

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

Tiago Capello Robles

**IMPACTO TÉRMICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O
DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DAS PRINCIPAIS CULTURAS
AGRÍCOLAS DO BRASIL**

Santa Maria, RS
2018

Tiago Capello Robles

**IMPACTO TÉRMICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O
DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DAS PRINCIPAIS CULTURAS
AGRÍCOLAS DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Meteorologia**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Simone Erotildes Teleginski Ferraz
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Angelica Durigon

Santa Maria, RS

2018

Robles, Tiago
IMPACTO TÉRMICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O
DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DAS PRINCIPAIS CULTURAS
AGRÍCOLAS DO BRASIL / Tiago Robles.- 2018.
79 p.; 30 cm

Orientadora: Simone Ferraz
Coorientadora: Angelica Durigon
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2018

1. Mudanças climáticas 2. Soma térmica 3. Culturas
agrícolas I. Ferraz, Simone II. Durigon, Angelica III.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2018

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Capello Robles. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

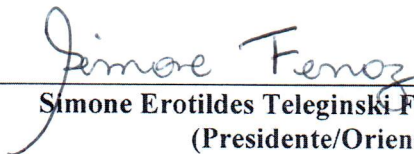
End. Eletr.: tiagoc.robles@gmail.com

Tiago Capello Robles

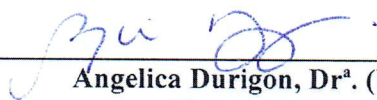
**IMPACTO TÉRMICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O
DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DAS PRINCIPAIS CULTURAS
AGRÍCOLAS DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Área de Concentração em Meteorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Meteorologia**.

Aprovado em 26 de fevereiro de 2018:




Simone Erotildes Teleginski Ferraz, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)



Angelica Durigon, Dr^a. (UFSM)
(Co-orientadora)



Nathalie Tissot Boiaski, Dr^a. (UFSM)



Santiago Vianna Cuadra, Dr. (EMBRAPA) (Videoconferência)

Santa Maria, RS

2018

AGRADECIMENTOS

Quero deixar aqui um sincero agradecimento a todos que direta ou indiretamente me ajudaram no decorrer deste trabalho, em especial:

- às minhas orientadoras Profa. Dra. Simone e Profa. Dra. Angelica por todo o conhecimento adquirido, orientação, ajuda e, principalmente, paciência nas etapas finais do trabalho;

- à Profa. Dra. Nathalie pelas sugestões, apoio e conselhos valiosos;

- aos meus pais Luiz e Suzana por darem todo o apoio e conselhos sábios;

- à minha namorada Flávia que esteve ao meu lado todo o momento e com bastante paciência;

- aos amigos Edson Yatabe, Rafael de Abreu, Lucas Paiva, César Soares e Matheus Manente de São Paulo, que mesmo com a distância, se mantiveram próximos e solícitos a ajudar;

- aos novos amigos Felipe Theodorovitz, Roilan Hernandez, André Parciannelo, Adriano Battisti, Nicolle dos Reis, Daia e Guilherme Goergen por serem acolhedores e proporcionaram boas discussões nos momentos do café e mate.

RESUMO

IMPACTO TÉRMICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE O DESENVOLVIMENTO FENOLÓGICO DAS PRINCIPAIS CULTURAS AGRÍCOLAS DO BRASIL

AUTOR: Tiago Capello Robles
ORIENTADORA: Simone Erotildes Teleginski Ferraz
CO-ORIENTADORA: Angelica Durigon

As tendências das mudanças climáticas e o crescente potencial dos impactos climáticos vêm dando urgência na adaptação das culturas agrícolas e na mudança da utilização de recursos de forma mais sustentável. Este trabalho tem como principal objetivo fazer uma análise preliminar do impacto do aquecimento global no desenvolvimento fenológico das principais culturas agrícolas do Brasil. Para isso, foram utilizados dois cenários de mudanças climáticas, o RCP2.6 e RCP8.5, gerados a partir do modelo HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environment Model version 2 – Earth System*) e regionalizados com o modelo regional RegCM4 (*Regional Climate Model version 4*) para séries de dados futuras de temperatura do ar (2070-2099) que foram comparadas com uma série de referência (1976-2005). Para avaliar o impacto do aquecimento global nos ciclos de desenvolvimento das culturas de algodão, arroz irrigado, milho, soja e trigo, foi utilizado o conceito de soma térmica diária (STd, °C dia), que se baseia no fato de que a taxa de desenvolvimento diário de uma planta está relacionada com temperatura do ar, pressupondo a existência de temperaturas cardinais T_b , T_{ot} e T_{max} . Os principais resultados mostram que as condições de aquecimento do cenário RCP2.6 aproximam a temperatura média do ar (T_m) dos valores de desenvolvimento máximo (T_{ot}), contribuindo para um desenvolvimento mais rápido e, conseqüentemente, da diminuição da duração do ciclo. Já sob as condições de aquecimento do cenário RCP8.5, são observados impactos negativos para o desenvolvimento do milho, soja, arroz irrigado e trigo do Paraná. Para o milho e a soja, as regiões produtoras do Centro-Oeste, além de haver o prolongamento do tempo de desenvolvimento, as culturas sofrerão estresse térmico pelo fato de a T_m se aproximar dos limites máximos T_{max} , o que proporciona uma redução da área cultivável para essas culturas. No caso do arroz irrigado e trigo do Paraná, os impactos negativos são mais brandos, mas podem ocasionar em uma pequena redução de área.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Soma Térmica Diária. Culturas Agrícolas.

ABSTRACT

CLIMATE CHANGE THERMAL IMPACT ON PHENOLOGICAL DEVELOPMENT OF MAIN BRAZILIAN CROPS

AUTHOR: Tiago Capello Robles
ADVISOR: Simone Erotildes Teleginski Ferraz
CO-ADVISOR: Angelica Durigon

Positive climate change trends and the increasing potential of climate impacts made crucial to adapt agricultural crops due to these changes and adjust the use of natural resources in a more sustainable way. The aim of the present work is to make a global warming impact preliminary analysis on phenological development of the foremost crops in Brazil. Thus, two representative concentration pathways (RCP2.6 and RCP8), climate change scenarios, were used, generated from Hadley Center Global Environment Model version 2 Earth System (HadGEM2-ES) and regionalized with Regional Climate Model version 4 (RegCM4) for forthcoming air temperature data series (2070-2099) that were paired with a reference series (1976-2005). In order to assess global warming impact on cotton, irrigated rice, corn, soybean and wheat crop development cycles, the concept of daily Thermal Sum (dT_S, ° C day) was used, which establishes the fact that the rate of daily development of a plant is linked to air temperature, assuming the existence of cardinal temperatures T_b , T_{op} and T_{max} . Main results revealed that heating conditions of the RCP2.6 scenario approached the average air temperature (T_a) of the maximum development values (T_{op}), contributing to a faster development and, therefore, a decrease in cycle duration. In Paraná state under RCP8.5 scenario heating conditions, adverse impacts are observed for corn, soybean, irrigated rice and wheat crops development. Same scenarios were observed in Center-West producing regions, were, in addition to lengthier phenological phases, crops will suffer thermal stress because the T_a approaches the maximum T_{max} limits, which will lead to a reduction of the cultivable area. For the case of irrigated rice and wheat from Paraná, the negative effects are kinder, but might cause a small area reduction.

Keywords: Climate Changes. Daily Thermal Sum. Agricultural Crops.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Contribuições para a mudança de temperatura da superfície observada durante o período de 1951 a 2010. As linhas pretas representam os intervalos prováveis de ocorrência e as barras representam seus pontos médios para as tendências de aquecimento durante o período de 1951-2010. A mudança de temperatura da superfície observada é mostrada em preto, com intervalo de incerteza de 5 a 95% devido à incerteza observacional. Os intervalos de aquecimento (barras coloridas) baseiam-se em observações combinadas com simulações de modelos climáticos, a fim de estimar a contribuição de uma forçante externa para o aquecimento observado. Fonte: IPCC (2014).....18
- Figura 2.2 – Observações e outros indicadores de um sistema climático global em mudança. (a) Média global combinada das anomalias de temperatura superficial da terra e dos oceanos. (b) Média global da mudança no nível do mar. (c) Média global da concentração dos gases do efeito estufa. (d) Emissões globais de CO₂ antropogênico. Fonte: IPCC (2014).....19
- Figura 2.3 – Anomalia da temperatura média global do período de 1850 a 2016, sendo o recorde de aquecimento de +0,77°C no ano de 2016. Fonte: CRU/UEA (2017).....20
- Figura 2.4 – Anomalia da temperatura média na América do Sul do período de 1910 a 2016, sendo o recorde de aquecimento de +1,3°C no ano de 2015. Fonte: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/southAmerica/land/ytd/12/1880-2017>.....20
- Figura 2.5 – Tendência das temperaturas anuais mínimas, máximas e médias em °C por década para o período de 1961 a 2000. Círculos com contornos grossos indicam significância estatística na análise não paramétrica do Teste Mann Kendal no nível de significância de 0,05. Fonte: Obregon e Marengo (2007).....22
- Figura 2.6 – Climatologia da temperatura média compensada anual (°C) no Brasil. Fonte: INMET (2017).....24
- Figura 2.7 – Climatologia da temperatura média do ar (°C) no Brasil para (a) verão, (b) inverno, (c) outono e (d) primavera, no período de 1961-1990. Fonte: CPTEC (2017).....26
- Figura 2.8 – (a) Forçante radiativa em W/m² e (b) emissões em GtCO₂/ano para os quatro cenários de climáticos. Fonte: Moss et al. (2010).....27
- Figura 2.9 – Mudança na temperatura média da superfície com base em projeções médias de múltiplo modelos globais para o período de 2081-2100 em relação a 1986-2005 para os cenários RCP2.6 e RCP8.5. Fonte: IPCC (2014).....28
- Figura 2.10 – Resultado da média de três modelos regionais (Eta/CPTEC, RegCM3 e HadRM3P) para a anomalia da temperatura média anual referentes ao período de 2071 a 2100 em relação a média de 1961-1990. A figura da esquerda

representa anomalias para o cenário de menor emissão (B2), e a figura da direita representa anomalias para o cenário de maior emissão (A2). Fonte: Ambrizzi et al. (2007).....29

- Figura 2.11 – Soma térmica referente ao ciclo completo para diferentes cultivares calculada pelo método 1 (STa1), método 2 (STa2) e método 3 (STa3), considerando temperaturas cardinais constantes e variáveis. As barras representam a média e o desvio padrão de cinco épocas de semeadura nos anos agrícolas 2003/2004 e 2004/2005 em Santa Maria, RS. Fonte: Streck et al. (2007).....40
- Figura 3.1 – Modelos membros e processos do sistema climático. Modelo atmosférico (A), com ou sem uma estratosfera bem resolvida; modelo acoplado Oceano-Atmosfera (AO), com adição de componentes oceânicos e de gelo marinho; modelo da configuração acoplada do ciclo do carbono (CC), com processos do ciclo do carbono; modelo da configuração completa do sistema terrestre (ES), com adição da química troposférica. Fonte: Martin et al. (2011).....42
- Figura 3.2 – Taxa de desenvolvimento vegetal em relação às temperaturas cardinais T_b , T_{ot} e T_{max} . Adaptado de Pereira et al. (2002).....44
- Figura 3.3 – Representação gráfica referente aos três métodos de cálculo da STd para o experimento realizado por Streck et al. (2007), no qual foram consideradas $T_b=11^{\circ}\text{C}$, $T_{ot}=28^{\circ}\text{C}$ e $T_{max}=40^{\circ}\text{C}$. Fonte: Streck et al. (2007).....45
- Figura 3.4 – Porcentagem de produção dos principais estados produtores de algodão, arroz, milho, soja e trigo. Fonte: MAPA (2017).....46
- Figura 4.1 – Média da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) para o verão a) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e b) referente a Xavier et al. (2016), e para o outono c) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e d) referente a Xavier et al. (2016).....48
- Figura 4.2 – Média da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) para o inverno a) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e b) referente a Xavier et al. (2016), e para a primavera c) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e d) referente a Xavier et al. (2016).....49
- Figura 4.3 – Anomalia da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) em relação ao período de referência para a) cenário RCP2.6 e para o b) cenário RCP8.5.....50
- Figura 4.4 – Anomalia de temperatura em relação ao período de referência para os cenários RCP2.6 e RCP8.5, referentes ao ciclo das culturas de algodão, milho e soja.....52
- Figura 4.5 – Anomalia de temperatura em relação ao período de referência para os cenários RCP2.6 e RCP8.5, referentes ao ciclo das culturas de arroz irrigado e trigo no Rio Grande do Sul e no Paraná.....53
- Figura 4.6 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 1 em relação ao método 3 para algodão, milho e soja nos diferentes cenários.....55

Figura 4.7 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 2 em relação ao método 3 para algodão, milho e soja nos diferentes cenários.....	56
Figura 4.8 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 1 em relação ao método 3 para arroz irrigado e trigo no Rio Grande do Sul e no Paraná nos diferentes cenários.....	58
Figura 4.9 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 2 em relação ao método 3 para arroz irrigado e trigo no Rio Grande do Sul e no Paraná nos diferentes cenários.....	59
Figura 4.10 –Duração dos ciclos, em dias, estimada pelo método 3 para as culturas de algodão (1675°C dia), milho (1800°C dia) e soja (1336°C dia) referente ao período de referência 1976-2005, e aos cenários climáticos RCP2.6 e RCP8.5 para o período 2070-2099.....	62
Figura 4.11 –Duração dos ciclos, em dias, estimada pelo método 3 para as culturas de arroz (1446°C dia), trigo no Paraná (2040°C dia) e trigo no Rio Grande do Sul (2040°C dia) referente ao período de referência 1976-2005, e aos cenários climáticos RCP2.6 e RCP8.5 para o período 2070-2099.....	63
Figura 4.12 –Anomalia da duração do ciclo, em dias, dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação à referência para as culturas de algodão, soja e milho.....	67
Figura 4.13 – Diferença entre a temperatura média do ar (T_m) e a temperatura de máximo desenvolvimento (T_{ot}) dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação para as culturas de algodão, soja e milho.....	68
Figura 4.14 – Anomalia da duração do ciclo, em dias, dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação à referência para as culturas de arroz e trigo.....	69
Figura 4.15 – Diferença entre a temperatura média do ar (T_m) e a temperatura de máximo desenvolvimento (T_{ot}) dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação para as culturas de arroz e trigo.....	70

LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 – Combinações de temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima para os estágios de desenvolvimento do trigo EM-ET, ET-NA e NA-MF. Adaptado: Alberto et al.(2009).....37
- Tabela 3.1 – Temperaturas cardinais de cada cultura, juntamente com o cumulo térmico esperado da germinação até a maturação, e com a duração do ciclo e período de desenvolvimento.....46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C dia	Graus-dia
AR4	Assessment Report - 4
AR5	Assessment Report - 5
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environment Model version 2
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PIB	Produto Interno Bruto
RAN1	Primeiro Relatório de Avaliação Nacional
RCP 2.6	Cenário futuro RCP2.6 (2070-2099)
RCP 8.5	Cenário futuro RCP8.5 (2070-2099)
RegCM4	Regional Climate Model version 4
STd	Soma térmica diária
T_b	Temperatura basal inferior
T_m	Temperatura média do ar
T_{max}	Temperatura basal superior
T_{ot}	Temperatura ótima
WMO	World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	17
2.1.1	Evidências no Brasil	21
2.2	CLIMATOLOGIA DA TEMPERATURA MÉDIA DO AR NO BRASIL	23
2.3	PROJEÇÕES DE CLIMA FUTURO.....	26
2.4	CULTURAS AGRÍCOLAS	29
2.4.1	Algodão	29
2.4.2	Milho	31
2.4.3	Soja	33
2.4.4	Trigo	35
2.4.5	Arroz irrigado	38
3	DADOS E METODOLOGIA	40
3.1	MODELO HadGEM2-ES	41
3.2	MODELO RegCM4	42
3.3	CONCEITO DE GRAUS-DIA OU SOMA TÉRMICA DIÁRIA	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A mudança climática vem sendo evidenciada através do aumento gradativo da temperatura média global ao longo dos anos em resposta ao aumento das emissões e, conseqüentemente das concentrações dos principais gases contribuintes do efeito estufa, que possuem como principal fonte a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e os diferentes meios de uso da terra (IPCC, 2014). As concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa estão a níveis sem precedentes pelo menos nos últimos 800 mil anos; a concentração de CO_2 aumentou em 40% desde 1750, com uma taxa de variação mais rápida observada entre 2002-2011 (de $2,0 \pm 0,1$ ppm/ano) e se encontra atualmente em torno de 407 ppm (NASA, 2017). Neste período, as emissões médias anuais provenientes da silvicultura e outros usos da terra foram de $3,3 \pm 2,9$ Gt/ano. Se estas emissões continuarem crescendo às taxas atuais, nos próximos anos a temperatura média do ar do planeta poderá aumentar $4,8^\circ\text{C}$ até o ano de 2100, o que poderia resultar em uma elevação de até 82 cm no nível médio do mar e causar danos significativos nas regiões costeiras do globo (IPCC, 2014).

No Brasil, o primeiro Relatório de Avaliação Nacional (RAN1) do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), divulgado em 2013, afirmou que o clima no país nas próximas décadas deverá ser mais quente com um aumento gradual e variável da temperatura média entre 1°C e 6°C até 2100, se comparado com o registrado no final do século XX (PBMC, 2013).

Segundo a *Climate Research Unit*, da *University of East Anglia* no Reino Unido, o ano de 2016 foi o mais quente desde o início das observações meteorológicas, em 1861, com $+0,77^\circ\text{C}$ de anomalia (acima da média climatológica de 1961 até 1990), seguido do ano de 2015 com $+0,76^\circ\text{C}$ e do ano de 2014 com registro de $+0,58^\circ\text{C}$. De acordo com o quinto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), cada uma das últimas três décadas tem sido sucessivamente mais quente na superfície da Terra do que qualquer outra década anterior desde 1850, sendo que a média global da temperatura em superfície aumentou $0,85^\circ\text{C}$ no período de 1880 a 2012. Recentemente, a *World Meteorological Organization* (WMO, 2017) afirmou que cada um dos 16 anos desde 2001 ficou, pelo menos, $0,4^\circ\text{C}$ acima da média em relação ao período-base 1961-1990, sendo o ano de 2016 o mais quente já registrado com $0,77^\circ\text{C}$ acima da média.

