aumento da anomalia da pressão atmosférica na região, com possibilidade de aumento da quantidade de bloqueios ou deslocamento da ASAS para oeste, adentrando mais o continente.

Na região sul o cenário é o oposto, registrando aumento nas vazões ao longo do tempo (Figura 87 b). Este cenário observado é compatível com as anomalias positivas de precipitação e descarga de água líquida, e anomalias negativas de espessura de camada seca para a região (Figura 86 a).

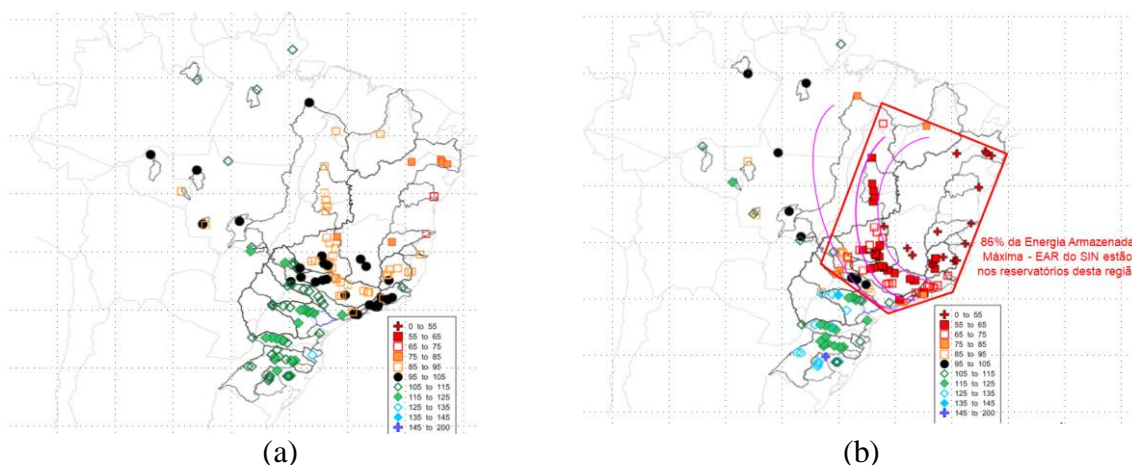


Figura 87 – representação das vazões naturais observadas no Sistema Integrado Nacional (SIN), em %MLT (Média de Longo Termo). Em (a), as vazões entre 1993 e 2012. Em (b), as vazões entre 2013 e 2018. Fonte: ONS

## 6. Conclusões

Os resultados deste trabalho reforçam que um futuro cenário de mínima atividade solar tem maiores impactos climáticos regionais do que globais. Estes impactos regionais com ênfase na América do Sul ou hemisfério sul como um todo ainda são pouco explorados na literatura, bem como as variações que ocorrem nos regimes de precipitação, pressão atmosférica, vento, etc., sendo os trabalhos atualmente publicados com foco apenas na temperatura do hemisfério norte, com poucas exceções.

A contribuição desta tese é aumentar compreensão dos impactos regionais na América do Sul e, desta forma, preencher uma lacuna de conhecimento sobre a região em um futuro cenário de mínima atividade solar.

O modelo de sistema terrestre escolhido para esta tese reproduziu com sucesso os padrões climáticos atuais, sendo uma importante ferramenta para estudos sobre o clima.

Os resultados dos experimentos demonstraram que o aumento da concentração do CO<sub>2</sub> na atmosfera causou aumento de temperatura global. Este aumento global na temperatura causou alterações climáticas regionais, cujos efeitos têm implicações na saúde humana, alimentação, energia, etc.

Apenas um período de mínima atividade solar, como algumas previsões indicam que pode ocorrer ainda neste século, não é capaz de reverter o aumento global de temperatura, sendo possível apenas desacelerá-lo.

Além disso, um período de mínima atividade também tem impactos climáticos regionais importantes, como diminuir ainda mais a precipitação no nordeste do Brasil e aumentar a temperatura na região central e nordeste do Brasil.

Quando comparados os resultados do experimento representativo do clima atual (CTRL\_pos) com dados de vazão fluvial observados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), percebe-se que são compatíveis. Esta compatibilidade permite concluir que as alterações climáticas devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera estão sendo percebidas atualmente e com reflexo nas vazões observadas nos últimos anos no Brasil.

Este trabalho teve como objetivo ampliar o conhecimento dos efeitos climáticos locais devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e à diminuição da energia disponível para o sistema terrestre, principalmente na região da América do Sul.

Apesar de serem verificados os impactos diretos nos componentes do sistema climático, sugere-se como trabalhos futuros que sejam realizados estudos similares a este com cenários futuros como os RCPs do IPCC, buscando obter mais projeções de possíveis cenários para auxiliar no planejamento de políticas públicas para mitigação dos impactos climáticos regionais. Estes estudos serão possíveis quando estiverem disponíveis os compsets do CESM relativos a estes cenários pois, até o presente momento só se encontra disponível no CESM um *compset* relativo ao cenário RCP8.5.

## 7. Referências

- ABREU, J. A., *et al.*, “For how long will the current grand maximum of solar activity persist?”, **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, pp. L20109, doi:10.1029/2008GL035442. 2008.
- ABREU, J.A., BEER, J., FERRIZ-Mas, A., MCCRACKEN, K.G. e STEINHILBER, F., “Is there a planetary influence on solar activity?”. **Astronomy & Astrophysics**, v. 548, p. A88. 2012.
- ANET, J. *et al.*, “ Impact of a potential 21st century grand solar minimum on surface temperatures and stratospheric ozone”, **Geophys. Res. Lett.** v. 40 pp. 4420–5. 2013.
- ASSAD, L. P. F., TORRES JR, A. R., ARRUDA, W. Z., MASCARENHAS JUNIOR, A. S., LANDAU, L., “Volume and Heat Transports in the World Oceans from an Ocean General Circulation Model”. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, v. 27, p. 181-194, 2009.
- BABCOCK, H. D., “The Sun's Polar Magnetic Field”, **ApJ**, v. 130, 264, 1959.
- BALDWIN, M.P., DUNKERTON, T.J., “Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes”. **Science** v. 294, pp 581–584, 2001.
- BALIUNAS, S. L., DONAHUE, R. A., SOON, W. H., HORNE, J. H., FRAZER, J., WOODARD-EKLUND, L., “Chromospheric variations in main-sequence stars”, **Astrophysical Journal, Part 1** (ISSN 0004-637X), v. 438, no. 1, pp. 269-287. 1995.
- BALIUNAS, S. L., JASTROW, R., “Evidence for long-term brightness changes of solar-type stars”, **Nature**, v. 348, pp. 520–523, 10.1038/348520a0. 1990.
- BARD, E., *et al.*, "Solar modulation of cosmogenic nuclide production over the last millennium: comparison between <sup>14</sup>C and <sup>10</sup>Be records." **Earth and Planetary Science Letters**, v. 150.3-4 pp. 453-462. 1997.
- BARD, E., RAISBECK, G., YIOU, F. e JOUZEL, J. “Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides”. **Tellus B**, v. 52: pp. 985-992. doi:10.1034/j.1600-0889.2000.d01-7.x. 2000.
- BARNARD, L., LOCKWOOD, M., HAPGOOD, M.A., OWENS, M.J., DAVIS, C.J. e STEINHILBER, F., “Predicting space climate change”. **Geophysical Research Letters**, 38(16). 2011.

- BEER, J, et al. “Temporal  $^{10}\text{Be}$  variations in ice”. **Radiocarbon**, v. 25 n. 2, pp. 269-278. 1983.
- BEER, J., *et al.*, “Use of  $^{10}\text{Be}$  in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity”, **Nature**, 347, 164–166. 1990.
- BELJAARS, A. C., BROWN, A. R. e WOOD, N. “A new parametrization of turbulent orographic form drag. Q.J.R.” **Meteorol. Soc.**, v. 130, pp. 1327-1347. doi:10.1256/qj.03.73, 2004.
- BENESTAD, R. E., **Solar activity and earth's climate**, Berlin, Springer-Verlag, 2006.
- BITZ, C. M., LIPSCOMB, W. H., “An energyconserving thermodynamic model of sea ice”. **J. Geophys. Res.**, 104 (C7), 15 669–15 677. 1999.
- BITZ, C. M., SHELL, K. M., GENT, P. R., et al., “Climate Sensitivity of the Community Climate System Model Version 4”, **Journal of Climate**, v. 25, pp. 3053–3070, doi:10.1175/JCLI-D-11-00290.1, 2012.
- BJERKNES V., “Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik”. **Meteorol. Zeit.** 21:1–7. 1904.
- BOGENSCHUTZ, P. A., *et al.*, “Higher-order turbulence closure and its impact on climate simulations in the community atmosphere model”. **Journal of Climate**, v. 26(23), pp. 9655–9676, 2013.
- BOND, G., *et al.*, “A pervasive millennial-scale cycle in the North Atlantic Holocene and glacial climates”. **Science**, v. 294, pp. 2130-2136. 1997.
- BOND, G., KROMER, B., BEER, J., MUSCHELER, R., EVANS, M. N., SHOWERS, W., HOFFMANN, S., LOTTI-BOND, R., HAJDAS, I., BONANI, G. “Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene”. **Science**, v. 278, pp. 1257-1266. 2001.
- BORGES, P. A., FRANKE, J., DO SANTOS SILVA, F.D., WEISS, H. E BERNHOFER, C., “Differences between two climatological periods (2001–2010 vs. 1971–2000) and trend analysis of temperature and precipitation in Central Brazil”. **Theoretical and applied climatology**, v116(1-2), pp.191-202. 2014.
- BRETHERTON, C. S., PARK, S. “A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model”. **J. Climate**, v. 22, pp. 3422–3448. 2009.
- BRIEGLEB, B. P., and LIGHT, B., A “Delta-Eddington multiple scattering parameterization for solar radiation in the sea ice component of the Community Climate System Model”. **NCAR Tech. Note NCAR/TN-4721+STR**, 100 pp. 2007.

- BRUECKNER, G. E., EDLOW, K. L., FLOYD, L. E., LEAN, J. L., VANHOOSIER, M. "The solar ultraviolet spectral irradiance monitor (SUSIM) experiment on board the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)." E., J. **Geophys. Res.**, v. 98, 10695. 1993.
- BURDEN, R. L., FAIRES, J. D., **Numerical Analysis**, PWS-KENT Publishing Company, 1989.
- BURLS, N.J., FEDOROV, A.V., "What controls the mean East–West Sea surface temperature gradient in the equatorial pacific: the role of cloud albedo." **Journal of Climate** v. 27, n.7, pp. 2757–2778. 2014.
- CAMPOS, E., *et al.*, "The South Atlantic and the Climate". **OCEANOBS99**, 20 pp. 1999.
- CATALDI, M., 2008, **Estudo numérico da influência das anomalias da TSM do atlântico sul extratropical e do pacífico equatorial no regime hidrometeorológico das regiões sul e sudeste do Brasil**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. <Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br>, acesso em: 01 de junho de 2016>.
- CATALDI, M., *et al.*, "Estudo da influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul extratropical na região da Confluência Brasil-Malvinas no regime hidrometeorológico de verão do Sul e Sudeste do Brasil". **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 25, p. 513-524, 2010.
- CESM User's Guide, <<http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/cesm/doc/usersguide/book1.html>, acesso em 10 de julho de 2016>
- CHABOYER, B., DEMARQUE, P., KERNAN, P. J., KRAUSS, L. M., "The Age of Globular Clusters in Light of Hipparcos: Resolving the Age Problem?", **The Astrophysical Journal**, v. 494, pp 96-110, 1998.
- CHABOYER, B., KIM, Y.-C., "The OPAL Equation of State and Low Metallicity Isochrones", **The Astrophysical Journal**, v. 454, pp. 767, 1995.
- CHAPMAN, W.L. e WALSH, J.E., "Recent Variations of Sea Ice and Air Temperature in High Latitudes". **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 74, pp. 33–48, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1993\)074<0033:RVOSIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1993)074<0033:RVOSIA>2.0.CO;2). 1993.
- CHARBONNEAU, P., "Dynamo models of the solar cycle". **Living Rev Solar Phys**, v. 7 (1), 3. doi:10. 12942/lrsp-2010-3. <http://www.livingreviews.org/lrsp-2010-3>. 2010.

- CHARBONNEAU, P., “Multi-periodicity, chaos, and intermittency in a reduced model of the solar cycle”. **Solar Phys** v. 199 pp. 385–404. 2001.
- CHARBONNEAU, P., “Solar Dynamo Theory”, **Annu. Rev. Astron. Astr.**, v. 52, pp. 251–290, <https://doi.org/10.1146/annurev-astro081913-040012>, 2014.
- CHARNEY, J. G., “On the scale of atmospheric motions”. **Geofysiske Publikasjoner**, v. 17(2), 17 pp. 1948.
- CHARVÁTOVÁ I. “Can origin of the 2400-year cycle of solar activity be caused by solar inertial motion?”. **Ann. Geophys.** V. 18, pp. 399–405, doi:10.1007/s00585-000-0399-x. 2000.
- CHARVÁTOVÁ, I. “Long-term predictive assessments of solar and geomagnetic activities made on the basis of the close similarity between the solar inertial motions”. **New Astron.** V. 14, pp. 25–30, 2009.
- CHARVÁTOVÁ, I. “Solar-terrestrial and climatic phenomena in relation to solar inertial motion”. **Surv. Geophys.** V. 18, pp. 131–146, 1997.
- CHAVE, A. D., “Computational Statistics in the Earth Sciences: With Applications in MATLAB”, **Cambridge University Press**, 451 p. 2017.
- CHELTON, D.B., SCHLAX, M.G., WITTER, D.L. e RICHMAN, J.G., “Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean”. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 95(C10), pp.17877-17903. 1990.
- CHIODO, G., GARCÍA-HERRERA, R., CALVO, N., VAQUERO, J.M., AÑEL, J.A., BARRIOPEDRO, D. e MATTHES, K., “The impact of a future solar minimum on climate change projections in the Northern Hemisphere”. **Environmental Research Letters**, 11(3), p.034015. 2016.
- CHOUDHURI, A. R., “Stochastic fluctuations of the solar dynamo”. **Astron Astrophys** v. 253, pp. 277–285. 1992.
- CHUN, Y., JEON, W. S., “Chugugi, Supyo, and Punggi: Meteorological instruments of the 15th century in Korea”. **History of Meteorology**, v. 2, pp. 25-36, 2005.
- CIOTTI, Á.M., ODEBRECHT, C., FILLMANN, G. e MOLLER Jr, O.O., “Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf.” **Continental shelf research**, v. 15(14), pp.1737-1756. 1995.
- CLETTE, F., *et al.* “Preface to topical issue: Recalibration of the sunspot number”. **Solar Physics**, 291.9-10: pp. 2479-2486. doi:10.1007/s11207-016-1017-8. 2016.

- CLETTE, F., LEFÈVRE, L., CAGNOTTI, M., CORTESI, S., BULLING, A., “The revised Brussels–Locarno sunspot number (1981 – 2015)”. **Solar Phys.** v. 291. 2016.
- CLETTE, F., SVALGAARD, L., VAQUERO, J.M., CLIVER, E.W., “Revisiting the Sunspot Number. A 400-year perspective on the solar cycle”. **Space Sci. Rev.** v. 186, p. 35. 2014.
- CLIVER, E. W., “Solar activity and geomagnetic storms: the corpuscular hypothesis”. *EOS* 75(52), pp. 609–613. 1994
- CLIVER, E. W.; CLETTE, F.; SVALGAARD, L. “Recalibrating the sunspot number (SSN): the SSN workshops”. **Cent. Eur. Astrophys. Bull**, 37.2: 401-416. 2013.
- CLIVER, E.W., CLETTE, F., SVALGAARD, L., VAQUERO, J.M., “Recalibrating the sunspot number (SN): the 3<sup>rd</sup> and 4th SN workshops. *Cent. Eur. Astrophys. Bull.* 39, 1. 2015.
- CODDINGTON, O., LEAN, J. L., PILEWSKIE, P., SNOW, M., e LINDHOLM, D., “A Solar Irradiance Climate Data Record”, **B. Am. Meteorol. Soc.**, v. 97, pp. 1265, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00265.1>, 2016.
- COELHO, Caio AS, *et al.* “The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections”. **Climate Dynamics**, v. 46.11-12, pp. 3737-3752. 2016.
- CONFALONIERI, U. E. C., “Regional climate change and human health in south America”, In: Instituto de Estudos Avançados da USP, **Dias, S., Ribeiro, W.C. and Nunes, L.H.**, A contribution to understanding the regional impacts of global change in South America, ed 1, II, São Paulo, USP, 2007.
- CONVEY, P. “Terrestrial biodiversity in Antarctica – recent advances and future challenges”. **Polar Sci.** v. 4, pp. 135–147. 2010.
- CUMINATO, J.A., MENENQUETTE JR., M., **Discretização de Equações Diferenciais Parciais, Técnicas de Diferenças Finitas**, SBMAC, 1996.
- DAMON, P. E., SONETT, C. P., **Solar and terrestrial components of the atmospheric 14C variation spectrum.** *The Sun in Time*, eds CP Sonett, MS Giampapa, and S Matthews (University of Arizona Press, Tucson), pp 360–388. (1991)
- DANI, T., e SULISTIANI, S.. "Prediction of maximum amplitude of solar cycle 25 using machine learning." **Journal of Physics: Conference Series.** v. 1231. No. 1. IOP Publishing, 2019.

- de VRIES, H., "Variation in concentration of radiocarbon with time and location on earth." **Proc. Koninkl. Nederl. Akad. Wetenschappen**, B 61, 1-9. 1958.
- DEMARQUE, P. R.; LARSON, R. B. The Age of Galactic Cluster NGC 188. **The Astrophysical Journal**, v. 140, 544. 1964.
- DOLE, S. H., **Habitable planets for man**, Blaisdel, New York, 1964.
- DYSON F. W., EDDINGTON A. S., DAVIDSON C., "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29", **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, v. 220 pp. 291-333; doi: 10.1098/rsta.1920.0009, 1919.
- EDDINGTON, A. S., **The Mathematical Theory of Relativity**, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1923.
- EDDY, J. A. , "The Maunder Minimum: a reappraisal", **Solar Phys.**, v. 89, 195. 1983.
- EDDY, J. A., "The Maunder Minimum", **Science**, v. 192, pp. 1189–1202, doi:10.1126/science.192.4245.1189. 1976.
- EGELAND, R., SOON, W., BALIUNAS, S., HALL, J. C., e HENRY, G. W., in **IAU Sym. 328, Living around Active Stars**, ed. D. Nandy, A. Valio, & P. Petit. Cambridge: Cambridge University Press, 329. 2017a
- EGOROVA, T., SCHMUTZ, W., ROZANOV, E., SHAPIRO, A.I., USOSKIN, I., BEER, J., TAGIROV, R.V., PETER, T., "Revised historical solar irradiance forcing". **Astronomy & Astrophysics**, 615, p.A85, 2018.
- EINSTEIN, A., "The Foundation of the General Theory of Relativity". **Annalen der Physik**. 49 (7): 769–822, doi:10.1002/andp.19163540702, 1916.
- ELIASSEN, A., "The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable". **Geofysiske Publikasjoner**, v. 17(3), 44 p. 1949.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. ERA-Interim Project, Monthly Means. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2012. <https://doi.org/10.5065/D68050NT>. Accessed† 04/04/2018.
- FELDSTEIN, S. B., "The recent trend and variance increase of the annular mode. J. Climate", v. 15, pp. 88–94. 2002
- FEULNER, G., e RAHMSTORF, S., "On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth Geophys". **Res. Lett.** v. 37 L05707. 2010.

- FEYNMAN, J., e A. RUZMAIKIN, “The Centennial Gleissberg Cycle and its association with extended minima”, **J. Geophys. Res. Space Physics**, v. 119, pp. 6027–6041, doi:10.1002/2013JA019478. 2014.
- FLANNER, M. G., ZENDER, C. S., RANDERSON, J. T., RASCH, P. J., “Present-day climate forcing and response from black carbon in snow”. **J. Geophys. Res.**, v 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003. 2007.
- FOUKAL, P. FROHLICH, C., SPRUIT, H., WIGLEY, T.M.L., “Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate", **Nature**, v. 443, pp. 161-166. 2006.
- FOUKAL, P. V. **Solar Astrophysics**, Wiley Interscience, New York. 1991.
- FRICK, P., GALYAGIN, D., HOYT, D. V., NESME-RIBES, E., SCHATTEN, K. H., SOKOLOFF, D., ZAKHAROV, V., “Wavelet analysis of solar activity recorded by sunspot groups”. **Astron Astrophys**, v. 328 pp. 670–681, 1997.
- FRIEDLI, T.K., “Homogenization of the Wolf series from 1749 to 2014”. **Solar Phys.** (submitted). 2016.
- FRÖHLICH, C. “Solar irradiance variability since 1978: Revision of the PMOD composite during solar cycle 21”, **Space Sci. Rev.**, v. 125, pp. 53–65, doi:10.1007/s11214-006-9046-5. 2006.
- FRÖHLICH, C., LEAN, J., “Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms”. **The Astronomy and Astrophysics Review**, 12(4), pp.273-320. 2004.
- GEORGIEVA, K., KIROV, B., KOUCKA KNIZOVA, P., MOSNA, Z., KOUBA, D., ASENOVSKA, Y., “Solar influences on atmospheric circulation”. **Journal of Atmos. Solar-Terr. Phys**, v. 90, pp. 15–25, 2012.
- GETTELMAN, A., MORRISON, H., GHAN, S. J., “A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3). Part II: Single-column and global results.” **J. Climate**, v. 21, pp. 3660–3679, 2008.
- GETTELMAN, A., e MORRISON, H., “Advanced two-moment bulk microphysics for global models. part i: off-line tests and comparison with other schemes”. **Journal of Climate**, v. 28(3) pp. 1268–1287, 2015.
- GHAN, S. J., e R. A. ZAVERI, “Parameterization of optical properties for hydrated internally-mixed aerosol”, **J. Geophys. Res.**, v. 112, DOI 10.1029/2006JD007927, 2007.