As conseqüências deste aquecimento global são mais evidenciadas nos sistemas naturais e já vêm sendo observadas, como a elevação do nível médio do mar, o derretimento de geleiras, principalmente do Ártico, e a mudança dos padrões de precipitação ou

derretimento de gelo e neve que alteram os sistemas hidrológicos de algumas regiões, bem como a qualidade dos recursos hídricos (MARENGO, 2009).

As fortes evidências das mudanças climáticas e a tendência de continuarem ocorrendo, proporciona uma escala crescente de potenciais impactos climáticos, principalmente aqueles relacionados aos impactos agrícolas, uma vez que estacorresponde aprincipal atividade socioeconômica de vários países (HOWDEN et al., 2007). Os efeitos observados sobre a produção agrícola são evidenciados em várias regiões do mundo, e impactos negativos são mais comuns que impactos positivos, como a redução no rendimento das culturas de trigo e milho pelo mundo em funçãoda ocorrência de eventos extremos (LOBELL; SCHLENKER; COSTA-ROBERTS, 2011; PORTER ET AL., 2014).

No Brasil, eventos climáticos extremosteminfluenciado a produção agrícola, como por exemplo, a forte estiagem que ocorreu nos meses de verão no Rio Grande do Sul em 2004/2005, quando a precipitação total neste período ficou abaixo de 200 mm (a menor até então, em 53 anos) em grande parte do estado, ocasionando uma grave quebra na safra de grãos (BERLATO; CORDEIRO, 2005). Outro evento significativo de forte seca ocorreu em 2007/2008 neste estado, resultando em uma quebra na produção agropecuária, o que acabou impactando na queda do Produto Interno Bruto (PIB) (FOCHEZATTO et al., 2009). Quanto à soja, o estudo de Sperling et al. (2012) indicou que, no Rio Grande do Sul, em onze safras, das vinte e duas consideradas no trabalho, ocorreram períodos de estiagem, com destaque para as safras de 1990/91, 2004/05 e 2011/12, resultando em produtividadeabaixo de 1000 kg/ha de grãos.

Como o Brasil é considerado um dos maiores produtores de alimentos do mundo, com alto grau de competitividade alcançada nos últimos anos e ocupando parte importante na economia nacional, com23,5% de participação no PIB nacional em 2017, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, e com perspectiva de aumento nos próximos anos (REUTERS, 2017),é de fundamental importância identificar o impacto do aumento da temperatura do ar na distribuição geográfica das principais culturas em diferentes condições climáticas nas próximas décadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho proposto tem como objetivo avaliar os impactos do acréscimo da temperatura do ar em cenários de mudanças climáticas no desenvolvimento fenológico das culturas agrícolas do algodão, arroz irrigado, milho, soja e trigo no Brasil. Para tal, foram utilizados os cenários climáticos RCP2.6 e RCP8.5 do IPCC simulados pelo modelo HadGEM2-ES e regionalizados com o modelo regional climático RegCM4.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar os dados de temperatura do ar, do período de referência de 1976 a 2005 regionalizados pelo modelo RegCM4, com os dados observados interpolados de Xavier et al. (2016);

- Comparar os resultados de temperatura do ar regionalizados pelo RegCM4 para os cenários climáticos RCP2.6 e RCP8.5 com os resultados apresentados pelo IPCC da média de modelos climáticos globais para os mesmos cenários no AR5;

- Calcular os valores de soma térmica das culturas supracitadas por diferentes métodos para os cenários de referência e climáticos RCP2.6 e RCP8.5;

- Calcular a duração em dias dos ciclos de desenvolvimento de cada cultura em cada cenário de estudo;

- Avaliar o impacto do aumento de temperatura do ar dos cenários futuros no ciclo de desenvolvimento de cada cultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As emissões antropogênicas dos gases do efeito estufa vêm aumentando desde a era pré-industrial em decorrência, principalmente, do crescimento econômico e populacional. Atualmente a concentração dos principais gases, o gás carbônico (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), estão em níveis nunca observados em pelo menos 800 mil anos, sendo os

efeitos detectados em todo o sistema climático com grande probabilidade de ser a principal causa do aquecimento observado desde meados do século XX (IPCC, 2014).

A evidência da influência humana no sistema climático cresceu desde o relatório AR4 do IPCC, sendo extremamente provável que mais da metade do aumento da temperatura média do ar global de 1951 a 2010 tenha sido causado pelo aumento antropogênico das concentrações dos gases do efeito estufa (IPCC, 2014) (Figura 2.1).

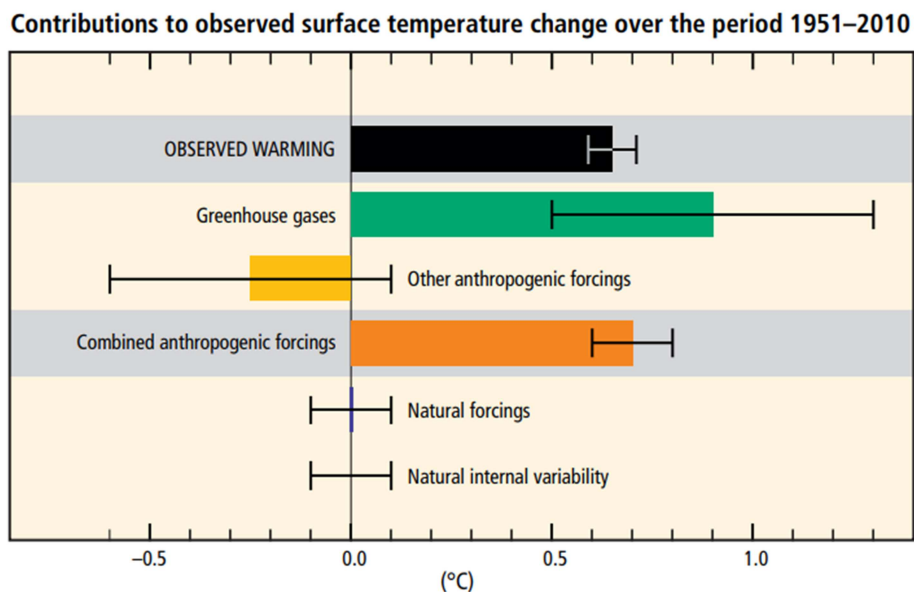


Figura 2.1 – Contribuições para a mudança de temperatura da superfície observada durante o período de 1951 a 2010. As linhas pretas representam os intervalos prováveis de ocorrência e as barras representam seus pontos médios para as tendências de aquecimento durante o período de 1951-2010. A mudança de temperatura da superfície observada é mostrada em preto, com intervalo de incerteza de 5 a 95% devido à incerteza observacional. Os intervalos de aquecimento (barras coloridas) baseiam-se em observações combinadas com simulações de modelos climáticos, a fim de estimar a contribuição de uma forçante externa para o aquecimento observado. Fonte: IPCC (2014).

Segundo o relatório AR5 do IPCC (IPCC, 2014) cada uma das últimas três décadas foi sucessivamente mais quente em relação às anteriores desde 1850, como mostra a Figura 2.2, que representa os dados combinados de temperatura da superfície terrestre e do oceano de diferentes conjuntos de dados.

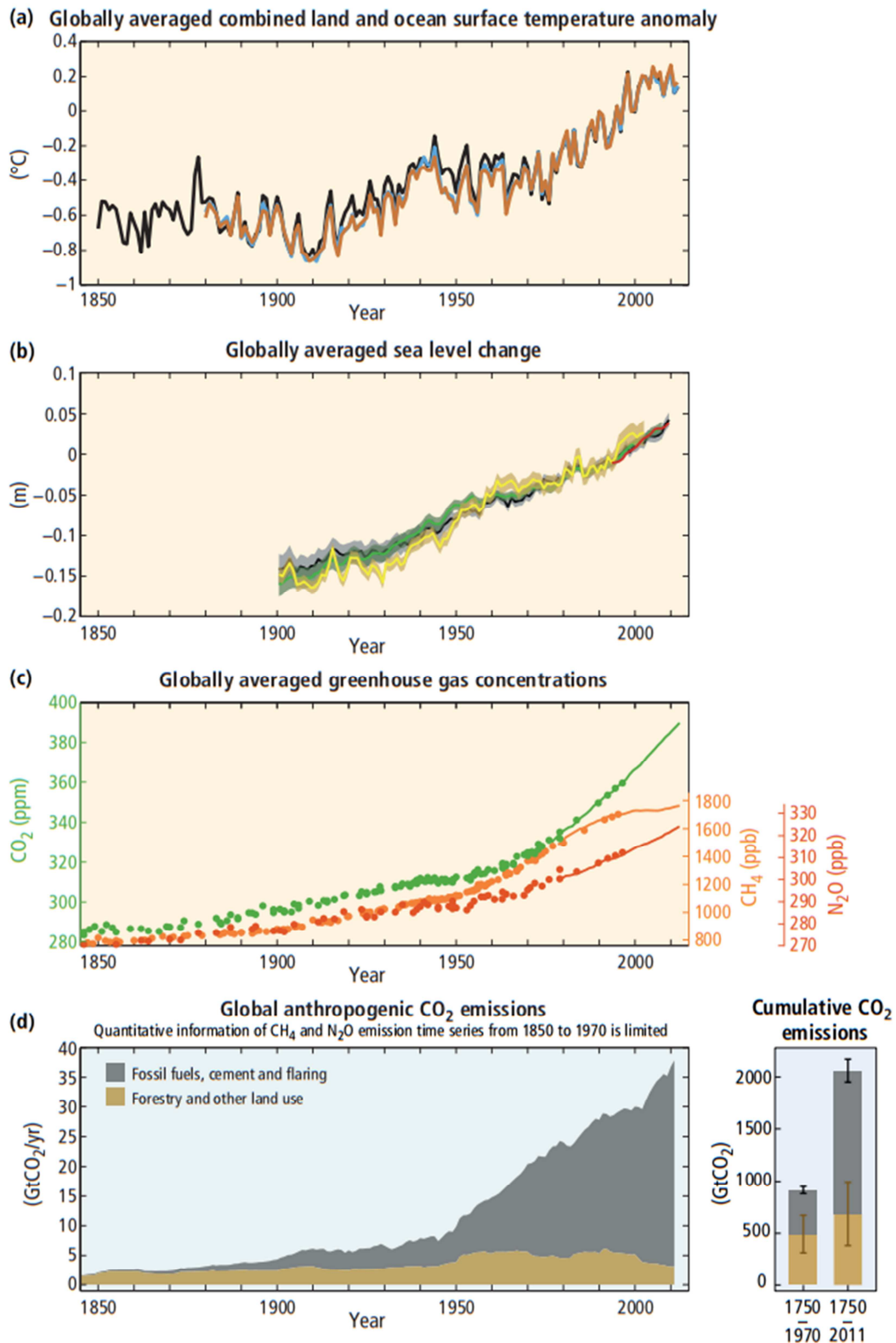


Figura 2.2 – Observações e outros indicadores de um sistema climático global em mudança. (a) Média global combinada das anomalias de temperatura superficial da terra e dos oceanos. (b) Média global da mudança no nível do mar. (c) Média global da concentração dos gases do efeito estufa. (d) Emissões globais de CO_2 antropogênico. Fonte: IPCC (2014).

Atualmente, as temperaturas médias globais da superfície terrestre são as maiores dos últimos cinco séculos. O mês de fevereiro de 2017 foi o segundo mais quente de fevereiro

registrado em 137 anos de registro (NASA, 2017) e os anos de 2014, 2015 e 2016 foram os mais quentes desde 1850, com valores de 0,58°C, 0,76°C e 0,77°C (Figura 2.3), respectivamente, acima da média global referente ao período de 1961 a 1990, segundo a *Climate Research Unit*, da *University of East Anglia* no Reino Unido (CRU/UEA, 2017).

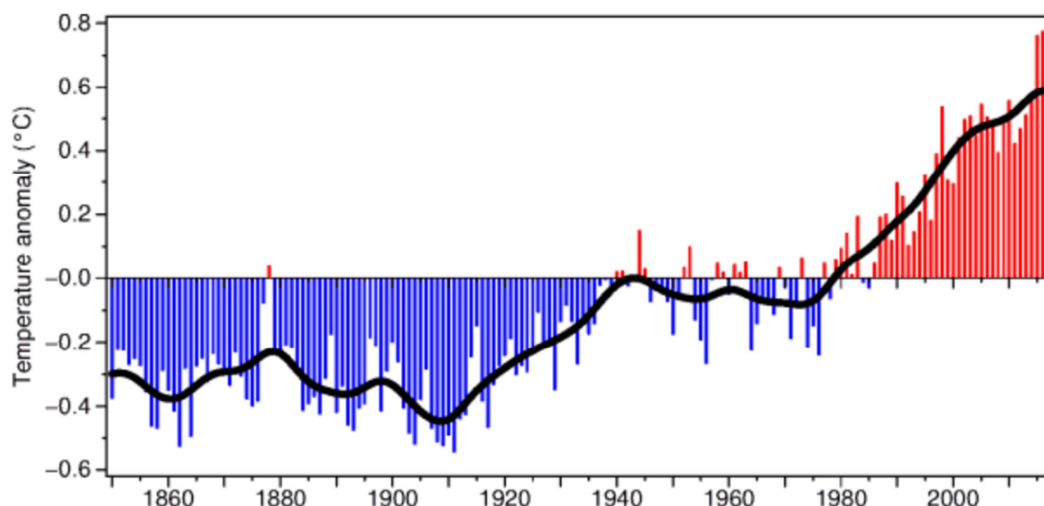


Figura 2.3 – Anomalia da temperatura média global do período de 1850 a 2016, sendo o recorde de aquecimento de +0,77°C no ano de 2016. Fonte: CRU/UEA (2017).

Na América do Sul, o ano de 2015 foi o ano mais quente desde que iniciaram as medidas em 1910, com uma anomalia de 1,3°C (Figura 2.4). Em novembro de 2017, a temperatura média na América do Sul atingiu anomalias de quase 1°C (NCDC/NOAA).

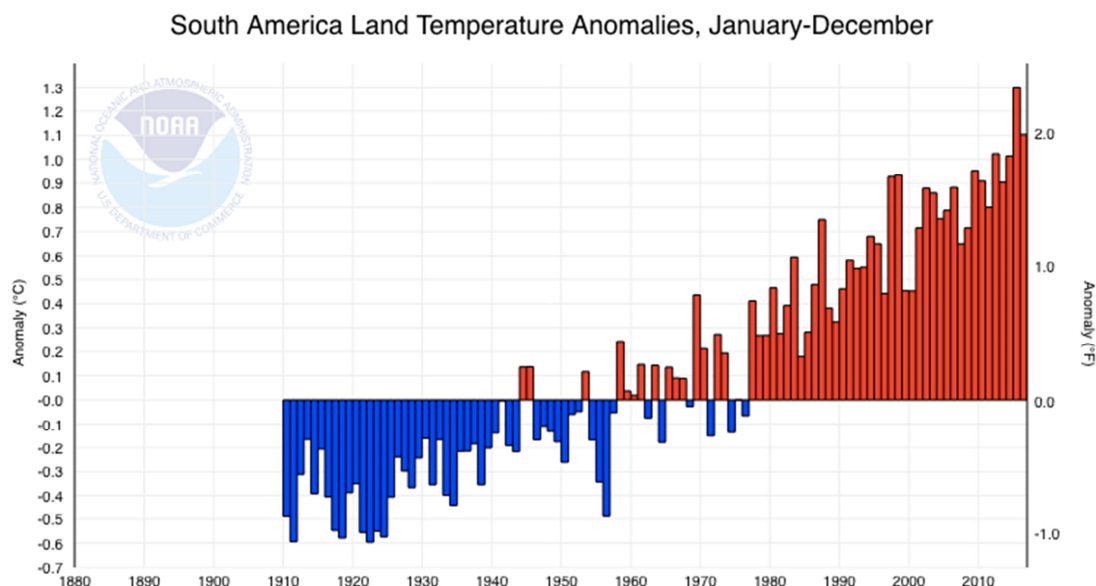


Figura 2.4 – Anomalia da temperatura média na América do Sul do período de 1910 a 2016, sendo o recorde de aquecimento de +1,3°C no ano de 2015. Fonte: <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/time-series/global/southAmerica/land/ytd/12/1880-2017>.

As consequências deste aquecimento são mais fortes e abrangentes nos sistemas naturais. Em muitas regiões do planeta, a mudança dos padrões de precipitação e o derretimento de neve e gelo estão alterando os sistemas hidrológicos tanto em relação à quantidade quanto em relação à qualidade, proporcionando em muitas espécies animais de água doce e salgada mudanças nos padrões de migração, quantidade e concentração geográfica. Outras consequências do aquecimento vêm sendo observadas desde 1950 e estão relacionadas com a diminuição dos extremos de temperatura mínima do ar, aumento dos extremos de temperatura máxima do ar, aumento do nível médio do mar e aumento dos eventos extremos de precipitação (IPCC, 2014).

2.1.1 Evidências no Brasil

Vários estudos já foram feitos para diferentes regiões do Brasil, mostrando as evidências do aquecimento global. Nos estados do Sul do país, no período de 1960 a 2000, Marengo e Camargo (2008) verificaram um decréscimo na amplitude térmica diurna, ocasionado por um aumento acentuado nas temperaturas noturnas e por um ligeiro aumento das temperaturas diurnas durante um ano, sendo que as tendências de aquecimento foram mais intensas no inverno em comparação ao verão. O estudo ainda mostra que a frequência maior da ocorrência do fenômeno El Niño ao longo de 20 anos, de 1982 a 2002, poderia ter influenciado na elevação da temperatura e no aumento de eventos extremos no Sul do Brasil. Marengo e Camargo (2008) através de índices de temperaturas extremas que usam limites de tendência pré-determinados de temperaturas mínimas e máximas, mostraram um aumento na frequência de dias considerados quentes durante o verão e o inverno, principalmente nos últimos 20 anos do período de estudo.

Em outro trabalho mais abrangente, Obregon e Marengo (2007), efetuaram uma análise das tendências de temperatura de 25 localidades em todo o Brasil no período de 1961-2000. O estudo mostra o predomínio de aumento das temperaturas anuais mínimas, máximas e médias (Figura 2.5), com máximo valor de tendência de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{década}$ na temperatura média anual. Em relação às tendências de temperaturas mínima e máxima, os maiores valores foram de $1,4^{\circ}\text{C}/\text{década}$ e $0,6^{\circ}\text{C}/\text{década}$, respectivamente.