- GHAN, S., X. LIU, R. EASTER, P. *et al.*, “Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Comparative decomposition of aerosol direct, semi-direct and indirect radiative forcing”. **J. Climate**, v. 25, pp. 6461–6476, 2012.
- GILLETT, N., ZWIERS, F., WEAVER, A. *et al.*, “Detection of human influence on sea-level pressure”. **Nature**, v. 422, pp. 292–294. doi:10.1038/nature01487. 2003.
- GLEESON, L. J., AXFORD, W. I., “Solar modulation of galactic cosmic rays”. **Astrophys J.** v. 154, pp. 1011–1026. doi:10.1086/149822. 1968.
- GLEISER, M., **A ilha do conhecimento: os limites da ciência e a busca por sentido**, 1 ed. Brasil, Record, 2014.
- GLEISSBERG, W., “Evidence for a long solar cycle”. **The Observatory**, Vol. 66, p. 123-125. 1945.
- GLIESE, W., JAHREIß, H., “**Nearby Star Data Published 1969-1978**”, Astronomy & Astrophysics Supplement Series, v. 38, pp. 423–448, 1979.
- GOLAZ, J-C, *et al.*, “A pdf-based model for boundary layer clouds. part i: method and model description. Journal of the atmospheric sciences”, v. 59(24), pp. 3540–3551, 2002.
- GOLDENSON, N., DOHERTY, S. J., BITZ, C. M., *et al.*, “Arctic climate response to forcing from light-absorbing particles in snow and sea ice in CESM.” **Atmos. Chem. Phys.**, v. 12, pp. 7903-7920, doi:10.5194/acp-12-7903-2012, 2012.
- GORDON, A.L., “Brazil-Malvinas Confluence–1984. Deep Sea Research Part A”. **Oceanographic Research Papers**, v. 36 n.3, pp.359-384. 1989.
- GRAY, L. J., *et al.* “Solar influences on climate”, **Rev. Geophys.**, v. 48, RG4001, doi:10.1029/2009RG000282. 2010.
- GREEN, E. M., DEMARQUE, P., KING, C. R., **The revised Yale isochrones and luminosity functions**. The revised Yale isochrones and luminosity functions, New Haven: Yale Observatory, 1987, 1987.
- GREGORY, D., KERSHAW, R., e INNESS, P. M., “Parameterization of momentum transport by convection. II: Tests in single column and general circulation models”, **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, 5007 123, 1153–1184, 1997a
- GRIFFIES, S., BÖNING, C., BRYAN, F., *et al.*, “Developments in ocean climate modeling”, **Ocean Modelling**, v. 2, pp. 123–192. doi: 10.1016/S1463-5003(00)00014-7. 2000.

- GRIFFIES, S., HARRISON, M., PACANOWSKI, R., *et al.*, **A Technical Guide To Mom4. Relatório Técnico No. 5.**, GFDL Ocean Group NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2008.
- GUENTHER, D. B., DEMARQUE, P., KIM, Y.-C., PINSONNEAULT, M. H., “Standard solar model”, **Astrophysical Journal**, v. 387, pp. 372-393, doi: 10.1086/171090, 1992.
- GUENTHER, D. B., KIM, Y.-C., DEMARQUE, P., “Seismology of the Standard Solar Model: Tests of Diffusion and the OPAL and MHD Equations of State”, **Astrophysical Journal**, v. 463, pp. 382-390, 1996.
- GUENTHER, D., DEMARQUE, P., “Seismic Tests of the Sun's Interior Structure, Composition, and Age, and Implications for Solar Neutrinos”, **Astrophysical Journal**, v. 484, pp. 937-959, 1997.
- HAIGH J. D., “Climate Variability and the Influence of the Sun”, **Science**, v. 294, pp. 2109-2111, DOI: 10.1126/science.1067013. 2001.
- HAIGH, J.D., LOCKWOOD, M., GIAMPAPA, M.S., **The Sun, Solar Analogs and the Climate: Saas-Fee Advanced Course 34**, Swiss Society for Astrophysics and Astronomy (Vol. 34). Springer Science & Business Media. 2005.
- HALE, G. E.; NICHOLSON, SETH, B. “The law of sun-spot polarity”. **The Astrophysical Journal**, v. 62. pp 270. 1925.
- HALE, George E., *et al.* “The magnetic polarity of sun-spots”. **The Astrophysical Journal**, v. 49: 153. 1919.
- HART, M. H., “The evolution of the atmosphere of the Earth”, **Icarus**, v. 33, pp. 23-29, 1978.
- HARWIT, M., **Astrophysical Concepts**, 4 ed., Astronomy and Astrophysics Library, New York: Springer, 2006.
- HAZRA, G.e CHOUDHURI, A.R., “A New Formula for Predicting Solar Cycles”. **The Astrophysical Journal**, 880(2), p.113. 2019.
- HEASLEY, J. N., JANES, K. A., ZINN, R., DEMARQUE, P., DA COSTA, G. S., CHRISTIAN, C. A., “Hubble Space Telescope Photometry of the Metal-rich Globular Clusters NGC 6624 and NGC6637”, **AJ**, v. 120, pp. 879-893, 2000.
- HEIKKILÄ, U., e SMITH A. M., “Production rate and climate influences on the variability of <sup>10</sup>Be deposition simulated by ECHAM5-HAM: Globally, in Greenland, and in Antarctica”, **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 118, pp. 2506–2520, doi:10.1002/jgrd.50217. 2013.

- HIRZBERGER, J., KOSCHINSKY, M., KNEER, F., RITTER, C., “High resolution 2d-spectroscopy of granular dynamics”, **Astronomy and Astrophysics**, v. 367. pp. 1011–1021, 2001.
- HODGES, K.I., R.W. LEE, e L. BENGTTSSON,. “A Comparison of Extratropical Cyclones in Recent Reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25”. **J. Climate**, v. 24, pp. 4888–4906, <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4097.1>. 2011.
- HOLLAND, M. M., BAILEY, D. A. BRIEGLEB, B. P. *et al.*, “Improved sea ice shortwave radiation physics in CCSM4: The impact of melt ponds and aerosols on Arctic sea ice”. **J. Climate**, v 25, pp 1413–1430. 2012.
- HOLTSLAG, A. A. M., e BOVILLE, B. A., “Local versus nonlocal boundary layer diffusion in a global model”, **J. Climate**, v6, 1825–1842, 1993b.
- HOYT, D V.; SCHATTEN, K. H., “Group sunspot numbers: A new solar activity reconstruction”. **Solar physics**, 1998, v. 179.1, pp. 189-219.
- HOYT, D. V. e SCHATTEN, K. H. **The Role of the Sun in Climate Change**. Oxford Univ. Press, New York, 1997.
- HOYT, D. V., “Variations in sunspot structure and climate”, **Clim. Change**, v. 2, pp. 79-92, 1979.
- HOYT, D.V., SCHATTEN, K.H., “Group sunspot numbers: a new solar activity reconstruction”. **Sol. Phys.** v 179, pp. 189–219. 1998a.
- HUANG, S. “Merging information from different resources for new insights into climate change in the past and future”, **Geophys. Res. Lett.**, v. 31, L13205, doi:10.1029/2004GL019781. 2004.
- HUANG, S.-S., “Life outside the solar system”, **Sci. Am.**, v. 202(4), pp. 55-63, 1960.
- HUANG, S.-S., “Occurrence of life in the universe”, **Sci. Am.**, v. 47, pp. 397-402, 1959.
- HUNKE, E. C., “Thickness sensitivities in the CICE sea ice model”, **Ocean Modelling**, v. 34, p.p.137-149, ISSN 1463-5003. 2010.
- HUNKE, E. C., DUKOWICZ, J. K., “The elastic– viscous–plastic sea ice dynamics model in general orthogonal curvilinear coordinates on a sphere—Incorporation of metric terms”, **Mon. Wea. Rev.**, v. 130, pp. 1848–1865, 2002.
- HUNKE, E. C., LIPSCOMB, W. H., **CICE: The Los Alamos sea ice model, documentation and software, version 4.0**. In: Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LACC-06-012, 76 pp. 2008.

- HUNT, L. B., “The history of pressure responsive elements”, **Journal of Scientific Instruments**, v. 21, n. 3, pp. 37–42, 1944.
- HURRELL, J., et al., “The Community Earth System Model: A framework for collaborative research”, **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 94, pp. 1339–1360, doi:10.1175/BAMS-D-12-00121.1, 2013.
- IACONO, M. J., DELAMERE, J. S., MLAWER, E. J., SHEPPARD, M. W., CLOUGH, S. A., COLLINS, W. D., “Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models”. **J. Geophys. Res.**, v. 113, D13103, doi:10.1029/2008jd009944, 2008.
- INESON, S., *et al.*, “ Regional climate impacts of a possible future grand solar minimum” **Nat. Commun.** V. 6, pp 7535. 2015.
- INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION, Resolução B3, 2015, <Disponível em [https://www.iau.org/administration/resolutions/general\\_assemblies/](https://www.iau.org/administration/resolutions/general_assemblies/), acesso em: 25 de agosto de 2016>.
- IPCC 2013, **Summary for Policymakers**. 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, Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–30, doi:10.1017/CBO9781107415324.004, 2013.
- JACOBSON, M. Z., **Fundamentals of Atmospheric Modeling**, New York, Cambridge Univ. Press, 1999.
- JAVARAIHAH, J. “Sun’s retrograde motion and violation of even–odd cycle rule in sunspot activity”. **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** v. 362, pp. 1311–1324, 2005.
- JAVARAIHAH, J.; BERTELLO, L.; ULRICH, R. K. “Long-term variations in solar differential rotation and sunspot activity”. **Solar Physics**, 232.1-2: 25-40. 2005.
- JOHNSON, F. S., “The solar constant”. **J. Meteorol.**, v. 11, pp. 431–439, 1954.
- JONES, G.S., LOCKWOOD, M. e STOTT, P.A., “What influence will future solar activity changes over the 21st century have on projected global near-surface temperature changes?”. **J of Geophysical Research: Atmospheres**, 117(D5), D05103, doi:10.1029/2011JD017013. 2012
- JOSE, P. “Sun’s motion and sunspots”. **Astron. J.** v. 70, pp. 193–200, 1965.
- KALNAY, E., *et al.*, “The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project”. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 77, pp. 437-471. 1996.

- KANAMITSU, M., EBISUZAKI, W., WOOLLEN J., YANG, S.-K., HNILO, J. J., FIORINO, M., e POTTER, G. L., “NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)”, **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 83, pp. 1631-1643. 2002.
- KANE, R.P., “Some implications using the group sunspot number reconstruction”, **Solar Physics** v. 205, pp. 383–401, 2002.
- KÄPYLÄ, M. J., KÄPYLÄ, P. J., OLSPERT. N., BRANDENBURG. A., WARNECKE J., KARAK, B.B., PELT. J., “Multiple dynamo modes as a mechanism for long-term solar activity variations”. **Astron Astrophys** v. 589, A56. doi:10.1051/0004-6361/201527002. arXiv:1507.05417. 2016.
- KAROFF, C., *et al.*, “The Influence of Metallicity on Stellar Differential Rotation and Magnetic Activity”, **The Astrophysical Journal**, v. 852, article id. 46, 12 pp. 2018.
- KASTING, J. F., WHITMIRE D., P., REYNOLDS, R., T., “Habitable zones around main sequence stars”. **Icarus**, v. 101(1), pp. 108-28, 1993.
- KERN, A.K., *et al.*, “Strong evidence for the influence of solar cycles on a Late Miocene lake system revealed by biotic and abiotic proxies”. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.** v. 329, pp. 124–136. 2012.
- KIDSTON, J., G.K. VALLIS, S.M. DEAN, e J.A. RENWICK, “Can the Increase in the Eddy Length Scale under Global Warming Cause the Poleward Shift of the Jet Streams?”. **J. Climate**, v. 24, pp. 3764–3780, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3738.1>. 2011.
- KIEPENHEUER, K. O., “Solar Activity”, **The Sun**, The University of Chicago Press, Chicago, p. 322. 1953.
- KIM, Y.-C., DEMARQUE, P., KIM, Y.-C., ALEXANDER, D. R., “The Y2 Isochrones for  $\alpha$ -Element Enhanced Mixtures”, **Astrophysical Journal**, v. 143, pp. 499-511, 2002.
- KOPECKY, M., RUZICKOVA-TOPOLOVA, B., KUKLIN, G.V., “On the relative inhomogeneity of long-term series of sunspot indices”. **Bull. Astron. Inst. Czechoslov.** v. 31, pp. 267–283. 1980.
- KOPP, G., LEAN, J.L., “A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance”. **Geophys. Res. Lett.**, 38, L01706, doi: 10.1029/2010GL045777, 2011.
- KOVALTSOV, G. A.; USOSKIN, I. G.; MURSULA, K. “An upper limit on sunspot activity during the Maunder minimum”. **Solar Physics**, 224.1-2: 95-101. 2004.