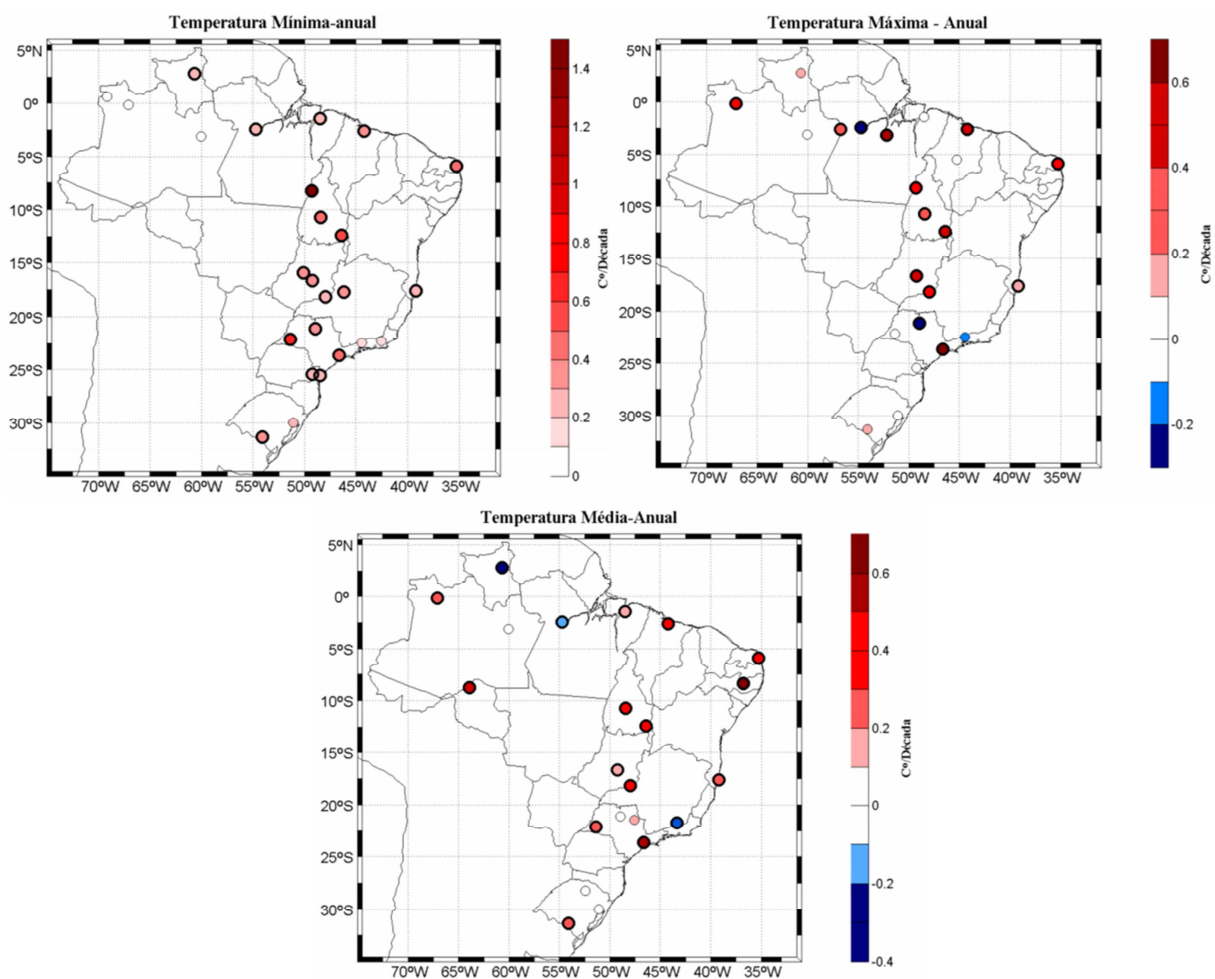


Figura 2.5 – Tendência das temperaturas anuais mínimas, máximas e médias em °C por década para o período de 1961 a 2000. Círculos com contornos grossos indicam significância estatística na análise não paramétrica do Teste Mann Kendal no nível de significância de 0,05. Fonte: Obregon e Marengo (2007).

Obregon e Marengo (2007) ainda ressaltam que a distribuição das tendências das temperaturas mínimas anuais apresenta valores majoritariamente positivos em todo o Brasil, o que não acontece com as outras temperaturas, sendo essa a razão principal da diminuição da amplitude térmica dos 40 anos estudados.

Santos et al. (2010) avaliaram as condições climáticas no Nordeste do Brasil entre os anos de 1961 e 2007, utilizando dados de estações espacialmente bem distribuídas na região e, observaram uma tendência significativa de aumento na temperatura média anual em quase todas as estações estudadas.

Silva e Dereczynski (2014) estudaram os eventos extremos de temperatura entre 1961 e 2012 no Rio de Janeiro e encontraram que, nas regiões metropolitanas, Norte e Noroeste do Estado, houve um aumento estatisticamente significativo da máxima média entre +0,01 e

+0,08°C por ano. Os autores notaram ainda tendências significativas na porcentagem de dias e noites quentes em quase todo o Estado (entre +0,1% e +0,6% dias por ano).

Mais recentemente, Natividade (2015) observou no Brasil no período de 1961 a 1990 uma queda maior de 10% no número de noites frias ao ano, bem como uma queda de mais de 80% no número de dias frios, principalmente no Norte do país. O autor destacou ainda um aumento de dias e noites quentes em todo o território brasileiro, sendo este último mais expressivo ao Norte e menor ao Sul do país.

Silva et al. (2015) analisaram a tendência de extremos climáticos de temperatura no Paraná no período de 1976 a 2010 e os seus resultados apontaram para um aquecimento significativo generalizado em grande parte do Estado. As temperaturas mínimas e máximas anuais médias indicaram um aumento de aproximadamente +0,02°C por ano em quase todo o Estado. Além disso, a porcentagem de dias e noites quentes se elevou consideravelmente a uma taxa entre 0,1°C e 0,4°C/ano.

2.2 CLIMATOLOGIA DA TEMPERATURA MÉDIA DO AR NO BRASIL

O Brasil é um país que tem uma grande extensão territorial, apresentando uma ampla diversidade climática com distintos regimes de precipitação e temperatura ao longo do território (MCTI, 2016).

O Brasil possui áreas desde a região equatorial até latitudes subtropicais. Esta grande variação se reflete na distribuição da temperatura do ar. Na região Amazônica a temperatura do ar apresenta pequena variação térmica, exceto na parte mais ao Sul que sofre a ação de sistemas frontais. As médias anuais variam em torno de 26°C a 28°C. No Nordeste Brasileiro as temperaturas médias variam desde 20°C nas áreas mais elevadas e entre 24°C a 28°C no restante da região. A região Centro-Oeste tem grande variação de relevo, latitude e vegetação o que causa grande variação nas temperaturas. As temperaturas máximas podem atingir valores superiores a 33°C no Norte do estado a 26°C no Sul. No inverno, as temperaturas mínimas podem atingir valores bem baixos, chegando até a gelar em algumas localidades. A região Sudeste, devido a sua posição latitudinal, apresenta grandes amplitudes térmicas, e as temperaturas médias podem variar desde 14°C nas áreas montanhosas até 24°C, próximo a divisa dos Estados do Espírito Santo e Minas Gerais. E na região Sul durante o inverno os valores médios variam de 11°C no sul a 18°C no Norte e no verão o gradiente de temperatura é zonal, com valores médios em torno de 22°C no litoral a 25°C na região Oeste (CAVALCANTI et al, 2009).

As temperaturas médias compensadas anuais apresentam uma variação latitudinal, com valores mais elevados na parte Norte do país e mais baixos no Sul (Figura 2.6) e ainda há variações regionais em decorrência do fator topografia. Anualmente, sobre as regiões Norte e Nordeste, as médias oscilam entre 26°C e 30°C, enquanto que na parte Centro-Oeste do país elas ficam entre 22°C e 26°C. Já no Sudeste, as temperaturas variam entre 20°C e 24°C e atingem valores mais baixos na região Sul do Brasil, onde ficam entre 16°C e 20°C.

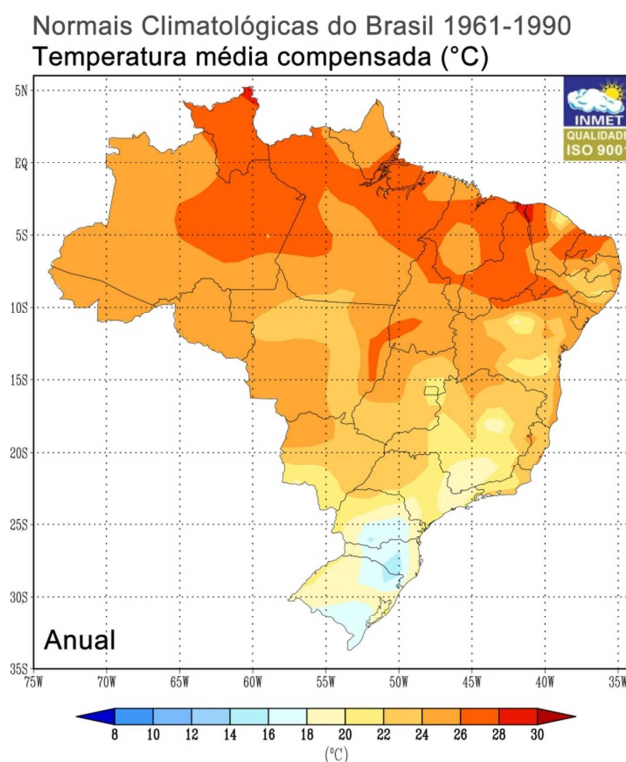


Figura 2.6 - Climatologia da temperatura média compensada anual (°C) no Brasil. Fonte: INMET (2017).

Analisando a climatologia sazonal, durante o verão (Figura 2.7a) a temperatura média varia de 25°C a 27°C em praticamente toda a região Norte e Nordeste e também no Mato Grosso e Norte do Mato Grosso do Sul. Deslocando-se mais para Sul do país, as médias oscilam entre 22°C e 25°C nas regiões Sul e Sudeste, no Sul do Mato Grosso do Sul e em Goiás. Apenas no Leste de Santa Catarina e do Paraná as temperaturas médias ficam em torno de 20°C.

Nos meses de inverno (Figura 2.7b), as maiores temperaturas médias (entre 25°C e 27°C) ficam restritas mais ao Norte do país, abrangendo o Nordeste do Amazonas e os Estados de Roraima, Amapá, Pará, Tocantins, Maranhão e Piauí. Temperaturas mais amenas (de 21°C a 25°C) são observadas na faixa central do Brasil, desde o Acre até a região Nordeste. O Mato Grosso do Sul, Oeste de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais

apresentam temperaturas variando entre 17°C e 21°C, enquanto que na região compreendida pelo Sul do Brasil e Leste de São Paulo as temperaturas médias são inferiores a 17°C.

Durante o outono (Figura 2.7c), começa a ocorrer um resfriamento das temperaturas no Sul do país, que ficam entre 18°C e 21°C. Na parte central do Brasil as temperaturas médias tem um comportamento mais ameno variando entre 22°C e 25°C, enquanto que nas regiões Norte e Nordeste ficam acima de 25°C.

Na primavera (Figura 2.7d) a região Norte e parte do Nordeste e do Centro-Oeste apresentam valores de temperatura média entre 25°C e 29°C, podendo chegar até 30°C. Na parte central do país, que abrange o Sul do Mato Grosso do Sul, Goiás, Leste da Bahia e o Sudeste, as temperaturas médias variam entre 22°C e 25°C, enquanto que na região Sul ficam abaixo de 20°C.

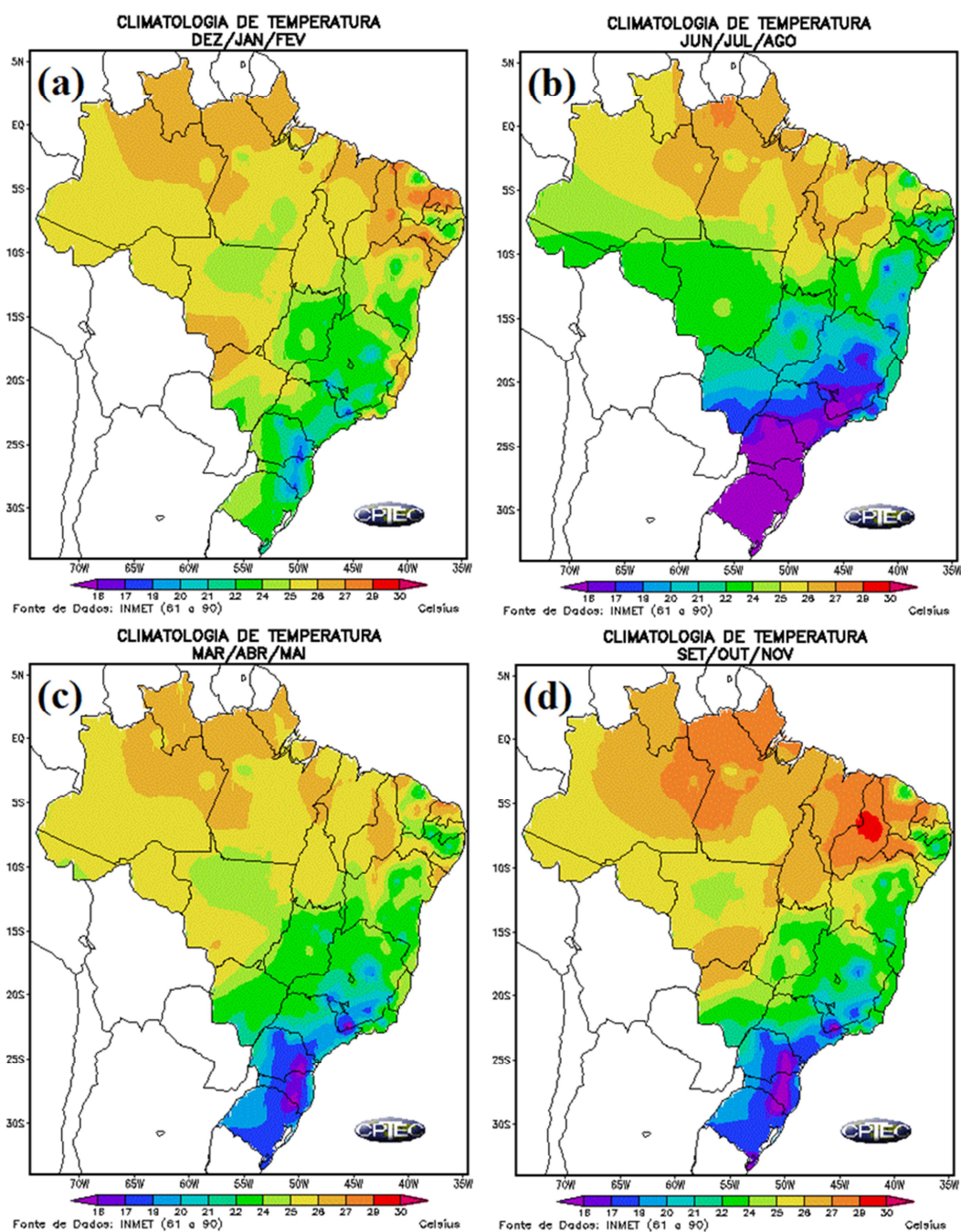


Figura 2.7- Climatologia da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) no Brasil para (a) verão, (b) inverno, (c) outono e (d) primavera, no período de 1961-1990. Fonte: CPTEC(2017).

2.3 PROJEÇÕES DE CLIMA FUTURO

As projeções ou cenários climáticos de emissões são utilizados na pesquisa climática com a finalidade de fornecer descrições plausíveis do comportamento do clima devido ao impacto do uso da terra, das emissões dos gases do efeito estufa e dos poluentes do ar (AMBRIZZI et al., 2007). Essas variáveis são utilizadas como dados de entrada de modelos climáticos e como base na avaliação dos impactos climáticos e nas opções de mitigação.

Assim, para uma melhor comparação entre estudos e modelos que visam analisar os impactos da evolução do clima, é preferível a utilização de um conjunto de cenários comuns a toda a comunidade científica.

Os cenários climáticos mais recentes adotados pela comunidade científica foram desenvolvidos e utilizados no último relatório do IPCC (IPCC, 2014), o AR5, e contem trajetórias de emissão, concentração e uso da terra e são denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Os RCPs foram desenvolvidos paralelamente com modelos de clima e de desenvolvimento socioeconômicos (MOSS et al., 2010). No total, foram desenvolvidos um conjunto de quatro RCPs que descrevem diferentes cenários para o século XXI, recebendo ao lado da sigla um número referente à forçante radiativa, que representa a quantidade de energia que a baixa atmosfera reterá em W/m^2 (VAN VUUREN et al., 2011). Os quatro RCPs são descritos como: (1) RCP8.5, com forçamento radiativo crescente até $8,5 \text{ W/m}^2$ e a concentração de CO_2 em torno de 1370 ppm; (2) RCP6.0, com forçamento radiativo em cerca de 6 W/m^2 e concentração de CO_2 equivalente a 850 ppm; (3) RCP4.5, com forçamento radiativo de $4,5 \text{ W/m}^2$ e concentração de CO_2 em torno de 650 ppm; e (4) RCP2.6, com forçamento radiativo em torno de 3 W/m^2 e concentração de CO_2 de 490ppm com um pico antes de 2100 e declínio posterior (Figura 2.8) (MOSS et al., 2010).

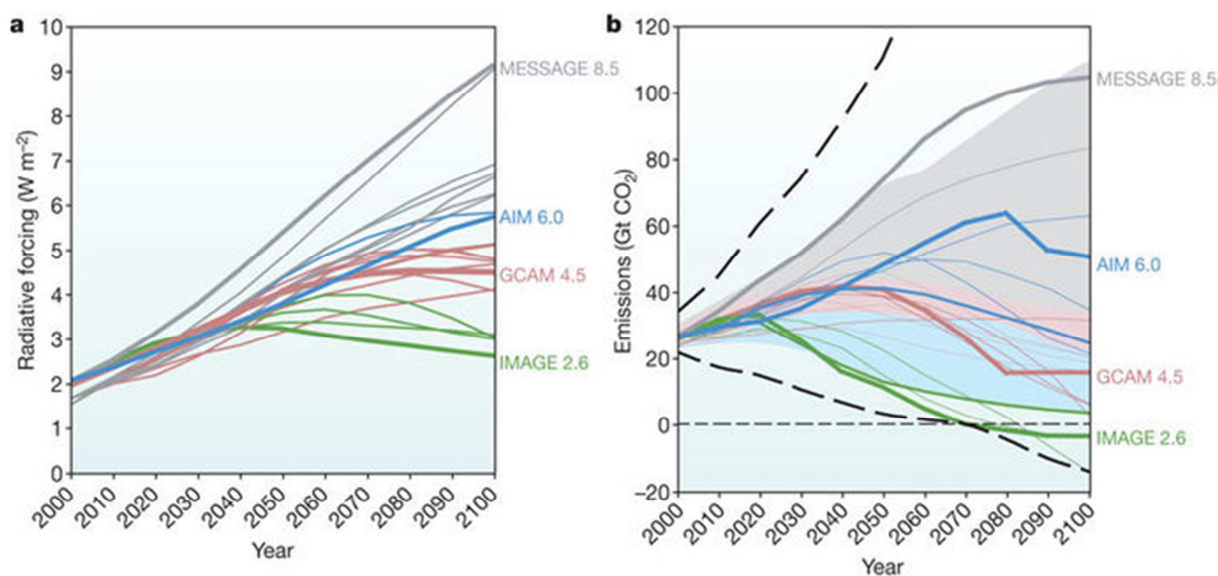


Figura 2.8- (a) Forçante radiativa em W/m^2 e (b) emissões em GtCO_2/ano para os quatro cenários de climáticos. Fonte: Moss et al. (2010).

Os relatórios do IPCC indicam de forma global e em longo prazo, que a temperatura média da superfície tenderá a aumentar tanto no cenário de maior concentração (RCP8.5) quanto no cenário menor concentração (RCP2.6). Os maiores valores em ambos os cenários

Venezuela e a Colômbia. Os resultados de anomalia para A2, também ocorrem em quatro faixas de aquecimento, porém com valores de anomalia mais elevados, sendo a faixa leste que vai desde o estado do Rio Grande do Sul até o litoral norte nordestino dividida em dois intervalos de 2°C a 3°C e de 3°C a 4°C. No restante do país o predomínio é de aquecimento de 4°C a 6°C, com uma pequena área situada na região amazônica de anomalias superiores a 6°C.

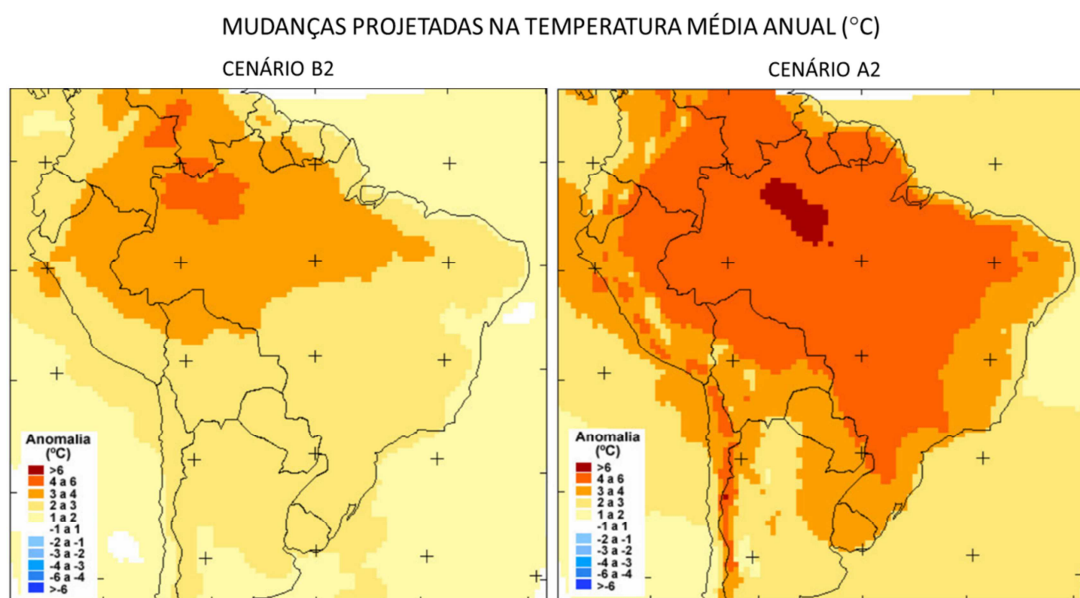


Figura 2.10 – Resultado da média de três modelos regionais (Eta/CPTEC, RegCM3 e HadRM3P) para a anomalia da temperatura média anual referentes ao período de 2071 a 2100 em relação a média de 1961-1990. A figura da esquerda representa anomalias para o cenário de menor emissão (B2), e a figura da direita representa anomalias para o cenário de maior emissão (A2). Fonte: Ambrizzi et al. (2007).

2.4 CULTURAS AGRÍCOLAS E O EFEITO DA TEMPERATURA DO AR

2.4.1 Algodão

Acredita-se que o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) se originou no continente Africano e que, seu cultivo (domesticação) tenha ocorrido há mais de 4000 anos no Sul da Arábia. As primeiras referências históricas desta planta datam da época de 3000 anos antes de Cristo, isto é, há mais de 5000 anos, em uma região do Paquistão, onde foram encontrados fragmentos de tela e um cordão de algodão. Na América, a informação mais antiga que se tem de algodão é no Norte do Peru, a mais de 2500 anos a.C. (BELTRÃO; ARAÚJO, 2004).

O algodoeiro é produzido em diversos países ao redor do globo, inclusive no Brasil, que é um dos cinco maiores produtores do mundo, e é cultivado essencialmente para a produção de fibras ou pluma (MONTEIRO, 2009; ANTUNES, 2017). No Brasil, o algodão é

cultivado nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste, sendo que o Centro-Oeste (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás) é o principal produtor nacional, com uma área total de 682,6 mil hectares na última safra, enquanto que a região Nordeste é a segunda maior produtora do país com uma área de 230,8 mil hectares (CONAB, 2017).

De acordo com o último boletim da CONAB (2017), a safra brasileira de 2016/2017 atingiu uma produção de 1.529,5 mil toneladas e uma produtividade de 1.629 kg por hectare, apesar de ter ocorrido uma diminuição de 1,7% na área total cultivada em relação à safra anterior.

O algodoeiro possui seu desenvolvimento dependente da temperatura do ar, sendo resistente a valores entre 15°C e 40°C (ROSOLEM, 2001), representando limites de desenvolvimento basal inferior (T_b) e basal superior (T_{max}) que, quando extrapolados, a taxa de desenvolvimento da planta passa a ser nula ou muito reduzida. Abaixo dos 15°C, mais precisamente entre 10°C e 12°C a planta começa a apresentar uma forte redução na taxa respiratória podendo levá-la à paralisação do metabolismo (EL-SHARKAWAY; HESKETH, 1965; LYONS; RAISON, 1970; FREELAND et al., 2006). Os cultivares de algodão em sua maioria possuem ciclo de desenvolvimento de 130 a 160 dias para variedades precoces e tardias, respectivamente (FIETZ et al., 2009), com desenvolvimento ideal na faixa de 20°C a 30°C (REDDY et al., 1992). A partir dos 30°C, que é a temperatura de máximo desenvolvimento (T_{ot}) utilizada neste trabalho, a fotorrespiração passa a diminuir, representando metade da fotossíntese e afetando o crescimento vegetal, o que acarreta no comprometimento da produção final, independente em que fase fenológica esse limite é ultrapassado (ROSOLEM, 2001).

A quantificação do acúmulo de unidades de calor ou soma térmica (graus-dia (°Cdia)) é de extrema importância para o manejo e acompanhamento do desenvolvimento da cultura (OOSTHERHUIS, 1999). Rosolem (2001) determinou a quantidade média de °C dia necessária para o desenvolvimento do algodão para as variedades ITA 90 e Antares na região de Rondonópolis no Mato Grosso. Utilizando a temperatura base de 15°C, o autor constatou que as variedades, em média, tiveram um acúmulo de 1287°C dia em 109 dias para atingir o final do ciclo, que se comparados com a literatura, representam um valores consideravelmente inferiores, já que consta que o ciclo médio do algodão necessita de 1575°C dia a 1675°C dia para um ciclo de 125 dias a 161 dias. No entanto os ganhos térmicos médios diários são muito próximos correspondendo a 11,8°C dia, 12,6°C dia e 10,4°C dia, respectivamente. O mesmo autor, em 2007, efetuou o mesmo cálculo para outro tipo de cultivar, o *Deltapine Acala 90*,

para as principais regiões produtoras do Mato Grosso e da Bahia, determinando um acúmulo térmico de 1970°C dia para ciclos de 179 dias no Sudeste do Mato Grosso, de 199 dias no meio Norte do mesmo estado e de 202 dias no Oeste baiano.

2.4.2 Milho

Apesar de parecer nativo do Brasil, o milho teve origem no México e na Guatemala. É uma espécie da família das gramíneas, sendo cultivado em altitudes que vão desde o nível do mar até 3 mil m em grande parte do globo (LERAYER, 2006).

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal de maior volume de produção no mundo, com aproximadamente 960 milhões de toneladas. Os seus maiores produtores são os Estados Unidos, China, Brasil e Argentina, que juntos representam 70% da produção mundial, principalmente para fins de alimentação animal. Esta é a segunda maior cultura de importância da produção agrícola no Brasil, sendo cultivado em praticamente todo o território nacional e, é superado apenas pela cultura da soja, que lidera a produção de grãos (PEIXOTO, 2014).

O Brasil é um país produtor de grande importância dentro do cenário agrícola mundial, com uma área cultivada com milho de 15,12 milhões de hectares e produção de 82 milhões de toneladas e, sendo hoje, um país estratégico, pois, é o terceiro maior produtor e o segundo maior exportador mundial de milho. Na última safra de 2016/2017, a produção brasileira de milho total atingiu 93.835,7 mil toneladas e uma produtividade de 5.409 kg por hectare (CONAB, 2017).

A importância econômica do milho é caracterizada pelas diversas formas de sua utilização, que vai desde a alimentação até a indústria de alta tecnologia. Apesar de possuir um uso versátil, a principal utilidade desse cereal está destinada a ração animal, sendo a sua produção acompanhando basicamente o crescimento da produção animal (NUNES, 2017).

Conforme Galvão et al. (2014), o milho possui um importante valor social e econômico devido ao seu baixo custo, bem como ao seu grande uso como matéria-prima nas indústrias. Estes autores fizeram uma comparação entre o sistema de produção deste cultivo utilizado nos anos 40 com o sistema que se é aplicado nos dias atuais e, de forma geral, eles destacaram que antigamente as plantações eram de pequena escala, com uso de insumos locais e sem a ajuda da tecnologia, enquanto que, nos dias atuais, o cultivo do milho ocorre

em grande escala, de forma moderna com o auxílio de maquinários e muito dependente de insumos externos.

Apesar da participação do milho na alimentação humana não ser muito grande, é de extrema importância em regiões de baixa renda, sendo o constituinte principal da alimentação diária, como ocorre no semi-árido nordestino, onde o milho é a principal fonte de energia para muitas pessoas (NUNES, 2017).

Assim, a importância do milho não está apenas na produção de grãos cada vez maior e na sua utilização como comercial, mas em todo o relacionamento que essa cultura tem na produção agropecuária brasileira, tanto no uso da produção animal, quanto no aspecto social de fonte de alimento para as pessoas, sendo um dos produtos mais importantes do setor agrícola brasileiro (NUNES, 2017).

A fenologia do milho é regulada principalmente pelas condições térmicas e para quantificar e avaliar o seu crescimento e desenvolvimento ao longo do ciclo produtivo utiliza-se a metodologia de soma térmica, que vem sendo muito utilizada e testada no Brasil (BERLATO et al., 1984; LOZADA;ANGELOCCI, 1999; GAIOLO et al., 2000; TOJO SOLER et al., 2005). Para tal, é necessário a determinação das temperaturas cardinais T_b , T_{ot} e T_{max} . Berlato e Sutili (1976) determinaram como melhores limites para cultivares precoces, de ciclos médios e tardios, da época, valores de T_b de 4°C, 6°C e 8°C, respectivamente. Kiniry (1991) obteve valores para T_b e T_{max} de 8°C e 44°C, e uma faixa de desenvolvimento ideal de 26°C a 34°C. Já para Tojo Soler et al. (2005) as temperaturas base de 8°C e 10°C foram considerados com afinidade de determinar o tempo térmico entre o aparecimento de duas folhas sucessivas (filocrono), encontrando um intervalo de 50°C dia até a décima segunda folha.

O conceito de soma térmica também pode ser empregado na determinação do crescimento do índice área foliar durante todo o ciclo de desenvolvimento. Muller et al. (2005), utilizaram esse conceito para estimar o crescimento do índice de área foliar (IAF) em uma cultivar de milho híbrido precoce utilizando o valor de 8°C para T_b inferior, e constataram que foram precisos 900°C dia para atingir o máximo de IAF e mais 900°C dia até a maturação, totalizando 1800°C dia para todo o ciclo do milho.

2.4.3 Soja

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é uma cultura de grande impacto econômico para o Brasil, sendo a principal cultura do agronegócio brasileiro. É uma planta originária de uma região denominada Manchúria, que fica no Nordeste da China, e chegou aos Estados Unidos por volta de 1890, onde era cultivada como forrageira, avançou para o Paraguai na década de 1940 e em 1950 se expandiu para o México e Argentina. Na Europa, a soja foi introduzida no final do século XV nos jardins botânicos da Inglaterra, França e Alemanha (MANDARINO, 2017). No Brasil, conforme Bonato e Bonato (1987), chegou em 1882 pelos Estados Unidos, e no princípio era estudada como forrageira, não se dando valor à extração de óleo vegetal e obtenção do farelo.

No final da década de 60, o Brasil começou a enxergar a soja como um produto comercial, influenciado pelo crescimento da área de trigo na Região Sul que era a principal cultura até então nesta região e, a soja surgia como uma opção de verão, em sucessão ao trigo. Em meados de 1970 houve uma explosão do preço da soja no mercado mundial, despertando ainda mais o interesse dos agricultores e do próprio governo brasileiro. Desde então, o país passou a investir em tecnologia para adaptação da cultura às condições brasileiras (EMBRAPA, 2017).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, atrás apenas dos Estados Unidos. Na última safra, a produção brasileira foi de 113,923 milhões de toneladas e a produtividade chegou a 3.362 kg/ha, com destaque para o estado do Mato Grosso, que é o maior produtor brasileiro, onde a produção foi de 30,514 milhões de toneladas e a produtividade de 3.273 kg/ha (CONAB, 2017). Entre os principais estados brasileiros produtores, além do Mato Grosso, destacam-se o Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul (MANDARINO, 2017).

Dentre os grandes produtores (Estados Unidos, Brasil, Argentina), o Brasil é o que apresenta o maior potencial de expansão em área cultivada, podendo, se depender das necessidades de consumo do mercado, mais do que duplicar a produção. Assim, em curto prazo, o país pode constituir-se no maior produtor e exportador mundial de soja e seus derivados (MANDARINO, 2017).

Os fatores climáticos são de extrema importância para o desenvolvimento da soja. Dentre as variáveis meteorológicas a temperatura é o fator que mais influencia no crescimento e desenvolvimento da soja. As condições térmicas ideais para o seu desenvolvimento se

encontram na faixa de 20°C e 30°C, com T_b e T_{max} de 10°C e 40°C, respectivamente. Quando as temperaturas ultrapassam os 40°C podem provocar danos no período da floração e impactam na capacidade de retenção das vagens (FARIAS et al., 2007). Nas fases iniciais do desenvolvimento da soja, na qual a planta é mais sensível às condições meteorológicas, temperaturas que superam os 35°C, juntamente com ausência de ventos e nebulosidade, a superfície do solo sofre superaquecimento e quando atinge os 55°C provocam o tombamento fisiológico da planta (NEUMAIER et al., 2000).

Camargo et al. (1987) analisaram a relação entre a temperatura do ar e a razão de desenvolvimento para cultivares precoce, semi-precoce, média e tardia, determinando um valor de T_b para o cálculo da soma térmica necessária para atingir a maturação para as quatro cultivares no estado de São Paulo. Para todas as variedades foi determinada uma T_b de 14°C e obteve-se 1030°C dia para a variedade precoce, 1227°C dia para a semi-precoce, 1275°C dia para a média e 1336°C dia para a variedade de ciclo tardia para um desenvolvimento equivalente a 3 meses.

Farias et al. (2007) afirma que a temperatura média mínima para o desenvolvimento da soja, entre cultivares brasileiras, é em torno dos 13°C, e na ocorrência de temperaturas elevadas a planta adianta a sua floração, promovendo a diminuição da altura da planta. Já na maturação as altas temperaturas acarretam na aceleração da fase, afetando negativamente na qualidade das sementes e, sob baixas temperaturas, pode ocasionar na manutenção de folhas verdes após a maturação da semente (retenção foliar) e das hastes primárias e secundárias, o que resulta em atraso da colheita.

Setiyono et al. (2007) observaram o efeito da temperatura na planta da soja em condições de alto rendimento e estimaram temperaturas cardinais para diferentes estágios de desenvolvimento, com T_b variando de 0°C a 7°C, T_{ot} de 21°C a 32°C e T_{max} de 38°C a 45°C, representando a alta capacidade de adaptação da cultura sob diferentes condições climáticas.

Em um estudo mais recente de Rockenbah et al. (2016), o objetivo foi calcular a soma térmica e estimar a duração das fases fenológicas de três cultivares diferentes para dois anos de safra (2012/2013 e 2013/2014) em duas localidades: a primeira na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e a segunda em Frederico Westphalen/RS, utilizando o valor de 10°C para T_b (PIPER, 1996). Rockenbah et al. (2016), constataram valores de soma térmica entre 1741°C dia e 1835°C dia para o primeiro ano, e valores entre 1663°C dia e 1818°C dia para o segundo ano. A safra de 2012/2013 se caracterizou pelas temperaturas máximas mais elevadas em quase todas as fases fenológicas (34°C e 35°C) e pelas temperaturas mínimas mais baixas

em relação à safra seguinte, o que ocasionou em uma diferença na duração dos ciclos para cada cultivar. A primeira variedade acumulou 1743°C dia em 132 dias no primeiro ano, no segundo, acumulou 1663°C dia em 116 dias, a segunda variedade acumulou 1741°C dia em 132 dias e no ano seguinte a soma térmica foi de 1818°C dia em 127 dias, e para a terceira variedade foram obtidos 1835°C dia em 143 dias contra 1818°C dia em 127 dias de ciclo na segunda safra. Esses resultados mostram como a temperatura do ar influencia na duração dos ciclos de desenvolvimento da soja. As temperaturas médias em cada fase fenológica ficaram entre o limiar ótimo observado em Setiyono et al. (2007).