- KOVATS, R.S., *et al.*, “Early effects of climate change: do they include changes in vector-borne disease?”. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 356 n.1411, pp.1057-1068. 2001.
- KRIVOVA N. A., BALMACEDA, L., SOLANKI, S., K. “Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux”, **Astronomy and Astrophysics**, v. 467, pp. 335-346, DOI: 10.1051/0004-6361:20066725. 2007
- KUCHARIK, C. J., BRYE, A. N. D. K. R., “Integrated Biosphere Simulator (IBIS) yield and nitrate loss predictions for Wisconsin maize receiving varied amounts of nitrogen fertilizer”. **J. Environ. Qual.**, v. 32, pp. 247–268. 2003.
- LAMARQUE, J.-F., EMMONS, L. K., HESS, P. G., *et al.*, “CAM-chem: description and evaluation of interactive atmospheric chemistry in the Community Earth System Model”. **Geosci. Model Dev.**, v. 5, pp. 369-411, doi:10.5194/gmd-5-369-2012, 2012.
- LAMB, H.H., “The early Medieval Warm Period and its sequel”. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 1, pp. 13-37. (1965).
- LAWRENCE, D. M., OLESON, K. W., FLANNER, M. G., *et al.*, “Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model”. **J. Adv. Model. Earth Syst.**, v. 3, M03001, doi:10.1029/2011MS000045, 2011.
- LAWRENCE, D., Fisher, R., Koven, C. *et al.*, “Technical Description of version 5.0 of the Community Land Model (CLM)”, **National Center for Atmospheric Research**. 2018
- LAXON, S., PEACOCK, N. e SMITH, D., “High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region”, **Nature**, v425(6961), p.947. 2003.
- LEAN, J, ROTTMAN, G., HARDER J., e KOPP, G., “SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability”, **Solar Physics**, v. 230, pp. 27–53. 2005.
- LEAN, J; BEER, J; BRADLEY, R., “Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change”. **Geophysical Research Letters**, v. 22.23, pp. 3195-3198. 1995.
- LEE, J. R., RAYMOND, B., BRACEGIRDLE, T.J., CHADES, I., FULLER, R.A., SHAW, J.D. e TERAUDS, A., “Climate change drives expansion of Antarctic ice-free habitat”. **Nature**, v. 547(7661), p.49. 2017.

- LEGECKIS, R. e GORDON, A.L., “Satellite observations of the Brazil and Falkland currents—1975 1976 and 1978. Deep Sea Research Part A”. **Oceanographic Research Papers**, v. 29(3), pp.375-401. 1982.
- LEGRAND, J. P., *et al.*, “Solar and auroral activities during the seventeenth century”. **Acta Geophysics and Geodetica Hungarica**, v. 27.2-4, pp. 251-282. 1992.
- LENTON, T.M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, J.W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., SCHELLNHUBER, H.J., “**Tipping elements in the Earth's climate system**”, Proceedings of the National Academy of Science, v. 105, n. 6, pp. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105, 2008.
- LETFUS V., “Sunspot and auroral activity during the maunder minimum”. **Solar. Phys.**, v. 197, pp. 203–213, 2000.
- LETFUS, V., “Solar activity in the sixteenth and seventeenth centuries (a revision)”. **Solar physics**, 145.2: 377-388. 1993.
- LETFUS, V., “Sunspot and auroral activity during Maunder Minimum”. **Solar Physics**, 197.1: 203-213. 2000.
- LEUSSU, R., USOSKIN, I.G., ARLT, R., MURSULA, K., “Inconsistency of the Wolf sunspot number series around 1848”. **Astron. Astrophys.** v. 559, pp. A28. 2013.
- LEVIS, S., BONAN, G. B., KLUZEK, E., *et al.*, “Interactive crop management in the Community Earth System Model (CESM1): Seasonal influences on land–atmosphere fluxes”. **J. Climate**, v. 25, pp. 4839–4859. 2012.
- LI, H.-Y., HUANG, M., TESFA, T., KE, Y., SUN, Y., LIU, Y., e LEUNG, L. R. ‘A subbasin-based framework to represent land surface processes in an Earth System Model’, **Geosci. Model Dev. Discuss.** 6:2699-2730. DOI:10.5194/gmdd-6-2699-2013.
- LIN, S.-J., ROOD, R. B., “Multidimensional flux form semi-lagrangian transport schemes”, **Mon. Wea. Rev.**, v. 124, pp. 2046–2070, 1996.
- LIU, X., EASTER, R. C., GHAN, S. J., ZAVERI, *et al.*, “Toward a minimal representation of aerosols in climate models: description and evaluation in the Community Atmosphere Model CAM5”. **Geosci. Model Dev.**, v. 5, pp. 709-739, doi:10.5194/gmd-5-709-2012, 2012.
- LIU, X., J. E. PENNER, S. J. GHAN, e M. WANG, “Inclusion of ice microphysics in the NCAR Community Atmosphere Model version 3 (CAM3)”, **J. Clim.**, v. 20, pp. 4526–4547, 2007.

- LOCKWOOD, M. “Solar change and climate: An update in the light of the current exceptional solar minimum”, **Proc. R. Soc. A**, 466(2114), pp. 303–329, doi:10.1098/rspa.2009.0519. 2010.
- LOCKWOOD, M., e OWENS, M. J., “Centennial changes in the heliospheric magnetic field and open solar flux: The consensus view from geomagnetic data and cosmogenic isotopes and its implications”, **J. Geophys. Res.**, v. 116, pp. A04109, doi:10.1029/2010JA016220. 2011.
- LOCKWOOD, M., HARRISON, R.G., OWENS, M.J., BARNARD, L., WOOLLINGS, T. e STEINHILBER, F., “The solar influence on the probability of relatively cold UK winters in the future”. **Environmental Research Letters**, 6(3), p.034004. 2011.
- LOCKWOOD, M., OWENS M. J., e BARNARD L., “Centennial variations in sunspot number, open solar flux, and streamer belt width: 1. Correction of the sunspot number record since 1874”, **J. Geophys. Res. Space Physics**, v. 119, pp. 5172–5182, doi:10.1002/2014JA019970. 2014.
- LOEHLE, C., McCULLOCH, J.H. “Correction to: a 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies”. **Energy Environ** v. 19, pp. 93–100, 2008.
- LORENZ, E. N., “Reflections on the Conception, Birth, and Childhood of Numerical Weather Prediction”. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**. v. 34(1) pp. 37-45. 2006.
- LUPO, A. R.; OGLESBY, R. J.; MOKHOV, I. I. “Climatological features of blocking anticyclones: A study of Northern Hemisphere CCM1 model blocking events in present-day and double CO<sub>2</sub> concentration atmospheres”. **Climate Dynamics**, v. 13.3: 181-195. 1997.
- LYNCH, P., “The ENIAC Forecasts: A Recreation”, **Bull. Amer. Met. Soc.**, v89, 45-55. 2008.
- LYNCH, P., LYNCH, O., “Forecasts by PHONIAC”, **Weather**, v63(11), pp.324-326. 2008.
- MACH, K.J., MASTRANDREA, M.D., BILIR, T.E., FIELD, C. B., “Understanding and responding to danger from climate change: the role of key risks in the IPCC AR5”, **Climatic Change**, v. 136, pp. 427-444. doi:10.1007/s10584-016-1645-x, 2016.

- MANN, M.E., ZHANG, Z., RUTHERFORD, S., BRADLEY, R.S., HUGHES, M.K., SHINDELL, D., AMMANN, C., FALUVEGI, G., Ni, F. “Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly”. **Science**, v. 27, pp. 1256–1260, 2009.
- MARSH, D. R., M. J. MILLS, D. E. KINNISON, J.-F. *et al.*, “Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1(WACCM).” **J. Climate**, v. 26, pp. 7372–7391, doi:10.1175/JCLI-D-12-00558.1, 2013.
- MARSHALL, G. J., “Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses”. **J. Climate**, 16, 4134–4143. 2003.
- MARTÍN-PUERTAS, C., BRAUER, A., DULSKI, P., BRADEMANN, B., Testing climate-proxy stationarity throughout the Holocene: an example from the varved sediments of Lake Meerfelder Maar (Germany)”, **Quaternary Science Reviews**, v. 58, pp. 56-65, 2012.
- MATTHES, F. E.. “Report of Committee on Glaciers, April 1939”. **Trans Am Geophys Union**, v. 20. Pp. 518–523. DOI:10.1029/TR020i004p00518. 1939.
- MATTHES, K., FUNKE, B., ANDERSSON, M. E., BARNARD, L., BEER, J., CHARBONNEAU, P., CLILVERD, M. A., DUDOK de Wit, T., HABERREITER, M., HENDRY, A., JACKMAN, C. H., KRETZSCHMAR, M., KRUSCHKE, T., KUNZE, M., LANGEMATZ, U., MARSH, D. R., MAYCOCK, A. C., MISIOS, S., RODGER, C. J., SCAIFE, A. A., SEPPÄLÄ, A., SHANGGUAN, M., SINNHUBER, M., TOURPALI, K., USOSKIN, I., VAN DE KAMP, M., VERRONEN, P. T., e VERSICK, S., “Solar forcing for CMIP6 (v3.2)”, **Geosci. Model Dev.**, 10, 2247-2302, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>, 2017.
- MAYCOCK, A., *et al.*, “Possible impacts of a future grand solar minimum on climate: stratospheric and global circulation changes” **J. Geophys. Res.** v. 120, pp. 9043–58. 2015.
- MCKINNON, J. A., **Rep. UAG-95, World Data Ctr.** A for Solar-Terr. Phys., Boulder, 112 pp. 1987.
- MEEHL, G.A., ARBLASTER, J.M. e MARSH, D.R., “Could a future “Grand Solar Minimum” like the Maunder Minimum stop global warming?”, **Geophysical Research Letters**, v40(9), pp.1789-1793. 2013.
- MENDES, M.C., TRIGO, R.M., CAVALCANTI, I.F. e DACAMARA, C.C., “Bloqueios atmosféricos de 1960 a 2000 sobre o oceano Pacífico Sul: impactos