2.4.4 Trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma cultura de inverno, que teve origem há cerca de 10 mil anos, em uma região conhecida como Crescente Fértil, no Oeste da Ásia, área que hoje se estende desde o Egito até o Iraque (MONTEIRO, 2009; MORI et al., 2016). Seus grãos eram inicialmente consumidos em forma de papa junto com peixes e frutas e, foi por volta de 4000 a.C., que egípcios descobriram o processo de fermentação deste cereal, produzindo então o pão. O trigo foi se espalhando para o mundo e em torno de 2000 a.C. os chineses já utilizavam-no para fazer farinhas, massas e pastéis (FLANDRIN e MONTANARI, 1998).

No continente europeu, o cultivo do trigo expandiu-se para as regiões mais frias como Rússia e Polônia e no século XV chegou às Américas (FLANDRIN; MONTANARI, 1998). No Brasil, as suas sementes chegaram no ano de 1534, mas foi só em meados do século XVII que representou grande importância econômica, sendo cultivado em São Paulo e no Rio Grande do Sul, onde encontraram ambiente, clima e solo adequados às suas exigências (ROSSI; NEVES, 2004; MONTEIRO, 2009). Há relatos sobre o cultivo no Brasil nessa época também nos Estados de Rio de Janeiro, Minas Gerais e Bahia (MORI et al., 2016).

O trigo, por ser um dos três cereais mais cultivados no mundo, vem recebendo destaque na economia mundial, principalmente no setor de commodities (TAKEITI, 2015). De acordo com CONAB (2017), no Brasil a produção de trigo na safra de 2016/2017 foi de 6.726,8 mil toneladas e a produtividade de 3.175 kg/ha.

Segundo CONAB (2017), a área cultivada de trigo no Brasil se concentra na Região Sul, principalmente nos estados do Paraná e do Rio Grande do Sul, que representaram nas safras de 2016 e 2017, 87,9% e 86,8% das áreas cultivadas do país, respectivamente. Já as demais regiões do país representam em média apenas 9,9%. Em relação à produção e

produtividade, foram registradas reduções de 36,1% e de 29,5%, respectivamente, da safra de 2016 para 2017. O maior responsável por esses resultados foram as lavouras da Região Sul, que sofreram redução da área plantada de um ano para o outro e ainda foram impactadas por condições meteorológicas adversas durante todo o ciclo de desenvolvimento, com a ocorrência de períodos mais secos e quentes durante a floração.

A temperatura do ar é uma das principais variáveis que afetam o desenvolvimento do trigo (STRECK et al., 2003), sendo uma planta dependente de condições térmicas mais frias para a indução da floração (vernalização) (SLAFER, 1996; SLAFER e RAWSON, 1994). Essa exigência é utilizada como forma de classificação da planta de trigo, sendo os trigos de inverno mais dependentes e os trigos de primavera menos dependentes da vernalização. No Brasil, as variedades mais cultivadas são as de primavera, uma vez que as condições ambientais brasileiras não são favoráveis à floração em trigos de inverno, sendo mais cultivadas no Sul do Brasil e semeadas durante o outono (WALTER et al., 2009).

Streck e Alberto (2006) analisaram o impacto da mudança climática no rendimento da cultura de trigo em Santa Maria, RS, através da criação de cenários climáticos de mudança climática, dobrando a concentração de CO₂ e com diferentes acréscimos de temperatura e pluviometria. Os cenários climáticos com acréscimo de 3°C a 6°C na temperatura média do ar juntamente com a concentração de CO₂ em 700ppm, anularam os efeitos positivos do acréscimo de CO₂ no rendimento de grãos de trigo, sendo o efeito mais significativo observado em cenários com aumento de 5°C e 6°C. Para um cenário de acréscimo de 2°C, CO₂ em 700ppm, com e sem aumento pluviométrico promoveu aumento significativo no rendimento de grãos, demonstrando ser uma condição benéfica à cultura do trigo. Complementando o estudo, os autores verificaram em Siqueira et al. (2000, 2001), que o encurtamento do ciclo de desenvolvimento é a principal causa da diminuição do rendimento de grãos das culturas, concluindo que o aumento da temperatura pode diminuir o tempo de desenvolvimento do trigo. Em Streck (2005) foi efetuada uma revisão da literatura, na qual, se concluiu que o aumento da concentração de CO₂ de 350ppm à época para 700ppm, na ausência do aumento de temperatura, acarretaria em aumento do rendimento de aproximadamente 10% em plantas C₄ e de 30% em plantas C₃. Acrescentando o aumento da temperatura em 1°C, o benefício provocado pelo aumento de CO₂ seria anulado.

Alberto et al. (2009) estudaram a melhora na estimativa dos estágios de desenvolvimento em cultivares de trigo brasileiras de ciclo precoce, médio e tardio, utilizando diferentes combinações de temperaturas cardinais para três estágios de desenvolvimento que

compreendem da emergência até espiguetas terminal (EM-ET), da espiguetas terminal até antese (ET-AN) e da antese até a maturidade fisiológica AN-MF (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Combinações de temperaturas cardinais mínima, ótima e máxima para os estágios de desenvolvimento do trigo EM-ET, ET-NA e NA-MF. Adaptado: Alberto et al.(2009).

Fases	T _b (°C)	T _{ot} (°C)	T _{max} (°C)
EM-ET	0	19	30
	0	19	35
	0	24	35
ET-AN	4	24	35
	4	24	40
	4	30	40
AN-MF	8	24	35
	8	24	40
	8	30	40

Os arranjos com T_{ot} e T_{max} mais elevadas resultaram em melhoria na estimativa de ocorrência das fases fenológicas, concluindo que as cultivares brasileiras por serem de trigos de primavera possuem temperaturas cardinais mais elevadas do que as variedades de trigos de inverno (ALBERTO et al., 2009).

Walter et al. (2009), realizaram um estudo em Santa Maria, RS para cultivares de ciclo precoce (ciclo de aproximadamente 130 dias), médio (ciclo de aproximadamente 150 dias) e tardio (ciclo de aproximadamente 160 dias), com a finalidade de associar a duração do ciclo de desenvolvimento (emergência até maturação) e das fases vegetativa (emergência até antese) e reprodutiva (antese até maturação) com a velocidade do surgimento de folhas, utilizando do conceito de soma térmica na determinação da duração dos estágios de desenvolvimento e o filocrono para estimar a velocidade de aparecimento das folhas. A partir da emergência a soma térmica diária foi calculada utilizando a metodologia de Streck (2002); Streck et al. (2005) e T_b, T_{ot} e T_{max} iguais a 0°C, 22°C e 35°C, respectivamente.

As cultivares precoces obtiveram duração de ciclo entre 1963,5°C dia e 2083,9°C dia, as de ciclo médio entre 1993,1°C dia e 2073,7°C dia e, as de ciclo tardio a duração foi de 2183,9°C dia a 2503,6°C dia, sendo a fase vegetativa o principal fator determinante na duração do ciclo total do trigo e no número final de folhas (WALTER et al., 2009).

2.4.5 Arroz irrigado

O arroz (*Oryza sativa* L.) é cultivado em vários lugares ao redor do globo e é um dos mais importantes grãos em termos de valor econômico, sendo a base alimentar de bilhões de pessoas, principalmente em países subdesenvolvidos. Cerca de 590 milhões de toneladas de arroz são produzidas anualmente no mundo, sendo que, mais de 75% desta produção é oriunda do sistema de cultivo irrigado (EMBRAPA, 2005).

O arroz irrigado por inundação controlada é cultivado na região subtropical do Brasil, especialmente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (MONTEIRO, 2009), sendo que o Rio Grande do Sul se destaca como o maior produtor nacional, responsável por aproximadamente 70% do total produzido, enquanto que Santa Catarina tem uma produção em torno de 9% (SOSBAI, 2016). No estado gaúcho, cerca de 12% do arroz irrigado produzido é consumido nesta região e, em Santa Catarina em torno de 30% é consumido pelos próprios catarinenses; o restante em cada estado é comercializado para os demais centros consumidores ou exportado (SOSBAI, 2016).

Na última safra de 2016/2017, no Rio Grande do Sul a produtividade de arroz irrigado foi de 7.930 kg/ha e a produção chegou a 8.728,6 mil toneladas, com um aumento de 2,3% na área cultivada, se comparado com a safra anterior (CONAB, 2017).

A planta do arroz é extremamente sensível às condições climáticas, sendo a temperatura uma das variáveis de maior importância para o seu desenvolvimento (MONTEIRO, 2009).

Yoshida e Parao (1976) determinaram as temperaturas cardinais para os estágios de desenvolvimento do arroz em regiões tropicais, com intervalo de 7°C a 20°C para T_b , de 20°C a 35°C para T_{ot} e de 30°C a 45°C para T_{max} ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento. A fase mais sensível do arroz é a reprodutiva, na qual a etapa mais importante é a floração, que na ocorrência de temperaturas diurnas acima de 33°C podem ocasionar na interrupção do processo reprodutivo (YOSHIDA; PARAO, 1976).

Yamakawa et al. (2007) estudaram o efeito de temperaturas elevadas no metabolismo do arroz e o impacto na qualidade dos grãos. Observaram que houve diminuição do peso e um aumento de grãos com aparência calcária, após a exposição do arroz sob altas temperaturas (33°C) durante o amadurecimento dos grãos.

Streck et al. (2007) determinou a quantidade de graus-dia de algumas fases do ciclo de desenvolvimento do arroz irrigado para cultivares do sul do Brasil, utilizando três métodos

diferentes: método 1 (GILMORE JUNIOR; ROGERS, 1958; ARNOLD, 1960), método 2 (GILMORE JUNIOR; ROGERS, 1958) e método 3 (STRECK, 2002; STRECK et al., 2005). Considerou-se dois tipos de cálculo, o primeiro com temperaturas cardinais constantes ao longo de todo o ciclo, assumindo 11°C para T_b (INFELD et al., 1998), 28°C para T_{ot} (STEINMETZ, 2004) e 40°C para T_{max} (GAO et al., 1992), e o segundo considerando condições diferentes ao longo do desenvolvimento, utilizando da emergência ao estágio R2 as temperaturas cardinais de 11°C, 28°C e 40°C e do R2 ao R9, completando o ciclo, utilizou-se 15°C, 25°C e 30°C.

Streck et al. (2007), constataram diferenças da soma térmica entre as variedades, entre os métodos e entre as considerações de temperaturas cardinais constantes e variáveis. A variedade de ciclo tardio apresentou valores de soma térmica bastante superior em relação à de ciclo precoce tanto para temperaturas cardinais constantes quanto variáveis. Entre os métodos, constataram uma diminuição do método 1 para o método 3, com maior evidência quando utilizado temperaturas cardinais variáveis (Figura 2.11).

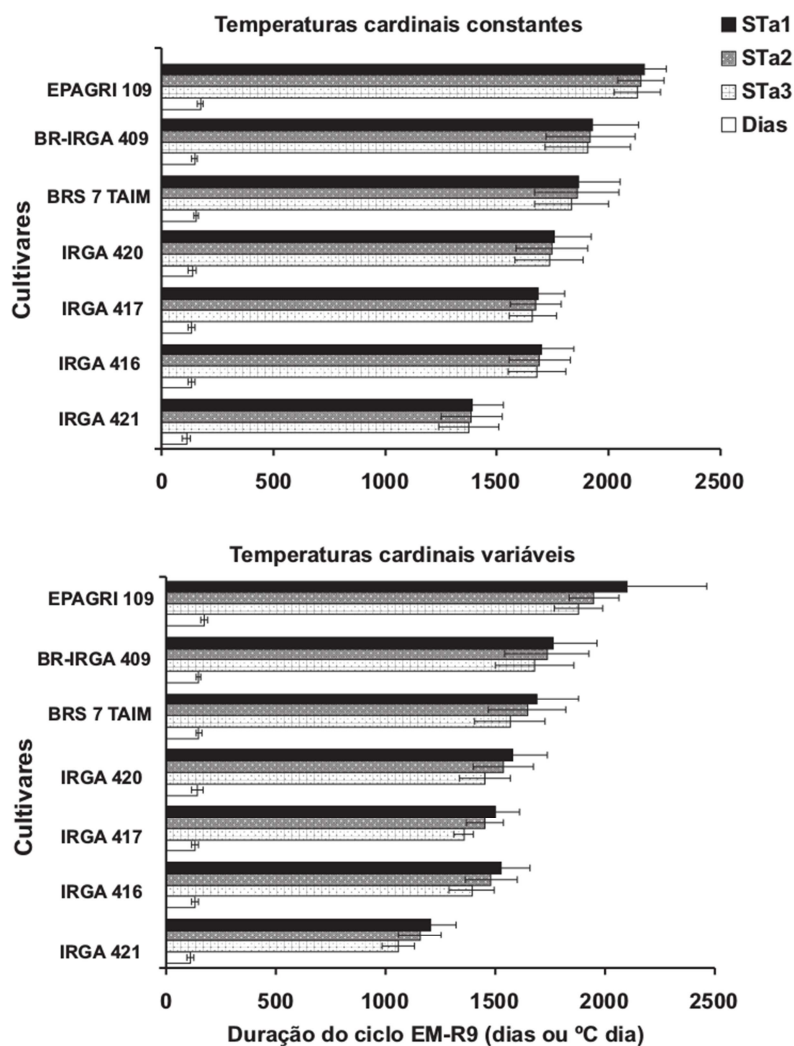


Figura 2.11 – Soma térmica referente ao ciclo completo para diferentes cultivares calculada pelo método 1 (STa1), método 2 (STa2) e método 3 (STa3), considerando temperaturas cardinais constantes e variáveis. As barras representam a média e o desvio padrão de cinco épocas de semeadura nos anos agrícolas 2003/2004 e 2004/2005 em Santa Maria, RS. Fonte: Streck et al. (2007).

3 DADOS E METODOLOGIA

No intuito de observar como as mudanças climáticas podem afetar a distribuição geográfica das culturas agrícolas mais cultivadas no Brasil, foram utilizadas simulações climáticas geradas pelo *Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services* utilizando o modelo HadGEM2-ES (resolução de 2,5°latitude x 2,5°longitude). Estas simulações foram regionalizadas utilizando a técnica de downscaling (HOSTETLER et al., 2011) para todo o Brasil, sendo as simulações do HadGEM2-ES utilizadas como condição de contorno para o modelo regional RegCM4 (0,5°latitude x 0,5°longitude) (GIORGI; ANYAH, 2012). Para comparar o clima presente com os valores simulados para o futuro, foi utilizada uma série de

dados de referência do período 1976-2005, e duas séries futuras no intervalo de 2070-2099 representando as condições dos cenários de RCP2.6 e RCP8.5.

3.1 MODELO HadGEM2-ES

O *Met Office Hadley Centre for Climate Science and Services* adotou uma abordagem para a modelagem climática baseada na ideia de “famílias” de modelos, que consiste em um conjunto de modelos que abordam diferentes aspectos, que um único modelo não seria capaz de abordar ou se fosse capaz, se faria necessário a utilização de um aporte computacional muito superior. Assim cada membro dessa família de modelos difere de várias maneiras como, por exemplo, no aspecto da resolução, extensão vertical, atmosfera única ou acoplada com o oceano e inclusão do *feedback* do sistema terrestre (ES) (MARTIN et al., 2011).

O modelo HadGEM2-ES é parte de uma família de modelos, que foram utilizados no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (IR5 – *Assessment Report*) do ano de 2013/2014. Trata-se de modelos que incluem componentes atmosféricos e oceânicos, com uma extensão vertical a fim de estabelecer uma boa resolução da estratosfera, e um componente referente ao sistema terrestre que inclui dinâmica da vegetação, biologia oceânica e química da atmosfera. O modelo também inclui melhorias em relação a erros sistemáticos encontrados na versão anterior HadGEM1, como tendências de temperatura continental do Hemisfério Norte e tendências da temperatura da superfície do mar tropical e baixa variabilidade.

O acoplamento total da família HadGEM2 é configurado com a inclusão de todos os processos apresentados na Figura 3.1, na qual os trapézios representam os modelos membros e os retângulos, cada um dos processos do sistema climático resolvidos (MARTIN et al., 2011).

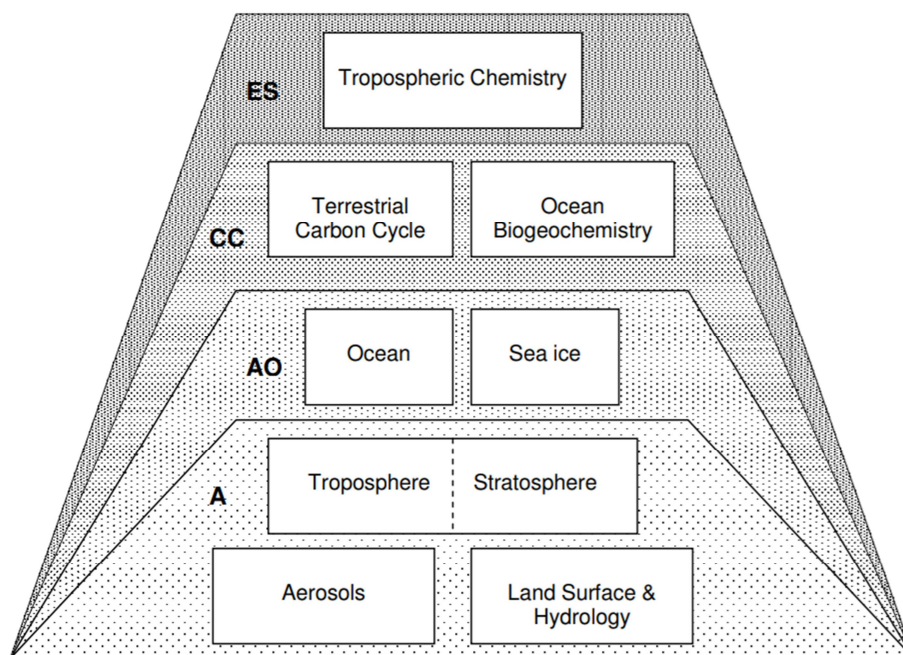


Figura 3.1 – Modelos membros e processos do sistema climático. Modelo atmosférico (A), com ou sem uma estratosfera bem resolvida; modelo acoplado Oceano-Atmosfera (AO), com adição de componentes oceânicos e de gelo marinho; modelo da configuração acoplada do ciclo do carbono (CC), com processos do ciclo do carbono; modelo da configuração completa do sistema terrestre (ES), com adição da química troposférica. Fonte: Martinet et al. (2011).