- climáticos e mecanismos físicos associados”. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n.2, pp.175-190. 2005.
- MICHAELOWA, A., “National Research Council, Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises”, **Climatic Change**, v. 64, 377 pp, doi:10.1023/B:CLIM.0000025914.28822.26, 2004.
- MININNI., P. D., GÓMEZ, D.O., MINDLIN, G. B., “Simple model of a stochastically excited solar dynamo”. **Solar Phys.** v. 201 pp. 203–223. doi:10.1023/A:1017515709106. 2001.
- MITCHELL, D. L., “Effective diameter in radiation transfer: General definition, applications and limitations”, **J. Atmos. Sci.**, v. 59, pp. 2330–2346, 2002.
- MIYAHARA H., SOKOLOFF D, USOSKIN I. G., **The solar cycle at the Maunder minimum epoch**. In: Ip WH, Duldig M (eds) *Advances in geosciences, solar terrestrial (ST)*, World Scientific, Singapore, v. pp. 1–20. 2006b.
- MLAWER, E., S. TAUBMAN, P. BROWN, M. IACONO, e S. CLOUGH, “Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave”, **J. Geophys. Res.**, v. 102, pp. 16663–16682, 1997.
- MOKHOV, I. I.; TIMAZHEV, A. V. “Atmospheric Blocking and Changes in Its Frequency in the 21st Century Simulated with the Ensemble of Climate Models”. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 44.6, pp. 369-377. 2019.
- MOKHOV, I. I.; TIMAZHEV, A. V. “Model assessment of possible changes of atmospheric blockings in the Northern Hemisphere under RCP scenarios of anthropogenic forcings”. **Doklady Earth Sciences. Pleiades Publishing**, pp. 63-67. 2015.
- MONTMERLE, T., AUGEREAU J. C., CHAUSSIDON, M., GOUNELLE, M., MARTY, B., MORBIDELLI, A., “Solar system formation and early evolution: the first 100 million years”. In: **From Suns to Life: A Chronological Approach to the History of Life on Earth**, v. 98 pp. 39–95, Springer, New York, 2006.
- MORRISON, H., e A. GETTELMAN, “A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3), Part I: Description and numerical tests”, **J. Clim.**, v. 21 (15), pp. 3642–3659, 2008.
- MOSS, D., SOKOLOFF, D., USOSKIN, I. G., TUTUBALIN, V., “Solar grand minima and random fluctuations in dynamo parameters”. **Solar Phys** v. 250, pp. 221–234. doi:10.1007/s11207-008-9202-z. arXiv:0806.3331. 2008.

- MUSCHELER, R, *et al.* “Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records”. **Quaternary Science Reviews**, v. 26.1-2, pp. 82-97. 2007.
- NAGOVITSYN, Yu.A., “Solar activity during the last two millennia: Solar patrol in ancient and medieval China”, **Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.)**, v. 41, no. 5, pp. 680–688. 2001.
- NEALE, R. B., CHEN, C.-C., GETTELMAN, A., LAURITZEN, P. H., PARK, S., WILLIAMSON, D. L., CONLEY, A. J., GARCIA, R., KINNISON, D., LAMARQUE, J.-F., MARSH, D., MILLS, M., SMITH, A. K., TILMES, S., VITT, F., CAMERON-SMITH, P., COLLINS, W. D., IACONO, M. J., EASTER, R. C., GHAN, S. J., LIU, X., RASCH, P. J., TAYLOR, M. A., Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0), NCAR/TN-486+STR, 2010.
- NEALE, R. B., RICHTER, J., PARK, S., LAURITZEN, P. H., VAVRUS, S. J., RASCH, P. J., ZHANG, M., “The mean climate of the Community Atmosphere Model (CAM4) in forced SST and fully coupled experiments”, **J. Climate**, v. 26(14), pp. 5150–5168, doi:10.1175/JCLI-D-12-00236.1, 2013.
- NESME -RIBES, E., *et al.*, “Solar dynamics and its impact on solar irradiance and the terrestrial climate”, **J. Geophys. Res.**, v. 98(A11), pp. 18923–18935, doi:10.1029/93JA00305. 1993.
- NIELSEN, M.L., KJELDSEN, H., “Is cycle 24 the beginning of a Dalton-like minimum?”. **Solar Physics**, 270(1), p.385. 2011.
- NORDO, J., **A comparison of secular changes in terrestrial climate and sunspot activity**, **Rep. 5**, Videnskaps-Akademeits Inst. for Vaer-ag Klimatorskning, Oslo, 1955.
- OGURTSOV, M. G. “Solar Activity during the Maunder Minimum: Comparison with the Dalton Minimum”. **Astronomy Letters**, v. 44.4: pp. 278-288. 2018.
- OGURTSOV, M. G.; KOCHAROV, G. E.; NAGOVITSYN, Yu A.” Solar cyclicity during the Maunder minimum”. **Astronomy Reports**, 47.6: 517-524. 2003.
- OGURTSOV, M., NAGOVITSYN, Y., KOCHAROV, G. et al. "Long-period cycles of the Sun's activity recorded in direct solar data and proxies." **Solar Physics** v. 211 1-2 pp. 371-394. doi:10.1023/A:1022411209257. 2002.
- OGURTSOV, M.G. “Instrumental data on the sunspot formation in the 17th–18th centuries: Correct information or approximations”, **Geomagn. Aeron.**, v. 53, 663. <https://doi.org/10.1134/S0016793213050137>. 2013.

- OGURTSOV, M.G., “Solar Activity during the Maunder Minimum: Comparison with the Dalton Minimum”, **Astron. Lett.** v. 44, 278 p. <https://doi.org/10.1134/S1063773718040060>. 2018.
- OLÁH, K.; KŐVÁRI, Zs.; PETROVAY, K.; SOON, W.; BALIUNAS, S.; KOLLÁTH, Z.; VIDA, K., “Magnetic cycles at different ages of stars”, **Astronomy & Astrophysics**, v. 590, id.A133, 13 pp. 2016.
- OLESON, K. W., BONAN, G. B., FEDDEMA, J. *et al.*, “An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities”. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, v. 47, pp. 1038–1060, 2008.
- OLESON, K. W., *et al.*, “Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)”, **NCAR Tech. Note NCAR/TN-478+STR**, 257 p, 2010.
- OLIVEIRA FILHO, K.S., SARAIVA, M.F.O., **Astronomia e Astrofísica**, Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS, 2000. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/index.htm>, acesso em 13 de junho de 2016.
- ONOGI, K., *et al.*, “The JRA-25 Reanalysis”. **J. Meteor. Soc. Japan**, v85, 369–432. 2007.
- OSSENDRIJVER, M., “The dynamo effect of magnetic flux tubes”. **Astron Astrophys** 359:1205–1210. 2000.
- OTTO-BLIESNER, B. L., BRADY, E. C., FASULLO, J., JAHN, A., LANDRUM, L., STEVENSON, S., ROSENBLOOM, N., MAI, A., STRAND, G., “Climate variability and change since 850 C.E.: An ensemble approach with the Community Earth System Model (CESM)”. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 96, doi:10.1175/BAMS-D-14-00233.1, 2015.
- OWENS, M. J., *et al.*, “The Maunder minimum and the Little Ice Age: an update from recent reconstructions and climate simulations”, **J. Space Weather Space Clim.**, v. 7, A33 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/swsc/2017034>, 2017.
- PARK, S., BREHERTON, C. S., “The University of Washington shallow convection and moist turbulence schemes and their impact on climate simulations with the Community Atmosphere Model”, **J. Climate**, v. 22, pp. 3449–3469. 2009.
- PARKER, E., “Hydromagnetic dynamo models”, **Astrophysical Journal** v. 122, pp. 293–314. 1955.
- PEIXOTO, J. P., OORT, A. H., **Physics of Climate**, 3<sup>a</sup> ed., American Institute of Physics, New York, 1992.

- PERISTYKH, A. N., e DAMON, P. E., “Persistence of the Gleissberg 88-year solar cycle over the last 12,000 years: Evidence from cosmogenic isotopes”, **J. Geophys. Res.**, 108(A1), 1003, doi:10.1029/2002JA009390. 2003.
- PERRYMAN et. al, “The HIPPARCOS Catalogue”, **Astronomy and Astrophysics**, v. 323, pp. L49-L52, 1997.
- PERRYMAN, M.A.C., SCHULZE-HARTUNG, T. “The barycentric motion of exoplanet host stars Tests of solar spin–orbit coupling”. **Astron. Astrophys.** V. 525, pp. A65–A72, 2011.
- PESNELL, W.D. e SCHATTEN, K.H., “An early prediction of the amplitude of Solar Cycle 25”. **Solar Physics**, 293(7), p.112. 2018.
- PESNELL, W.D., “Predictions of solar cycle 24: How are we doing?”. **Space Weather**, v. 14(1), pp.10-21. 2016.
- PICKARD, G.L. e EMERY, W.J., **Intoductory Descriptive Physical Oceanography**. 5<sup>a</sup> Ed. Pergamon Press, Oxford, 329 pp. 1990.
- PINCUS, R. H. W. B., e J.-J. MORCRETTE, “A fast, flexible, approximation technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields”, **J. Geophys. Res.**, v. 108(D13), 4376, 2003.
- PINCUS, R., BARKER, H. W., MORCRETTE, J.-J., “A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous cloud fields”, **J. Geophys. Res.**, v. 108, p 4376, 2003.
- PLONER, S. R. O., SOLANKI, S. K., GADUN, A. S., “Is solar mesogranulation a surface phenomenon?”, **Astron. Astrophys.**, v 356 pp. 1050–1054, 2000.
- RADICK, R. R., LOCKWOOD, G. W., HENRY, G. W., HALL, J. C., e PEVTSOV, A. A., “Patterns of Variation for the Sun and Sun-like Stars”, **Astrophysical Journal**, v. 855, 75 p. 2018.
- RAISBECK, G. M. e YIOU, F. **Proc. Conf. on Ancient Sun** (eds Pepin, R. O., Eddy, J. A. & Merrill, R. B.). Pergamon, New York. pp. 185–190. 1980.
- RAISBECK, G. M., *et al.*, “<sup>10</sup>Be and <sup>3</sup>H in polar ice cores as a probe of the solar variability's influence on climate”, **Philos. T. R. Soc. Lond.**, v. 330, pp. 65–72. 1990.
- RAISBECK, G. M., *et al.*, “<sup>10</sup>Be evidence for the Matuyama-Brunhes geomagnetic reversal in the EPICA Dome C ice core”, **Nature**, v. 444, pp. 82–84, doi:10.1038/nature05266. 2006.

- RAPP, D., **Assessing climate change**. Cham: Springer International Publishing; <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00455-6>. 2014.
- RASCH, P. J. **Climate change modeling methodology: selected entries from the Encyclopedia of sustainability science and technology**. Springer, New York. ISBN: 978-1-4614-5766-4. 2012.
- RASCH, P. J., KRISTJÁNSSON, J. E., “A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations”, **J. Climate**, 11, 1587–1614, 1998.
- RASOOL, S.I., DE BERGH, C., “The runaway greenhouse and the accumulation of CO<sub>2</sub> in the Venus atmosphere”. **Nature**, v. 226, pp. 1037-1039, doi:10.1038/2261037a0, 1970.
- RAYMOND, D. J., e BLYTH, A. M., “A stochastic mixing model for non-precipitating cumulus clouds”, **J. Atmos. Sci.**, 43, 2708–2718, 1986.
- RAYMOND, D. J., e BLYTH, A. M., “Extension of the stochastic mixing model to cumulonimbus clouds”, **J. Atmos. Sci.**, 49, 1968–1983, 1992.
- REID, G. C. ‘Solar total irradiance variations and the global sea surface temperature record’. **J. Geophys. Res.** v. 96, D2, 2835–2844. 1991.
- REID, G. C., “Influence of solar variability on global sea surface temperatures”, *Nature*, v. 329, pp. 142-143, doi: 10.1038/329142a0, 1987.
- RIBES, J. C., e NESME-RIBES, E. “The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715”, **Astronomy and Astrophysics**, Vol. 276, pp. 549. 1993.
- RIBES, J. C.; NESME-RIBES, “E. The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715”. **Astronomy and Astrophysics**, v. 276, 549. 1993.
- RICHTER, J. H., e RASCH, P. J., “Effects of convective momentum transport on the atmospheric circulation in the community atmosphere model, version 3”, **J. Climate**, 21, 1487–1499, 2008.
- RIND, D., “The Sun's Role in Climate Variations”, **Science**, v. 296, pp. 673-677. 2002
- RIENECKER, M. M., et al., “MERRA: NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications”. **J. Climate**, v24, 3624–3648, 2011.
- RIVIÈRE, G., “A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios”. **J. Atmos. Sci.**, v. 68, pp. 1253–1272, <https://doi.org/10.1175/2011JAS3641.1>. 2011.

- ROTH, R., e JOOS, F., “A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the holocene 14 c and co 2 records: implications of data and model uncertainties”, **Clim. Past** v. 9, pp. 1879–909. 2013
- ROTHROCK, D. A., “The energetics of the plastic deformation of pack ice by ridging”. **J. Geophys. Res.**, v. 80 (33), pp 4514–4519, 1975.
- ROZELOT, J.P., DAMIANI, C., LEFEBVRE, S. “Variability of the solar shape (before space dedicated missions)”, **Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics**, v. 71, pp. 1683-1694. 2009.
- RUSSELL, C. T., LUHMANN, J. G., e JIAN, L. K. “How unprecedented a solar minimum?”, **Rev. Geophys.**, 48, RG2004, doi:10.1029/2009RG000316. 2010.
- RUTT, I. C., HAGDORN, M., HULTON, N. R. J., PAYNE, A. J., (2009), “The Glimmer community ice sheet model”. **J. Geophys. Res.**, v. 114, F02004, 22 pp. doi:10.1029/2008JF001015.
- SACKMANN, I.-J., BOOTHROYD, A. I., KRAEMER, K. E., “Our sun. III. Present and Future”, **Astrophysical Journal**, v. 418, pp. 457-468, 1993.
- SACKS, W. J., COOK, B. I., BUENNING, N., *et al.*, “Effects of global irrigation on the near-surface climate”, **Climate Dyn.**, v. 33, pp 159–175, doi:10.1007/s00382-008-0445-z, 2009.
- SANCHO, L. M. B., 2016, **Avaliação do potencial de ruptura do cenário RCP 8.5 do IPCC na circulação termohalina do oceano atlântico**. Qualificação de Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SANCHO, L.M.B., de FREITAS ASSAD, L.P. e LANDAU, L., “Volume and heat transports analysis in the South Atlantic Basin related to climate change scenarios”. **Brazilian Journal of Geophysics**, 33(2), pp.333-348. 2015.
- SCHATTEN, K. H., e OROSZ, J. A. “A model for solar constant secular changes”, **Sol. Phys.**, 15, 179-184, 1990.
- SCHMITT, D., SCHÜSSLER, M., FERRIZ-Mas., “A Intermittent solar activity by an on-off dynamo”. **Astron Astrophys** 311:L1–L4. 1996.
- SCHOVE, D. J. “The sunspot cycle, 649 BC to AD 2000”. **Journal of Geophysical Research**, 60.2: 127-146. 1955.
- SCHRIJVER, C. J., *et al.*, “The minimal solar activity in 2008–2009 and its implications for long-term climate modeling”, **Geophys. Res. Lett.**, v. 38, L06701, doi:10.1029/2011GL046658. 2011.

- SCHRÖDER, W. “Auroral frequency in the 17th and 18th centuries and the ‘Maunder minimum’”. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 41.5: pp. 445-446. 1979.
- SCHÜSSLER M, SCHMITT D, FERRIZ-MAS, A., **Long-term variation of solar activity by a dynamo based on magnetic flux tubes**. In: Schmieder B, del Toro Iniesta JC, Vázquez M (eds) 1st Advances in solar physics euroconference: advances in the physics of sunspots, astronomical society of the Pacific, San Francisco, ASP Conference Series, vol 118, pp 39–44. 1997.
- SCHÜSSLER, M., CALIGARI. P., FERRIZ-MAS A., MORENO-INSERTIS, F., “Instability and eruption of magnetic flux tubes in the solar convection zone”. **Astron Astrophys** v. 281, pp. L69–L72. 1994.
- SCHWABE, S. H., “Die Sonne”. **Astron. Nachr.**, v. 20. pp. 283–286. 1843.
- SCOLES, S., “Scientists tackle a burning question: When will our quiet sun turn violent?”, **Science Magazine**, v.364, n.6443 (Mai), pp.818-821. 2019.
- SHAPIRO, A. I., *et al.*, “A new approach to the long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical solar forcing”. **Astronomy & Astrophysics**, 529: A67. 2011.
- SHAPIRO, A. I.; SOLANKI, S. K.; KRIVOVA, N. A.; TAGIROV, R. V.; SCHMUTZ, W. K., “The role of the Fraunhofer lines in solar brightness variability”, **Astronomy & Astrophysics**, v. 581, id.A116, 9 pp. 2015.
- SHAPLEY, A. H., “Reduction of sunspot-number observations”. **Publ. Astron. Soc. Pac.** v. 61, pp. 13–21. 1949
- SHEPHERD, S.J., ZHARKOV, S.I. e ZHARKOVA, V.V., “Prediction of solar activity from solar background magnetic field variations in cycles 21-23”. **The Astrophysical Journal**, 795(1), p.46. 2014.
- SHINDELL, D. T., “Climate and ozone response to increased stratospheric water vapor”, **Geophys. Res. Lett.**, v. 28, pp. 1551, 10.1029/1999GL011197. 2001
- SHINDELL, D. T., *et al.* “Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum”. **science**, 294.5549, pp. 2149-2152. 2001.
- SHIRLEY, J.H. “Axial rotation, orbital revolution and solar spin–orbit coupling”. **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** v. 368, pp. 280–286, 2006.
- SILVA, V.D.P.R., “On climate variability in Northeast of Brazil”. **Journal of Arid Environments**, 58(4), pp.575-596. 2004.

- SIMMONS, A., UPPALA, S. DEE, D. e KOBAYASHI, S. **ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards**. ECMWF Newsletter, No. 110, ECMWF, Reading, United Kingdom, 25–35. 2007.
- SINGH, A.K. e BHARGAWA, A., “Prediction of declining solar activity trends during solar cycles 25 and 26 and indication of other solar minimum”. **Astrophysics and Space Science**, 364(1), p.12. 2019.
- SMITH, R. D., et al., “The Parallel Ocean Program (POP) reference manual: Ocean component of the Community Climate System Model (CCSM) and Community Earth System Model (CESM)”. **Los Alamos National Laboratory Tech. Rep. LAUR-10-01853**, 141 pp., 2010.
- SOKOLOFF, D. “The Maunder minimum and the solar dynamo”. **Solar Physics**, 224.1-2: 145-152. 2004.
- SOKOLOFF, D., “The Maunder minimum and the solar dynamo”. **Solar Phys**, v. 224 pp. 145–152. doi:10.1007/s11207-005-4176-6. 2004.
- SOLANKI, S.K. e KRIVOVA, N.A., “Analyzing solar cycles”. **Science**, 334(6058), pp.916-917. 2011.
- SOLANKI, S.K., USOSKIN, I.G., KROMER, B., SCHÜSSLER, M. e BEER, J., “Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years”. **Nature**, v. 431(7012), p.1084. 2004.
- SONG, X., LUBIN, D. e ZHANG, G.J., “Increased greenhouse gases enhance regional climate response to a Maunder Minimum”, **Geophysical Research Letters**, 37(1). 2010.
- SONNET, C. P., FINNEY S. A., “The spectrum of radiocarbon”. **Philos Trans R Soc London Ser A** v. 330 pp. 413–425. doi:10.1098/rsta.1990.0022. 1990.
- SPÖRER, F. W. G., “Sur les différences que présentent l'hémisphère nord et l'hémisphère sud du soleil”, **Bull. Astron.** V. 6, 60 p. 1889.
- SPÖRER, G. **Ueber die Periodicität der Sonnenflecken seit dem Jahre 1618, vornehmlich in Bezug auf die heliographische Breite derselben, und Hinweis eine erhebliche Störung dieser Periodicität während eines langen Zeitraumes**. Ksl. Leop. Carol. Deutschen Akademie der Naturforscher, 1889.
- STEINER, O., GROSSMANN-DOERTH, U., SCHÜSSLER, M., KNÖLKER, M., “Dynamical interaction of solar magnetic elements and granular convection: results of numerical simulation”. **Astrophys. J.**, v. 495, pp. 468-484, 1998.

- STEINHILBER F, *et al.* "9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings". **Proc Natl Acad Sci USA** v. 109(16), pp. 5967–5971. 2012.
- STEINHILBER, F., ABREU, J. A., e BEER, J., "Solar modulation during the Holocene." **Astrophys Space Sci. Trans.**, 4, 1. 2008.
- STEINHILBER, F., ABREU, J.A., BEER, J., BRUNNER, I., CHRISTL, M., FISCHER, H., HEIKKILÄ, U., KUBIK, P.W., MANN, M., MCCRACKEN, K.G. e MILLER, H., "9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings". **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109(16), pp.5967-5971. 2012.
- STEINHILBER, F., BEER, J., FRÖHLICH, C., "Total solar irradiance during the Holocene". **Geophysical Research Letters**, 36.19. 2009.
- STEPHENS, G. L., LI, J., WILD, M., CLAYSON, C. A., LOEB, N., KATO, S., L'ECUYER, T., STACKHOUSE, P. W., LEBSOCK, M., ANDREWS, T., "An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations", **Nat. Geosci.**, 5(10), 691–696, doi:10.1038/ngeo1580, 2012.
- STOCKER, T., **Introduction to Climate Modelling**, Verlag Berlin Heidelberg, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-00773-6, 2011.
- STOTT, P. A., JONES, G. S., e MITCHELL, J. F. B., "Do models underestimate the solar contribution to recent climate change?", **J. Clim.**, v. 16, pp. 4079. 2003
- STRASSBURGER, A. S., MENEZES, A. J. E. A., PERLEBERG, T. D., EICHOLZ, E. D., MENDEZ, M. E. G., SCHÖFFEL, E. R., "Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática". **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, pp. 273-278. doi:10.1590/S0102-77862011000200011, 2011.
- STUIVER, M; REIMER, P. J., "Extended 14 C data base and revised CALIB 3.0 14 C age calibration program". **Radiocarbon**, v. 35.1. pp. 215-230. 1993.
- STUIVER, Q., QUAY, P.D. "A 1600 year long record of solar change derived from atmospheric 14C levels". **Sol. Phys.** V. 74, pp. 479–481, 1981.
- SUESS, H. E, "The radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years." **Radiocarbon**. v. 22, 200-209. 1980.
- SUESS, S. T., "The solar wind – inner heliosphere", **Space Sci. Rev.**, v. 83 pp. 75–86, 1998.
- SUKYOUNG, K. Yi; K., Yong-Cheol; DEMARQUE, P., "The Y2 stellar evolutionary tracks". **The Astrophysical Journal Supplement Series**, 144.2: 259. 2003.