Pelo fato de o HagGEM2-ES ser um modelo utilizado para a detecção de mudanças climáticas que engloba um período muito extenso, possui um calendário no qual os meses são compostos por 30 dias e, conseqüentemente, os anos são compostos por 360 dias.

3.2 MODELO RegCM4

O *Regional Climate Model* (RegCM) é um modelo climático regional, cuja primeira versão (RegCM1) foi desenvolvida no NCAR e descrita em Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1990), sendo o primeiro modelo de área limitada desenvolvido para simulações climáticas de longo prazo (GIORGI et al., 2012). Desde então sofreu aprimoramentos pelo *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP) (GIORGI et al. 1993a, 1993b; GIORGI; MEARNS, 1999; PAL et al., 2007), e atualmente se encontra na sua versão 4 (RegCM4).

As melhorias do RegCM4 em relação as suas versões anteriores incluem novos esquemas de utilização dos códigos de parametrização física da precipitação, um novo modelo de interação superfície-atmosfera, química e aerossóis e a utilização de uma gama mais extensa de condições de contorno. Já as equações dinâmicas e termodinâmicas não sofreram grandes mudanças desde a segunda versão, podendo ser consideradas as mesmas desde então (GIORGI et al., 2012).

Os dados de entrada para o procedimento de *downscaling* com o modelo RegCM4 foram extraídos do modelo global HadGEM2-ES, e as simulações regionais foram geradas com uma resolução espacial de 50km para todo o Brasil.

Para as análises aqui apresentadas, foi utilizada a saída diária de temperatura média do ar e efetuou-se o cálculo da média anual (Janeiro a Dezembro) e, em seguida, a média dos 29 anos para o período de referência e para o período futuro de cada cenário climático. A partir desses resultados foram calculadas anomalias de temperatura em relação à referência para cada cenário futuro. Esse processo foi efetuado para o período de cultivo de cada cultura, a fim de se observar o aumento de temperatura em cada um dos ciclos.

Em relação à estimativa da soma térmica, foram utilizadas temperaturas cardinais constantes para todo o ciclo de desenvolvimento no período de cultivo de cada cultura, especificados na tabela 3.1 da seção 3.4. Para os valores de temperatura do ar de cada cenário climático foram selecionados 29 ciclos para cada cultura referentes aos seus respectivos períodos de desenvolvimento e, posteriormente, efetuada uma média para a obtenção de um ciclo médio de temperatura média do ar (T_m). Esse processo totaliza três ciclos para cada cultura referentes ao período de referência e aos cenários RCP2.6 e RCP8.5. Os valores de T_m obtidos foram utilizados para o cálculo da soma térmica através dos métodos especificados na seção 3.3.

3.3 CONCEITO DE GRAUS-DIA OU SOMA TÉRMICA DIÁRIA

Para quantificar os impactos dos cenários climáticos no desenvolvimento das culturas agrícolas, foi utilizado o conceito de graus-dia ou soma térmica diária (STd, °C dia). Esse conceito se baseia no fato de que a taxa de desenvolvimento diário de uma planta está relacionada à temperatura do ar, pressupondo a existência de temperaturas cardinais T_b , T_{ot} e T_{max} , sendo T_b e T_{max} os valores abaixo e acima, respectivamente, dos quais o desenvolvimento é nulo ou muito reduzido, e T_{ot} correspondendo ao valor de maior taxa de desenvolvimento (Figura 3.2). Cada espécie vegetal e variedade intraespecífica possui suas temperaturas cardinais e valores específicos de STd para todo o ciclo de desenvolvimento, que acumulados definem o conceito de graus-dia acumulados ou soma térmica (GD, °C dia) (PEREIRA, et al., 2002).

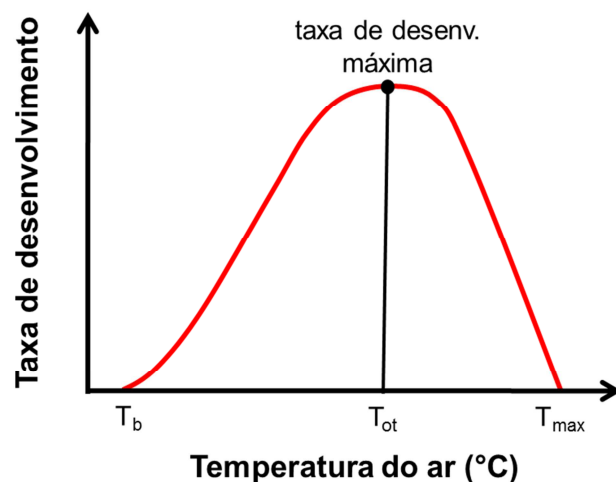


Figura 3.2 - Taxa de desenvolvimento vegetal em relação às temperaturas cardinais T_b , T_{ot} e T_{max} . Adaptado de Pereira et al., (2002).

O cálculo de STd pode ser expresso pelos seguintes métodos, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 3.3 de Streck et al. (2007):

Método 1 (GILMORE JUNIOR; ROGERS, 1958; ARNOLD, 1960):

$$STd_1 = (T_m - T_b). 1dia \quad (1)$$

em que se $T_m < T_b$, então $T_m = T_b$.

Método 2(GILMORE JUNIOR; ROGERS, 1958):

$$STd_2 = (T_m - T_b). 1dia \quad (2)$$

em que se $T_m < T_b$, então $T_m = T_b$, e se $T_m > T_{ot}$, então $T_m = T_{ot}$.

Método 3 (STRECK, 2002; STRECK et al., 2005):

$$STd_3 = (T_m - T_b). 1dia \quad (3)$$

em que quando $T_b \leq T_m \leq T_{ot}$ e

$$STd_3 = \frac{(T_{ot} - T_b)(T_{max} - T_m)}{(T_{max} - T_{ot})}. 1dia \quad (4)$$

Quando $T_{ot} < T_m \leq T_{max}$,

se $T_m < T_b$ então $T_m = T_b$,

se $T_m > T_{max}$ então $T_m = T_{max}$.

nas quais T_m é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_b a temperatura cardinal basal inferior ($^{\circ}\text{C}$), T_{ot} a temperatura ótima ($^{\circ}\text{C}$), e T_{max} a temperatura cardinal basal superior ($^{\circ}\text{C}$). Somando-se os valores de STd de cada dia do ciclo da cultura, obtém-se GD .

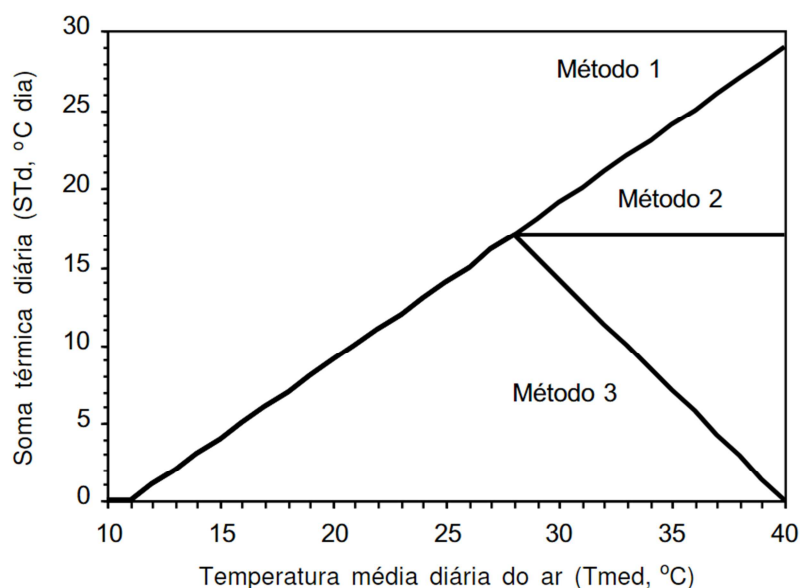


Figura 3.3 – Representação gráfica referente aos três métodos de cálculo da STd para o experimento realizado por Streck et al. (2007), no qual foram consideradas $T_b = 11^{\circ}\text{C}$, $T_{ot} = 28^{\circ}\text{C}$ e $T_{max} = 40^{\circ}\text{C}$. Fonte: Streck et al. (2007).

3.4 REGIÕES PRODUTORAS E TEMPERATURAS CARDINAIS

Na estimativa do cálculo da soma térmica através dos métodos supracitados, foram consideradas as temperaturas cardinais da Tabela 3.1, com base nas referências discutidas na seção 2.4. Os períodos de cultivo foram estabelecidos utilizando como base o calendário nacional agrícola (CONAB, 2017), fixando um número médio de dias e as regiões de maior produção (Figura 3.4). Para a cultura de arroz, foi considerado somente o estado do Rio Grande do Sul, onde há o predomínio do cultivo do arroz irrigado. Já na estimativa da duração do ciclo de desenvolvimento foi estabelecido o primeiro dia de cada mês como o início da germinação.

Os valores encontrados de $^{\circ}\text{C dia}$ para os cenários RCP2.6 e RCP8.5 foram utilizados para efetuar a comparação entre os métodos. Para a duração dos ciclos de cada cultura, houve a comparação entre os cenários climáticos através de mapas de anomalia de dias do ciclo.

Tabela 3.1—Temperaturas cardinais de cada cultura, juntamente com o cumulo térmico esperado da germinação até a maturação, e com a duração do ciclo e período de desenvolvimento.

Culturas	T _b (°C)	T _{ot} (°C)	T _{max} (°C)	GD (°C dia)	Ciclo de desenvolvimento	Referências
Algodão	15 ¹	30 ²	40 ¹	1675 ¹	Dez – Abr (160 dias) ¹	¹ Rosolem (2001) ² Reddy et al. (1992)
Milho 1ª safra	8 ³	28 ⁴	40 ⁴	1800 ³	Out – Jan (120 dias) ⁵	³ Muller et al. (2005) ⁴ Kiniry (1991)
Soja	10 ⁶	31 ⁶	40 ⁶	1336 ⁷	Out – Dez (90 dias) ⁵	⁵ CONAB (2017) ⁶ Farias et al. (2007)
Arroz	11 ⁸	28 ⁹	40 ¹⁰	1446 ¹¹	Out – Fev (130 dias) ¹¹	⁷ Camargo et al. (1987) ⁸ Infeld et al. (1998) ⁹ Steinmetz (2004)
Trigo	0 ¹²	21 ¹²	40 ¹²	2040 ¹³	PR: Abr – Jul (120 dias) ⁵ RS: Jun – Set (120 dias) ⁵	¹⁰ Gao et al. (1992) ¹¹ Steinmetz et al. (2015) ¹² Alberto et al. (2009) ¹³ Streck e Aberto (2006)

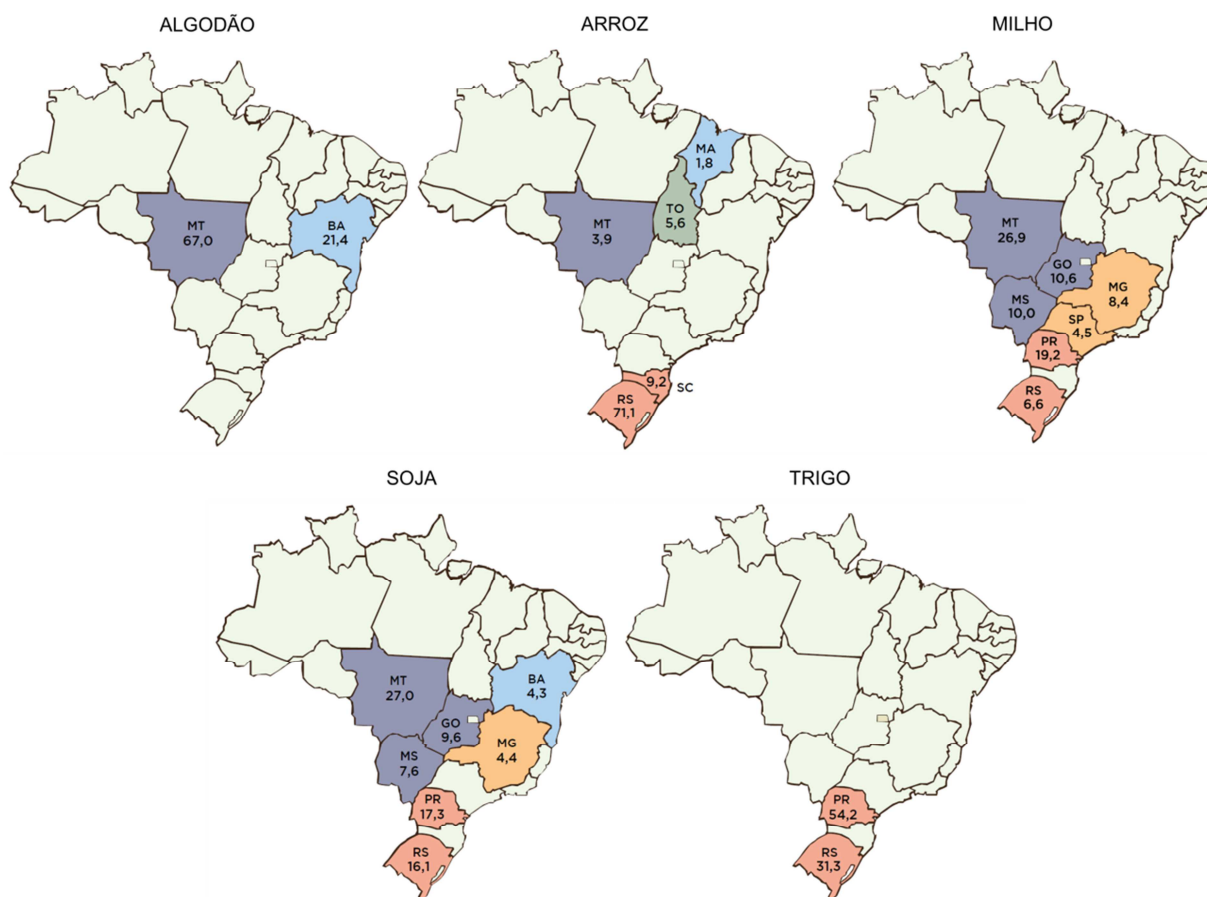


Figura 3.4 –Porcentagem de produção dos principais estados produtores de algodão, arroz, milho, soja e trigo. Fonte: MAPA (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar a discussão sobre os impactos do acréscimo de temperatura no ciclo de desenvolvimento das culturas de algodão, arroz irrigado, milho, soja e trigo, é necessário descrever como o modelo RegCM4 simulou os cenários de temperatura do ar no clima futuro para o período de 2070 a 2099.

Inicialmente foi comparado o período de referência do modelo RegCM4 com as condições registradas em período semelhante. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a climatologia sazonal da temperatura média do ar para o período referência de 1976-2005 do modelo RegCM4 (Figuras 4.1a, 4.1c, 4.2a e 4.2c) e para os dados observados de Xavier et al. (2016) no período de 1980-2005 (Figuras 4.1b, 4.1d, 4.2b e 4.2d).

O período de referência regionalizado pelo RegCM4 representa bem o padrão de distribuição de temperatura latitudinal bem como os efeitos da topografia em todos os trimestres, como observado, principalmente, nas regiões serranas do Sul e do Sudeste do país. No entanto, algumas diferenças são observadas em relação aos valores médios de temperatura. São observadas temperaturas mais baixas de forma geral no Centro-Sul do país, sendo mais evidenciadas nos estados de GO, MG, TO e BA, com valores entre 21°C e 24°C para o verão (Figuras 4.1a e 4.1b) e o outono (Figuras 4.1c e 4.2d), enquanto que nos dados observados se encontram valores de 21°C a 27°C. No RS se observa um comportamento contrário para o verão, no qual o modelo RegCM4 apresenta temperaturas mais elevadas no Oeste do estado, de 25°C a 28°C, e nos dados observados são encontrados valores entre 24°C e 25°C. No entanto, é na porção mais ao norte do país que são observadas as maiores diferenças em todas as estações. Do estado do MT até o Noroeste do PA é mostrado pelos dados simulados um acréscimo de temperatura de 26°C até 32°C, enquanto que nos dados observados o gradiente é menor, de apenas 2°C a 3°C, sendo maior no inverno e com valores absolutos maiores na primavera. Mesmo com essas diferenças, o modelo RegCM4 conseguiu representar bem a distribuição e a magnitude da temperatura média anual.

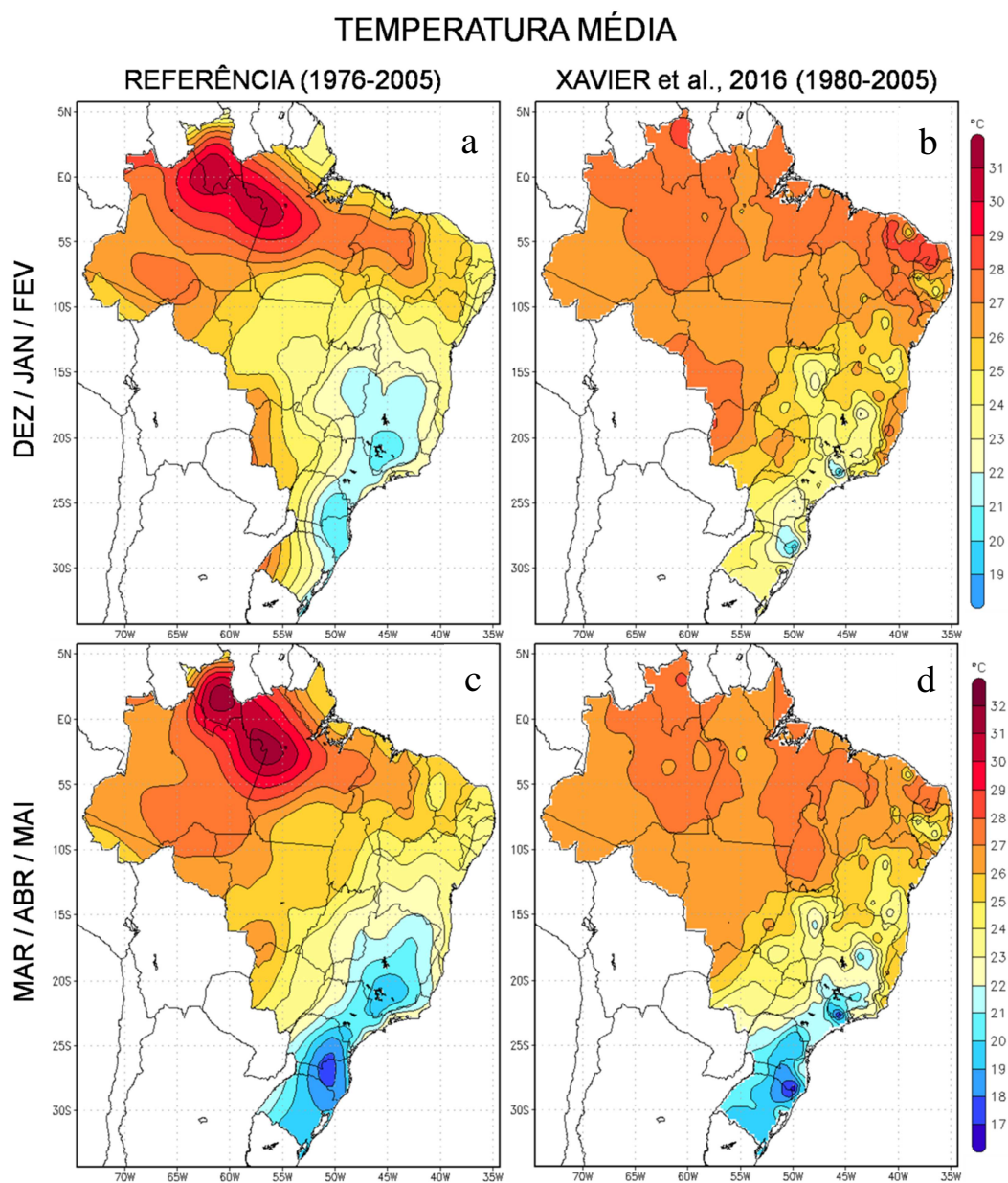


Figura 4.1 – Média da temperatura média do ar (°C) para o verão a) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e b) referente a Xavier et al. (2016), e para o outono c) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e d) referente a Xavier et al. (2016).

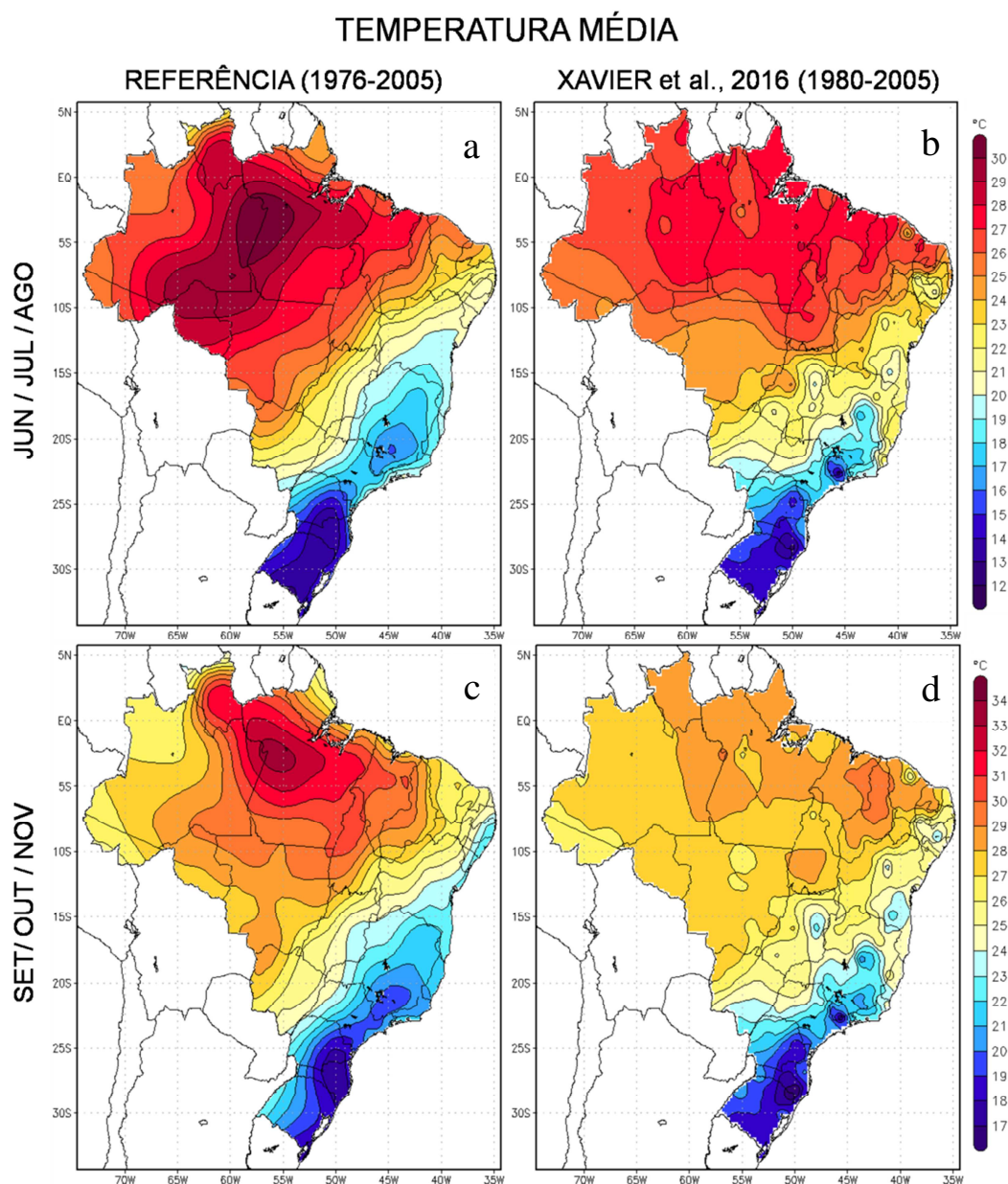


Figura 4.2 – Média da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) para o inverno a) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e b) referente a Xavier et al. (2016), e para a primavera c) referente à regionalização pelo modelo RegCM4 e d) referente a Xavier et al. (2016).

Outra descrição importante é em relação ao aquecimento anual que os cenários climáticos do IPCC, RCP2.6 e RCP8.5, propõe para 2070 a 2099. A Figura 4.3 mostra a anomalia de temperatura dos cenários climáticos em relação ao período base 1976-2005 de Janeiro a Dezembro.

No cenário mais otimista (Figura 4.3a) são observadas três faixas distintas de aquecimento de $0,5^{\circ}\text{C}$ a 1°C , de 1°C a $1,5^{\circ}\text{C}$ e de $1,5^{\circ}\text{C}$ a 2°C , sendo as maiores anomalias concentradas na porção Centro-Norte do país, e as mais baixas nas áreas mais ao Sul. Já no cenário mais pessimista, como esperado, são observadas as maiores anomalias. Na Figura

4.2b, nota-se além de um aquecimento mais intenso, um intervalo maior de anomalia que vai de 2°C até 8°C, sendo a região central do país recebendo os maiores valores, o que concorda com a distribuição de aquecimento também observado no cenário RCP2.6.

Comparando agora esses campos de anomalia de temperatura com a Figura 2.9 da seção 2.2, que representa as anomalias de temperatura para os mesmos cenários, porém através da média de modelos globais, é observado um padrão semelhante, de maior aquecimento na região central do país e menor nas áreas ao Sul. No entanto a magnitude do aquecimento em ambos os cenários é mais branda sem a regionalização, com intervalos de 0,5°C a 1,5°C e de 3°C a 7°C, para os respectivos cenários RCP2.6 e RCP8.5. Outra diferença que se observa é a maior definição das faixas de aquecimento e o deslocamento mais para a porção central do país da região de anomalias maiores na regionalização do RegCM4.

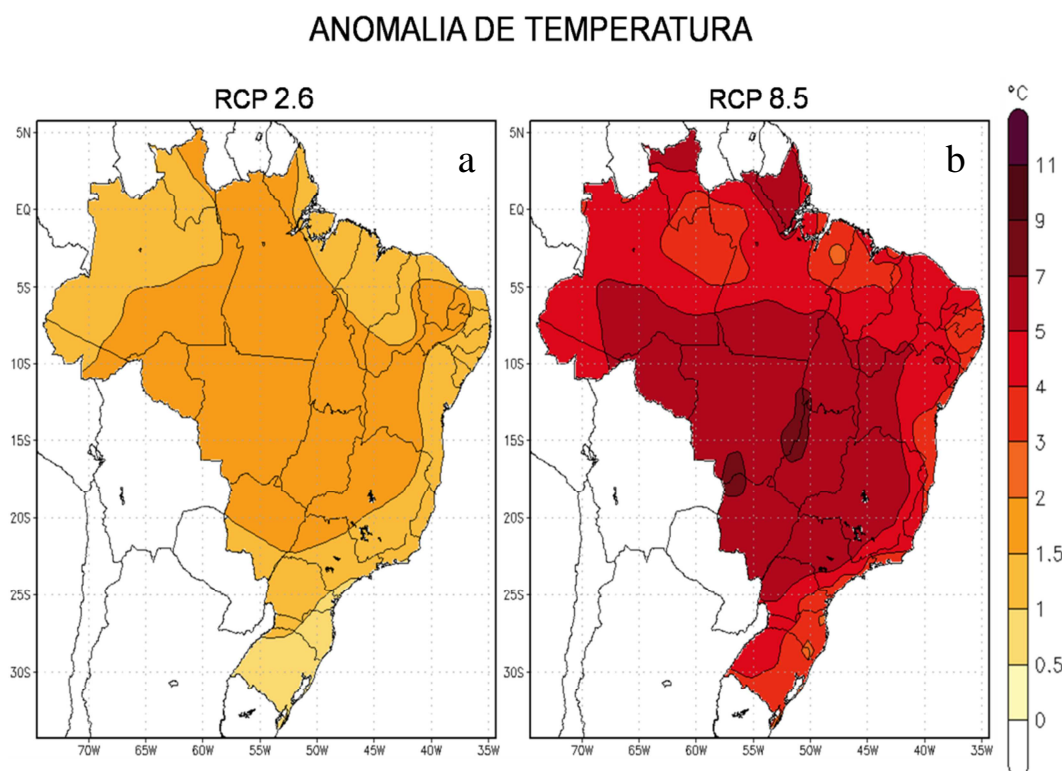


Figura 4.3 – Anomalia da temperatura do ar (°C) em relação ao período de referência para o a) cenário RCP2.6 e para o b) cenário RCP8.5.

Como cada cultura apresenta um ciclo de desenvolvimento diferente, as anomalias de temperatura em relação ao período de referência, para os dois cenários, foram calculadas para as diferentes culturas obedecendo aos seus períodos de desenvolvimento (Figuras 4.4 e 4.5).

Os períodos considerados para as culturas foram apresentados na Tabela 3.1, mas serão repetidos aqui para facilitar a análise das Figuras 4.4 e 4.5. Algodão (Dezembro -Abril),

milho (Outubro -Janeiro), soja(Outubro -Dezembro), arroz(Outubro -Fevereiro) e trigo (Abril - Julho (PR) e Junho - Setembro (RS)).

Nas regiões onde o algodão (Figuras 4.4a e 4.4b) é principalmente cultivado (MT e BA) observa-se um aquecimento significativo, quando comparado os dois cenários. Este aquecimento mais intenso no MT e Oeste da BA de 1,5°C a 2°C no RCP2.6 aproxima a T_m da T_{ot} de 30°C, contribuindo para o desenvolvimento da planta, no entanto para o cenário RCP8.5, com aquecimento de 5°C a 9°C, a T_m passa a superar os 30°C podendo trazer impactos negativos ao algodão.

Já nas principais regiões produtoras de milho (Figuras 4.4c e 4.4d) e soja (Figuras 4.4e e 4.4f) do Centro-Oeste (MT, MS e GO), Sudeste (MG) e Nordeste (BA), o aquecimento observado é mais intenso em relação ao algodão, uma vez que o tempo de desenvolvimento é menor para essas culturas e o período de cultivo compreende as estações mais quentes do ano para essas regiões, a primavera e o verão. Assim, espera-se um impacto negativo maior para o desenvolvimento dessas culturas, principalmente sob as condições de acréscimo de temperatura do RCP8.5 de até 11°C, na qual a T_m , além de ultrapassar as condições ótimas, de 28°C para o milho e de 31°C para a soja, se aproxima mais de T_{max} . Para as demais áreas produtoras, o aquecimento proposto pelos dois cenários acaba mantendo T_m ainda próximo de T_{ot} .

No período referente ao cultivo do arroz irrigado no RS (Figuras 4.5a e 4.5b), as anomalias de temperatura são mais brandas em ambos os cenários, se comparadas com as regiões produtoras das culturas de algodão, milho e soja, simplesmente pelo fato de as regiões produtoras estarem localizadas no extremo Sul do país. No cenário RCP2.6 são observadas anomalias de 0,5°C a 1,5°C, enquanto no RCP8.5 o aquecimento é de 0,5°C a 3°C, o que não acarreta em grandes impactos, uma vez o acréscimo não é tão elevado, mantendo T_m próximo de T_{ot} .

Para a cultura de inverno, trigo, do RS (Figuras 4.5c e 4.5d) e do PR (Figuras 4.5e e 4.5f), as anomalias de temperatura do RCP2.6, não apresentam valores elevados e, conseqüentemente não apresentando grandes impactos no desenvolvimento da cultura. No entanto, no cenário RCP8.5 o aquecimento de 3°C a 5°C no RS e de 5°C a 9°C no PR, podem ocasionar estresse térmico a planta, já que a T_m do inverno nesse estados é em média 18°C (Figura 2.7) e o aumento de até 9°C ultrapassa o limiar ideal de desenvolvimento de 21°C, passando a atuar em uma região de baixo desenvolvimento (Figura 3.2).

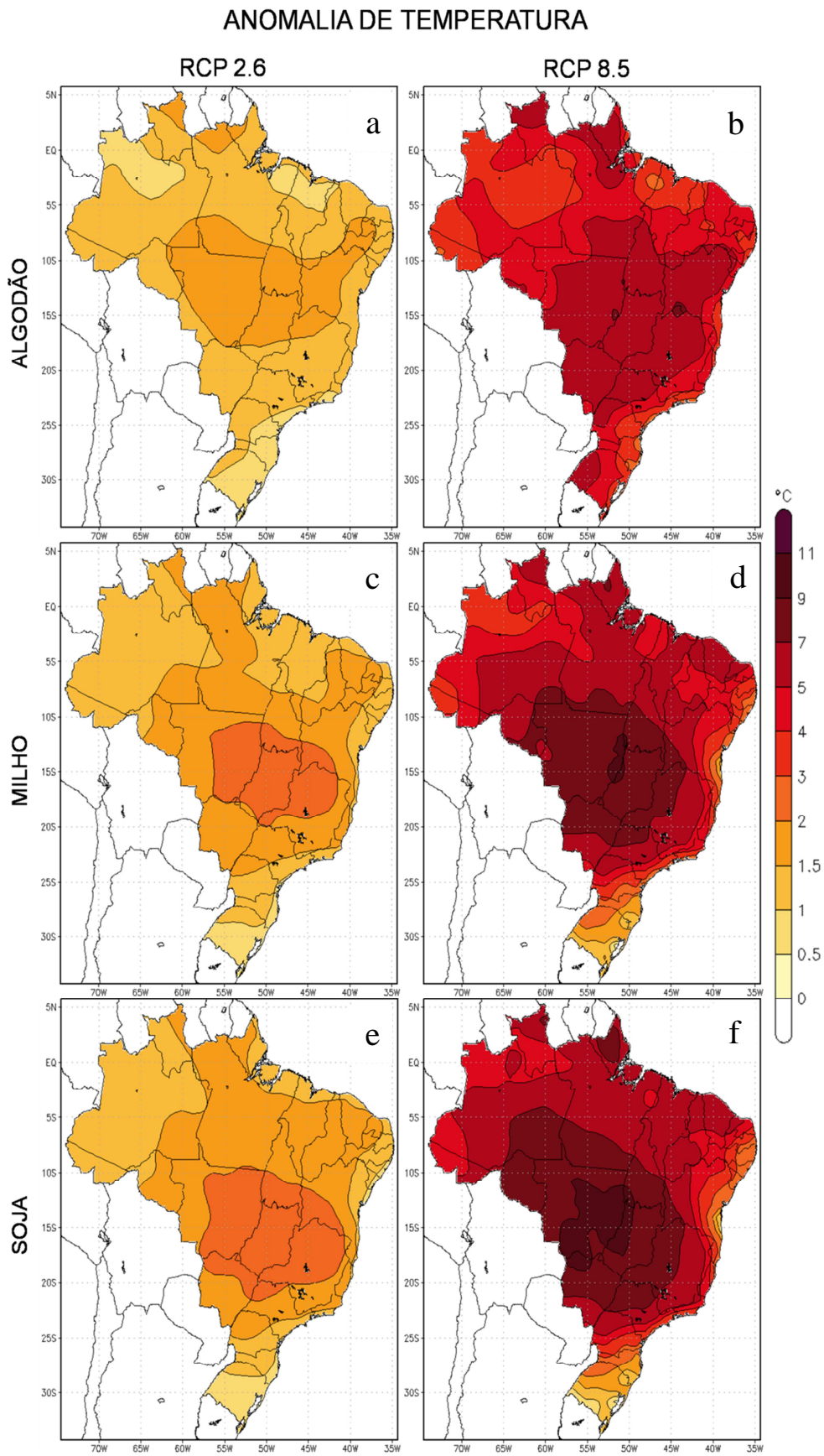


Figura 4.4 – Anomalia de temperatura em relação ao período de referência para os cenários RCP2.6 e RCP8.5, referentes ao ciclo das culturas de algodão, milho e soja.