- SVALGAARD, L., e SCHATTEN, K.H.. “Reconstruction of the sunspot group number: the backbone method”. **Sol. Phys.**, v. 291, pp. 2653–2684, DOI: 10.1007/s11207-015-0815-8. 2016.
- SVALGAARD, L., SCHATTEN, K.H., “Reconstruction of the sunspot group number: the Backbone method”. **Solar Phys.** v. 291. 53 pp. 2016.
- SWENSON, S. C., e LAWRENCE, D. M. “Assessing a dry surface layer-based soil resistance parameterization for the Community Land Model using GRACE and FLUXNET-MTE data”, **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 119, pp. 10,299– 10,312, doi:10.1002/2014JD022314. 2014.
- TAPPING, K. F., *et al.* “Solar magnetic activity and total irradiance since the Maunder Minimum”. **Solar Physics**, 246.2: 309-326. 2007.
- THÉPAUT, J.-N., R. HOFFMAN, e P. COURTIER, “Interactions of dynamics and observations in a four-dimensional variational assimilation”. **Mon. Wea. Rev.**, v. 121, pp. 3393–3414. 1993.
- THIÉBLEMONT, R., MATTHES, K., OMRANI, N-E, *et. al.*,. “Solar forcing synchronizes decadal North Atlantic climate variability”. **Nature Communications**, doi: 10.1038/ncomms, 9268, 2015.
- THOMPSON, B. J., WEBB, D., “The whole heliosphere interval in the context of a long and structured solar minimum: an overview from sun to earth”. **Solar Phys**, v. 274, pp. 5–27. doi:10.1007/s11207-011-9921-4. 2011.
- THOMPSON, D.W., WALLACE, J.M., e HEGERL, G.C., “Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part II: Trends.” **J. Climate**, v. 13, pp. 1018–1036, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1018:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1018:AMITEC>2.0.CO;2). 2000.
- THORNDIKE, A. S., ROTHROCK, D. A., MAYKUT, G. A., COLONY, R., “The thickness distribution of sea ice”. **J. Geophys. Res.**, v. 80 (33), pp 4501–4513. 1975.
- THORNE, P.W., *et al.*, “Toward an integrated set of surface meteorological observations for climate science and applications”. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98(12), pp.2689-2702. 2017.
- THORNTON, P. E., LAMARQUE, J.-F. ROSENBLUM, N. A. and MAHOWALD, N. M. “Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO<sub>2</sub> fertilization and climate variability”. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 21, GB4018, doi:10.1029/2006GB002868, 2007.

- TRENBERTH, K. E., FASULLO, J. T., KIEHL, J., “Earth’s global energy budget”, **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 90(3), pp. 311–323, doi:10.1175/2008bams2634.1, 2009.
- TRENBERTH, K., *et al.*, “Observations: Surface and atmospheric climate change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, **S. Solomon et al.**, Eds., Cambridge University Press, 235–336. 2007.
- TRENBERTH, K.E.; ANTHES, R.A.; BELWARD, A.; BROWN, O.B.; HABERMANN, T.; KARL, T.R.; RUNNING, S.; RYAN, B.; TANNER, M.; WIELICKI, B., “Challenges of a Sustained Climate Observing System” In: ASRAR, G.R.; HURREL, J.W. (eds), **Climate Science for Serving Society: Research, Modelling and prediction Priorities**. Springer, pp. 13-50, doi: 10.1007/978-94-007-6692-1, 2013.
- USOSKIN, I G.; MURSULA, K.; KOVALTSOV, G. A., “Heliospheric modulation of cosmic rays and solar activity during the Maunder minimum”. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 106.A8: 16039-16046. 2001.
- USOSKIN, I. G., K. MURSULA, and G. A. KOVALTSOV, “Sunspot activity during the Maunder minimum”, **Astron. Astrophys.**, v. 354, L33 –L36, 2000.
- USOSKIN, I. G., MURSULA, K., e KOVALTSOV, G. A., “Cyclic behaviour of sunspot activity during the Maunder minimum”, **A&A**, 354, L33, 2000.
- USOSKIN, I., SOLANKI, S. e KOVALTSOV, G., “Grand minima and maxima of solar activity on multi-millennial scale”. **In 37th COSPAR Scientific Assembly**. v. 37, p. 3264. 2008.
- USOSKIN, I.G. “A history of solar activity over millennia”, **Living Rev. Sol. Phys.** v. 14, 3, doi:10.1007/s41116-017-0006-9. 2017.
- USOSKIN, I.G. “A history of solar activity over millennia”. **Living Rev. Sol. Phys.** V. 5 (3), 2008.
- USOSKIN, I.G., KOVALTSOV, G.A., LOCKWOOD, M., MURSULA, K., OWENS, M., SOLANKI, S.K., “A new calibrated sunspot group series since 1749: statistics of active day fractions”. **Solar Phys.** v. 291. 2016.
- USOSKIN, IG., HULOT, G., GALLET, Y., ROTH, R., LICHT, A., JOOS, F., KOVALTSOV, GA., THÉBAULT, E., KHOKHLOV, A., “Evidence for distinct modes of solar activity”. **Astron Astrophys** 562. DOI:10.1051/0004-6361/201423391. 2014.

- VAQUERO, J.M., GALLEGO, M.C., USOSKIN, I.G., KOVALTISOV, G.A.,  
 “Revisited sunspot data: a new scenario for the onset of the Maunder minimum”.  
**Astrophys. J. Lett.** v. 731, pp. L24. 2011.
- VASILIEV, S. S., DERGACHEV, V. A.. “The ~ 2400-year cycle in atmospheric  
 radiocarbon concentration: bispectrum of  $^{14}\text{C}$  data over the last 8000 years”.  
**Annales Geophysicae, European Geosciences Union**, v. 20 (1), pp.115-120.  
 2002.
- VASILIEV, S.S., DERGACHEV, V.A., RASPOPOV, O.M. e JUNGNER, H., 2012.  
 “Long-term variations in the flux of cosmogenic isotope  $^{10}\text{Be}$  over the last 10000  
 years: Variations in the geomagnetic field and climate”. **Geomagnetism and  
 Aeronomy**, v. 52(1), pp.121-128.
- VIEIRA, L. E. A., *et al.* “Evolution of the solar irradiance during the  
 Holocene”. **Astronomy & Astrophysics**, v. 531: A6. 2011.
- VITINSKII, I. I; KOPETSKII, M; KUKLIN, G. V. **The statistics of sunspot-  
 formation activity**. Moscow Izdatel Nauka, 1986.
- VITINSKY, Y.I., **Solar Activity Forecasting**, Israel Program for Scientific  
 Translations, Jerusalem 1965.
- VITINSKY, Yu I; KOPECKY, M.; KUKLIN, G. V. Book Review: **The statistics of  
 sunspots** (Statistika pjatnoobrazovatelnoj dejatel'nosti solntsa./Nauka, Moscow,  
 Solar Physics, 1987, 109: 199. 1986.
- VONMOOS, M; BEER, J; MUSCHELER, R. “Large variations in Holocene solar  
 activity: Constraints from  $^{10}\text{Be}$  in the Greenland Ice Core Project ice  
 core”. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 111.A10. 2006.
- VOSS, H., KURTHS J., SCHWARZ. U., “Reconstruction of grand minima of solar  
 activity from  $\Delta^{14}\text{C}$  data: linear and nonlinear signal analysis”. **J Geophys Res**  
 101:15,637–15,644. doi:10.1029/96JA00542. 1996.
- WAGNER, S; ZORITA, E.,” The influence of volcanic, solar and  $\text{CO}_2$  forcing on the  
 temperatures in the Dalton Minimum (1790–1830): a model study”. **Climate  
 Dynamics**, 25.2-3: 205-218. doi:10.1007/S00382-005-0029-0. 2005.
- WAINER, I., GENT, P. GONI, G., “Annual cycle of the Brazil-Malvinas Confluence  
 region in the National Center for Atmospheric Research climate system model”.  
**Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 105(C11), pp.26167-26177. 2000.
- WALDMEIER, M., **The Sunspot-Activity in the Years 1610–1960**, Schulthess,  
 Zürich, Switzerland, 171 pp. 1961.

- WALISER, D.E. e GAUTIER, C., “A satellite-derived climatology of the ITCZ”. **Journal of climate**, 6(11), pp.2162-2174. 1993.
- WANG, Y *et al.* “Changes in ENSO amplitude under climate warming and cooling”. **Climate Dynamics**, 52.3-4: 1871-1882. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4224-1>. 2019.
- WANG, Y.-M.; L, J. L.; SHEELEY JR, N. R. “Modeling the Sun’s magnetic field and irradiance since 1713”. **The Astrophysical Journal**, 625.1: 522. 2005.
- WANNER, H., BÜTIKOFER, J. “Holocene Bond Cycles: real or imaginary?”, **Geografie**, v. 113, pp. 338–350. 2008.
- WASHINGTON, W. M., PARKINSON, C. L., **An introduction to three-dimensional climate modeling**, 2 ed., Mill Valley, California. University Science Books, 2005.
- WEISS, N. O., TOBIAS, S. M., “Physical causes of solar activity”. **Space Sci Rev**, v. 94, pp. 99–112. doi:10.1023/A:1026790416627. 2000.
- WHITMIRE, D. P., REYNOLDS, R. T., KASTING, J. F., “Habitable zones for Earth-like planets around main sequence stars”. In: Heidmann, J., Klein, M. J. (eds) **Bioastronomy: The search for extraterrestrial life**, pp. 173-178, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- WILD, M., FOLINI, D., SCHÄR, C., LOEB N., DUTTON, E. G., KÖNIG-LANGLO, G., “The global energy balance from a surface perspective”, **Clim. Dyn.**, v. 40 (11–12), pp. 3107–3134, doi:10.1007/s00382-012-1569-8, 2012.
- WILLIAMS, J. P., “The astrophysical environment of the solar birthplace”, **Contemporary Physics**, v. 51, pp. 381-396, doi: 10.1080/00107511003764725, 2010.
- WILLSON, R. C. "Solar total irradiance observations by active cavity radiometers." **Physics of Solar Variations**. Springer, Dordrecht. pp. 217-229. <https://doi.org/10.1007/BF00151292>. 1981.
- WILLSON, R. C., H. S. HUDSON. "A solar cycle of measured and modeled total irradiance." *Nature*, v. 351, pp. 42-44. 1991.
- WILSON, O. C., “Chromospheric variations in main-sequence stars”, **Astrophysical Journal, Part 1**, v. 226, Dec. 1, pp. 379-396. 1978.
- WILSON, P. R., **Solar and Stellar Activity Cycles**, Cambridge University Press, Cambridge. 1994.

- WISCOMBE, W. J., **Mie scattering calculations: Advances in technique and fast, vector-speed computer codes.**, Technical Report Tech. Note. NCAR/TN-140+STR, NCAR, 1996
- WOLF, R., “Extract of a letter to Mr. Carrington.” **Mon. Not. Roy. Astron. Soc.** v. 19, pp. 85–86, 1859.
- WOLF, R., “Mitteilungen über die Sonnenflecken”, **I. Astron. Mitteil. Eidgn. Sternw. Zürich** v. 1, pp. 3–13. 1856.
- WOLF, R., “Sonnenflecken Beobachtungen in der zweiten Hälfte des Jahres 1850”. **Mitt. Nat.forsch. Ges. Bern**, v. 207, pp, 89–95. 1851.
- WOLFF, C.L., PATRONE, P.N. “A new way that planets can affect the Sun”. **Sol. Phys.** v. 266, pp. 227–246, 2010.
- WOODS, T. N., PRINZ, D. K., ROTTMAN, G. J., *et al.*, "Validation of the UARS solar ultraviolet irradiances: Comparison with the ATLAS 1 and 2 measurements." **J. Geophys. Res.**, 101 (D6), 9541. 1996.
- WOOLFSON, M., **The Origin and Evolution of the Solar System.** Institute of Physics Publishing, Bristol, 2000.
- YEH, S., *et al.*, “El Niño in a changing climate”. **Nature**, v. 461, pp. 511–514 doi:10.1038/nature08316. 2009.
- YEO, K. L., KRIVOVA, N. A., SOLANKI, S. K., GLASSMEIER, K. H., “Reconstruction of total and spectral solar irradiance from 1974 to 2013 based on KPVT, SoHO/MDI and SDO/HMI observations”, **Astron. Astrophys.**, v. 570, A85, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423628>, 2014.
- YI, S., DEMARQUE, P., KIM, Y.-C., LEE, Y. -W., REE Y. -W., Lejeune, T., Barnes, S., “Toward Better Age Estimates for Stellar Populations: The Y2 Isochrones for Solar Mixture”, **Astrophysical JournalS**, v. 136, pp. 417-437, 2001.
- YI, S., DEMARQUE, P., OEMLER, A. JR., “On the Origin of the UV Upturn in Elliptical Galaxies. I. Sensitivity of UV Population Synthesis to Various Input Parameters”, **Astrophysical Journal**, v. 486, pp. 201-229, 1997.
- YIN, J. H., “A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate”. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, L18701, doi:10.1029/2005GL023684. 2005.
- ZENDER, C. S., BIAN, H., NEWMAN D., “Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology”. **J. Geophys. Res.**, v 108, 4416 p, doi:10.1029/2002JD002775, 2003.

- ZHANG, M., LIN, W., BRETHERTON, C. S., HACK, J. J., RASCH, P. J., “A modified formulation of fractional stratiform condensation rate in the NCAR community atmospheric model CAM2”, **J. Geophys. Res.**, 108 (D1), 2003.
- ZHANG, G.J. e MCFARLANE, N.A., “Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model”. **Atmosphere-ocean**, v33(3), pp.407-446. 1995.
- ZHOU, L., ZHANG, M., BAO, Q., LIU, Y. “On the incident solar radiation in CMIP5 models”. **Geophys. Res. Lett.**, v. 42, pp. 1930–1935, doi:10.1002/2015GL063239, 2015.
- ZOLOTOVA, N. V., e PONYAVIN, D. I., “Is the new Grand minimum in progress?” **J. Geophys. Res.** v. 119, pp. 3281–5. 2014.
- ZOLOTOVA. N.V., PONYAVIN, D.I., “The Maunder minimum is not as grand as it seemed to be”. **Astrophys. J.** v. 800, 42. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/800/1/42>. 2015.

## 8. Anexo I

Trecho da entrevista de John Eddy a Spencer Weart, cuja versão integral está disponível em [https://history.aip.org/climate/eddy\\_int.htm](https://history.aip.org/climate/eddy_int.htm) , reproduzido neste trabalho com autorização da editora.

“WEART: How did you come to that-it was a very good name.

EDDY: Maunder was a kind of a second-tier astronomer at Greenwich so far as I could ascertain. The best known of his writings was a popular book on astronomy and the Bible. He was definitely a religious guy, as probably most scientists were in the late nineteenth century, and was not in the league of Norman Lockyer or the other leading solar astronomers of the day. So when he started uncovering this stuff -- much as I later uncovered what he had done -- he didn't get that much press for it. I had to dig around for his papers. He had also done it in two surges, separated by about 30 years: one back in the 1890s, and then again shortly before his death in the 1920s. But he kept it in his mind all that time. He was not the first to call attention to the phenomenon: the latest before Maunder, was Gustav Sporer, in the 1880s, I think, but the trail goes back before that.

**WEART: Right. So how did you come on giving it this felicitous title of "The Maunder Minimum?"**

**EDDY: I knew I had a lot of selling to do if people were to accept the notion of such irregularity in the Sun, and I sought a name that people would remember, "Maunder Minimum", with all those m's had a kind of onomatopoeia.**

**WEART: You just like the ring of it. By this time you clearly had some experience in writing. You'd been writing for National Geographic and so on.**

**EDDY: I like words.**

WEART: Again, it goes back to your teaching experience, I guess.

EDDY: And, you know, the temptation was to think that it might someday be called the "Eddy Minimum": that is, to call it nothing in the hope that someone else would do that. But being from Nebraska, I could never do anything like that. I also knew I wasn't the first to find it, and it wasn't really mine. I think I did quite a bit for Maunder with that name. Particularly because he also got the idea from somebody else. He got it from Sporer who was a German astronomer. So, among the shots I took after publishing the paper were some from Germany that said, "You know, you really named it after the wrong person." Which I knew very well.

WEART: Right, but alas, Sporer's name didn't start with the right letter.

EDDY: Right, and the other sounded so good. I also, deliberately chose the title of the paper in Science, calling it simply the "The Maunder Minimum." I knew nobody would know what that was. It might have been better to include words about sunspots or the Sun or whatever, but I really wanted to plant this name in people's minds and remember what it was. At the time I'd also come to realize this one other point that I would like to include here about the philosophy of science.

After being once disappointed on not getting any recognition for something that Gordon published, having to do with the Moon and the corona, that I felt I had helped him do, I came to realize that in science the proper credit for something goes not necessarily to the first person who thinks of it, or writes about it but to the one who can convince his colleagues and the doubting world that it's true. That for almost anything you do, someone will probably stand up and say, "You know, 20 years ago, I looked at that and found this same thing," and so forth. But the truth is, it's the person who can make it stick in the textbooks [who deserves the fuller credit]."

Jul 30 2018, 08:27am via System

Dear Rafael Rangel,

On behalf of the American Institute of Physics, I'm pleased to grant permission for you to quote from the interview between Spencer Weart and Jack Eddy that you have chosen from our oral history interview collection. Please use the following citation format for your credit line:

Interview of John A. Eddy by Spencer Weart on 1999 April 21, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA,

[www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/22910](http://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/22910)

<<http://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/22910>>

For multiple citations, "AIP" is the preferred abbreviation for the location.

Good luck as you finish your thesis, and please contact the reference staff at [nbl@aip.org](mailto:nbl@aip.org) with additional questions.

Best wishes,

Melanie Mueller

---

Melanie J. Mueller

Director, Niels Bohr Library & Archives

American Institute of Physics

One Physics Ellipse

College Park, MD 20740 USA

Tel: +1 301-209-3179

<http://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library>

-----Original Message-----

From: Rafael Rangel

Sent: Thursday, July 26, 2018 1:43 PM

To: AIPRights Permissions

Subject: Permission to use an excerpt of an interview.

Dear Sir/Madam,

I am a PhD student at Federal University of Rio de Janeiro and I am very interested on reproduce in my Thesis a little excerpt of the interview given by Dr. John Eddy to Dr. Spencer Weart, available at [https://history.aip.org/climate/eddy\\_int.htm](https://history.aip.org/climate/eddy_int.htm) . My Thesis is about the sun cycles and how they influence our climate.

I have read the following website

<https://publishing.aip.org/authors/rights-and-permissions> . However, I did not understand how to get the proper permission, and I am contacting you to know how I could have it.

The excerpt that I would like to reproduce is when John Eddy explains why he chose the name "Maunder Minimum" for the prolonged minimum of solar activity. This excerpt is the one bellow.

Thank you for your consideration,  
I look forward to hearing from you.

Best regards,  
Rafael H. O. Rangel

## 9. Anexo II

O termo “zona habitável” (ZH), de acordo com KASTING et al. (1993) foi cunhado por HUANG (1959, 1960), e se refere ao intervalo orbital em torno de uma estrela na qual podem existir planetas que possuam condições favoráveis à existência de vida. Diversos autores discutem quais são estas condições, tais como DOLE (1964), que sugere limites de temperatura média atmosférica para a possibilidade de vida humana. RASOOL e DEBERGH (1970), HART (1978), WHITMIRE et al. (1991) e KASTING et al. (1993), sugerem que a habitabilidade esteja ligada a presença de água líquida na superfície planetária.

KASTING et al. (1993), utilizando modelo climático unidimensional, encontrou distâncias orbitais da ZH para estrelas do tipo solar e as relacionou com valores para a constante solar a estas distâncias.

Em uma situação em que a órbita do planeta seja mais próxima da estrela, ultrapassando o limite interno da ZH, dois cenários climáticos catastróficos podem ocorrer devido ao aumento da temperatura superficial do planeta: desequilíbrio no balanço de radiação, o que leva a um efeito estufa incontrolável (do inglês “*runaway greenhouse effect*”), com o aumento da altura da tropopausa, levando à presença de H<sub>2</sub>O a uma altitude acima da qual poderia ocorrer a condensação, causando o processo de fotólise (dissociação da molécula de água devido à radiação eletromagnética) e consequente perda de hidrogênio para o espaço, dando origem a um efeito estufa úmido (do inglês “*moist greenhouse*”); e Vênus recente (do Inglês “*recent Venus*”), determinado empiricamente a partir de indícios de que Vênus não possui água líquida há aproximadamente 1 Gano.

Já na situação em que a órbita do planeta seja mais distante da estrela, ultrapassando o limite externo da ZH, podem ocorrer outros três cenários, devido à diminuição da temperatura: primeira condensação do CO<sub>2</sub> (do inglês “*1st CO<sub>2</sub> condensation*”), em que ocorre o início da condensação do CO<sub>2</sub> na atmosfera, gerando nuvens de CO<sub>2</sub> e levando a um aumento no albedo planetário; efeito estufa máximo (do inglês “*maximum greenhouse*”), ou seja, a distância máxima na qual uma atmosfera de CO<sub>2</sub> sem nuvens poderia manter a temperatura superficial de 273 K, que é o limite mínimo de temperatura para presença de água líquida; e Marte primitivo (do inglês “*early Mars*”), determinado empiricamente a partir de indícios da existência de água

líquida superficial em Marte há 3,8 Gano, e da suposição de que esteve dentro da ZH. Os valores encontrados pelos autores são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Fluxos solares ( $S_{\text{sol-ZH}}$ ) e distâncias orbitais para os cenários climáticos catastróficos dos limites da ZH de KASTING et al. (1993).

Limite	$S_{\text{sol-ZH}}$ (% $S_{\text{sol}}$ )	Distância orbital (UA)
Efeito estufa úmido	110	0,95
Efeito estufa incontrolável	141	0,84
Vênus recente	176	0,75
Primeira condensação do CO <sub>2</sub>	53	1,37
Efeito estufa máximo	36	1,67
Marte primitivo	32	1,77

Valor considerado pelo autor:  $S_{\text{sol}} = 1360 \text{ Wm}^{-2}$