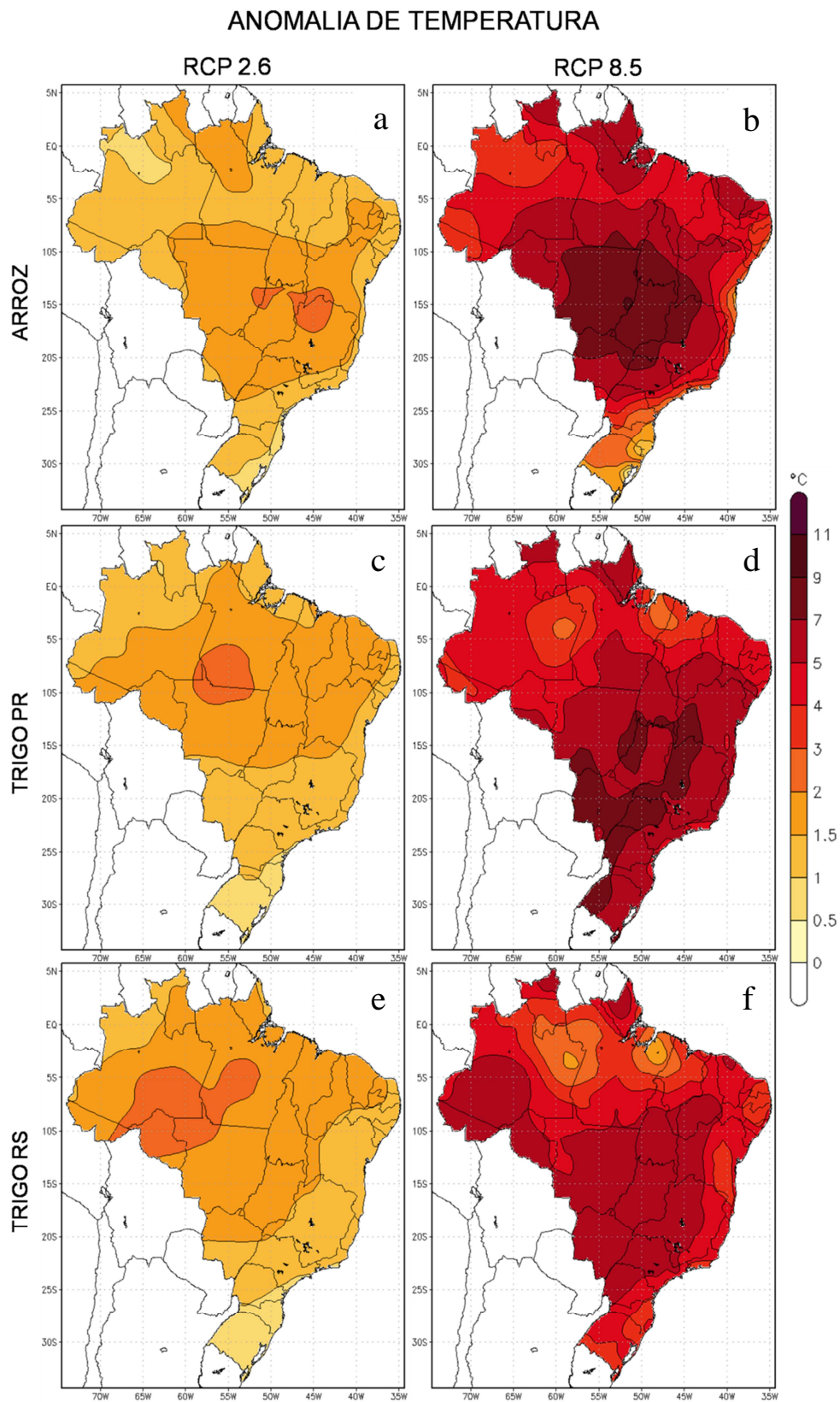


Figura 4.5 – Anomalia de temperatura em relação ao período de referência para os cenários RCP2.6 e RCP8.5, referentes ao ciclo das culturas de arroz irrigado e trigo no Rio Grande do Sul e no Paraná.

Os métodos de STd utilizados neste trabalho apresentam diferenças para resultados de °C dias sob condições climáticas atuais, como visto em Streck et al. (2007). Assim, se faz necessário analisar como os métodos diferem sob as condições de aquecimento global apresentadas pelos cenários futuros RCP2.6 e RCP8.5 nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

O método 1 representa a maneira mais simples de se calcular a soma térmica, considerando, apenas, que o acúmulo diário se dá acima de um valor crítico inferior (T_b) (STRECK et al., 2007). Já o método 2, passa a considerar condições ótimas de desenvolvimento aproximando a curva de STd ao comportamento vegetal de desenvolvimento (Figura 3.3). No entanto, essa consideração ainda não representa com realidade o comportamento biológico das plantas, como visto na Figura 3.2, na qual a resposta da taxa de desenvolvimento à temperatura do meio é melhor expressa em termos de T_b , T_{ot} e T_{max} .

Outra consideração importante de que o método 3 é mais realístico que os demais, seria pelo fato de que, ao se tratar de cenários de aquecimento global, a probabilidade de T_m superar T_{ot} é maior, proporcionando uma representação menos realística dos métodos 1 e 2.

As Figuras 4.6 e 4.7, mostram que entre os métodos a maior diferença se encontra do método 1 em relação ao método 3 (Figura 4.6), com uma diferença considerável entre as estimativas de até 1500°C dia para o algodão, 2700°C dia para o milho e de 2100°C dia para a soja. Em relação ao método 2 (Figura 4.7), mesmo a diferença sendo menor ainda é bastante relevante, com diferenças de até 900°C dia para o algodão, de 1800°C dia para o milho e de 1500°C para a soja. Essas diferenças entre os métodos ocorreram devido ao aumento de T_m , que superaram os valores de T_{ot} em todos os cenários climáticos, principalmente para o RCP8.5, na qual as anomalias de temperatura são maiores. Para as regiões produtoras de milho e soja do Sul do Brasil as diferenças encontradas são bem menores, na qual ambos os métodos e cenários futuros apresentaram acréscimo máximo de 300°C dia.

Nota-se que para o período de referência, a maior diferença se encontra nas áreas mais ao norte do país para ambos os métodos, se tratando justamente da região onde a simulação do RegCM4 demonstrou maior discrepância em relação as condições observadas de Xavier et al. (2016) na Figura 4.1. De maneira geral as regiões mais quentes do país e com maiores anomalias de temperatura demonstraram maior discrepância entre os métodos, e para as regiões produtoras de algodão, milho e soja do Centro-Norte, o método 3 representa um comportamento mais próximo da realidade.

MÉTODO 1 - MÉTODO 3

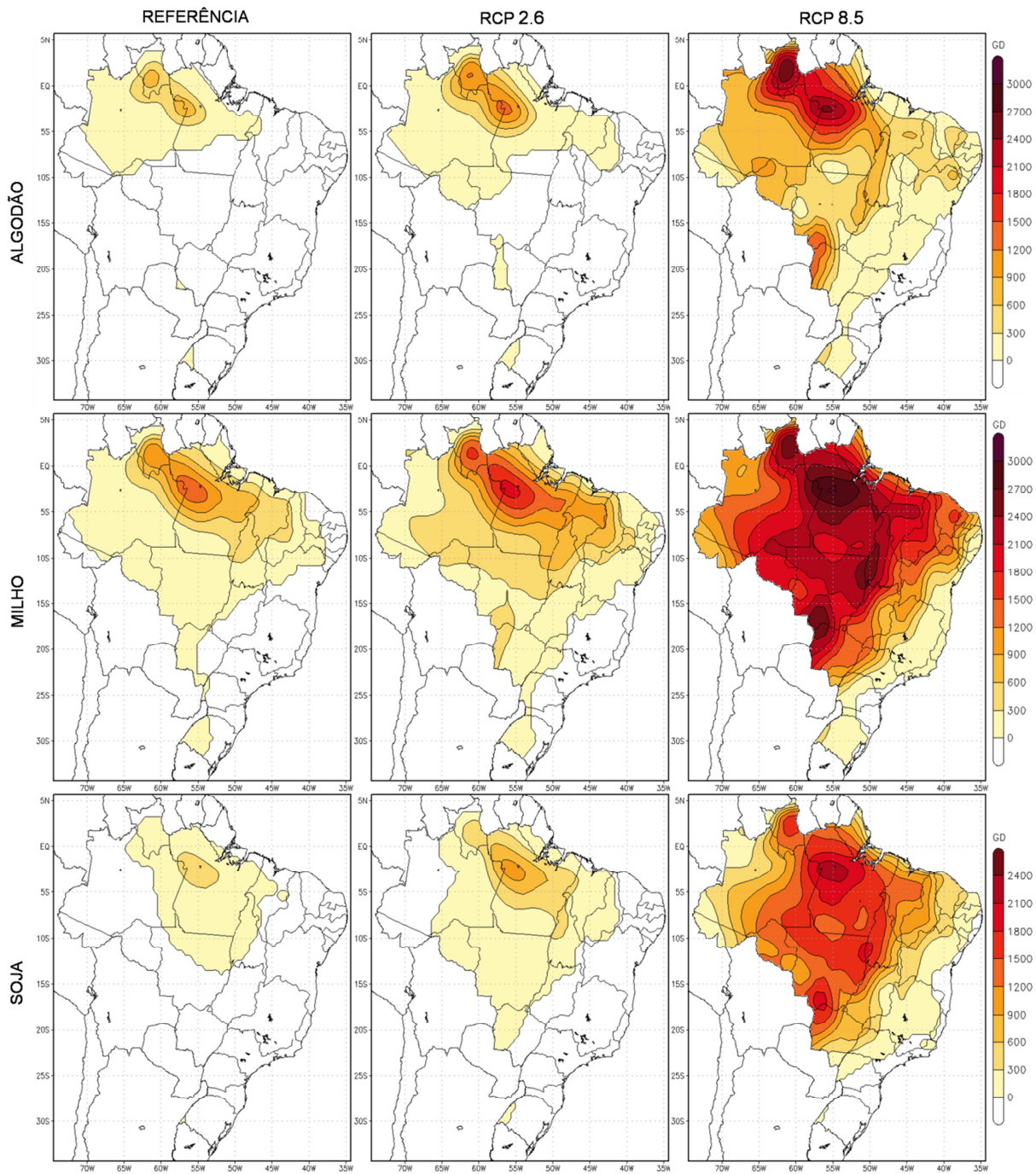


Figura 4.6 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 1 em relação ao método 3 para algodão, milho e soja nos diferentes cenários.

MÉTODO 2 - MÉTODO 3

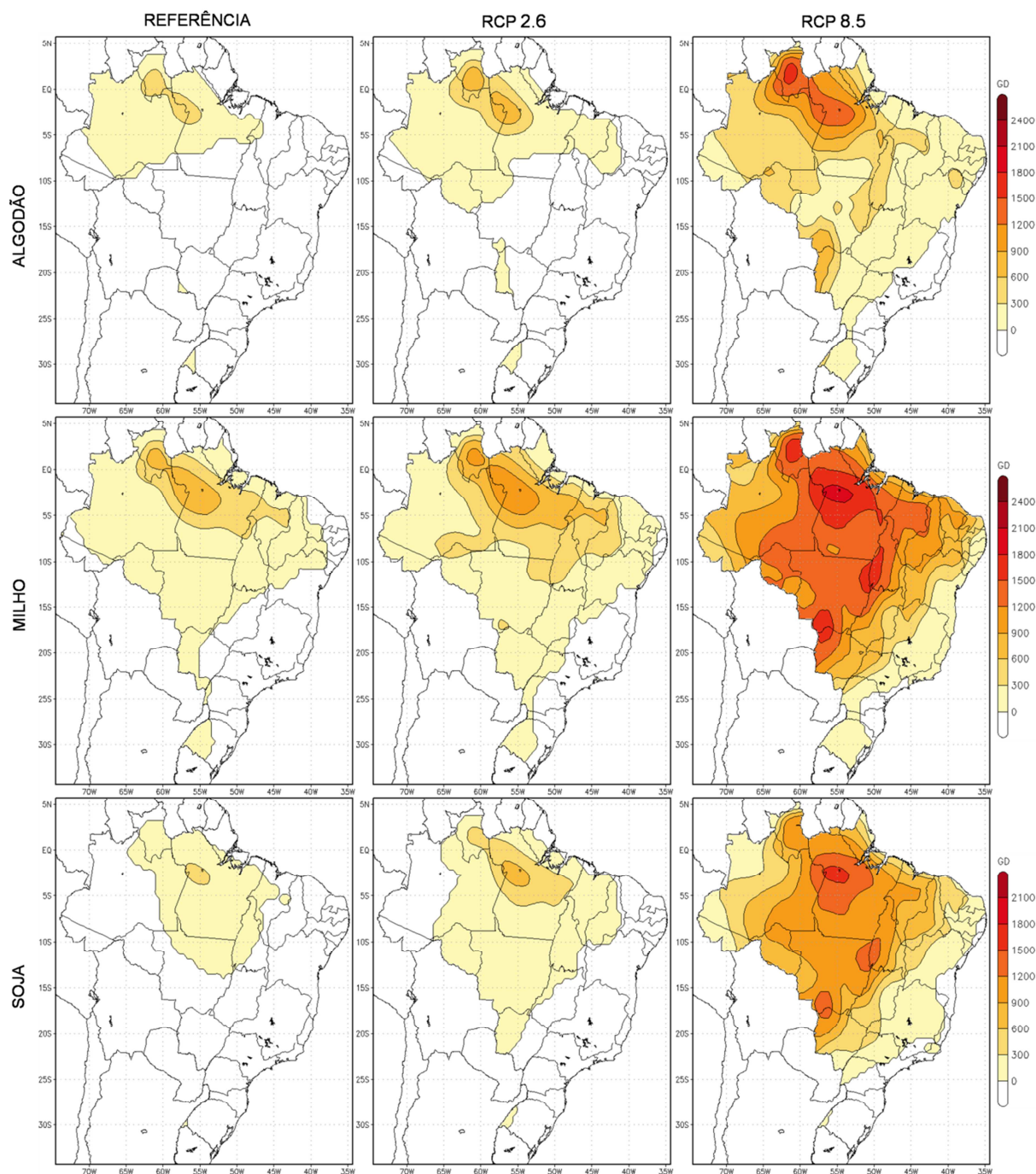


Figura 4.7 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 2 em relação ao método 3 para algodão, milho e soja nos diferentes cenários.

A mesma análise foi feita para as culturas de arroz irrigado e trigo para seus respectivos períodos. As Figuras 4.8 e 4.9, mostram o mesmo comportamento de diferenças maiores para o método 1 no cenário RCP8.5. No entanto essas discrepâncias são bem mais brandas se comparadas às encontradas nas Figuras 4.6 e 4.7, em relação às principais regiões produtoras. As maiores diferenças observadas foram de até 1500°C dia para o trigo do PR. Já

para o trigo do RS, o método 1 superou em até 300°C dia, e para o arroz as estimativas podem ocasionar em uma diferença de até 900°C dia.

No período de referência do trigo do RS e do PR, e no cenário RCP2.6 para o trigo RS, não foram observadas diferenças entre os métodos 1 e 2. Isso ocorreu, pelo fato de que T_m em todos esses casos ter sido maior que T_b e menor que T_{ot} , correspondendo ao mesmo acúmulo de STd.

De forma geral, as análises anteriores mostraram que o método 3 é o que melhor representa o acúmulo térmico sob condições de aquecimento global, e para se fazer uma análise de impacto mais próxima do acréscimo de temperatura no ciclo de desenvolvimento das culturas, essa metodologia seria a que mais se aproximaria de um impacto realístico.

MÉTODO 1 - MÉTODO 3

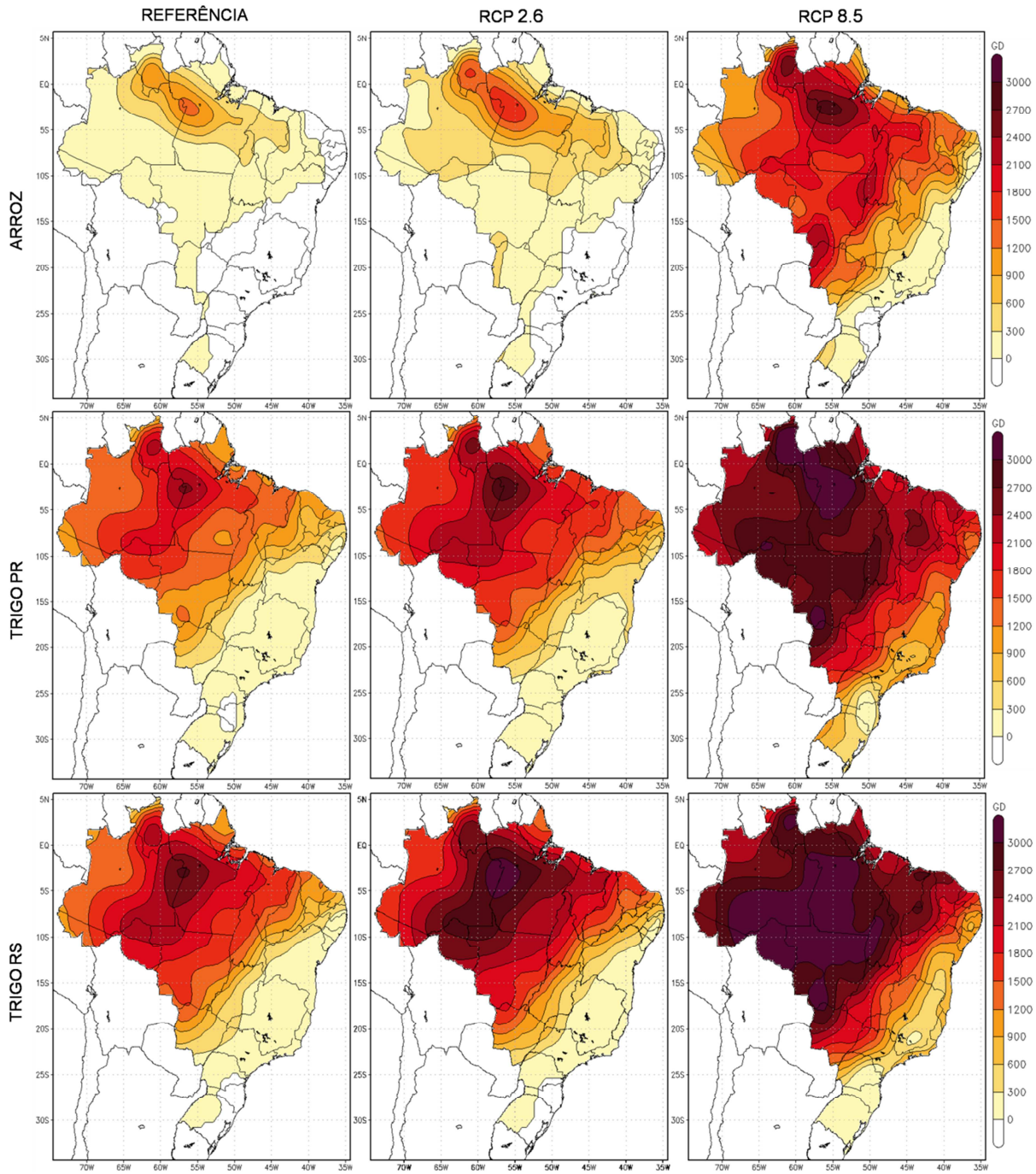


Figura 4.8 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 1 em relação ao método 3 para arroz irrigado e trigo no Rio Grande do Sul e no Paraná nos diferentes cenários.

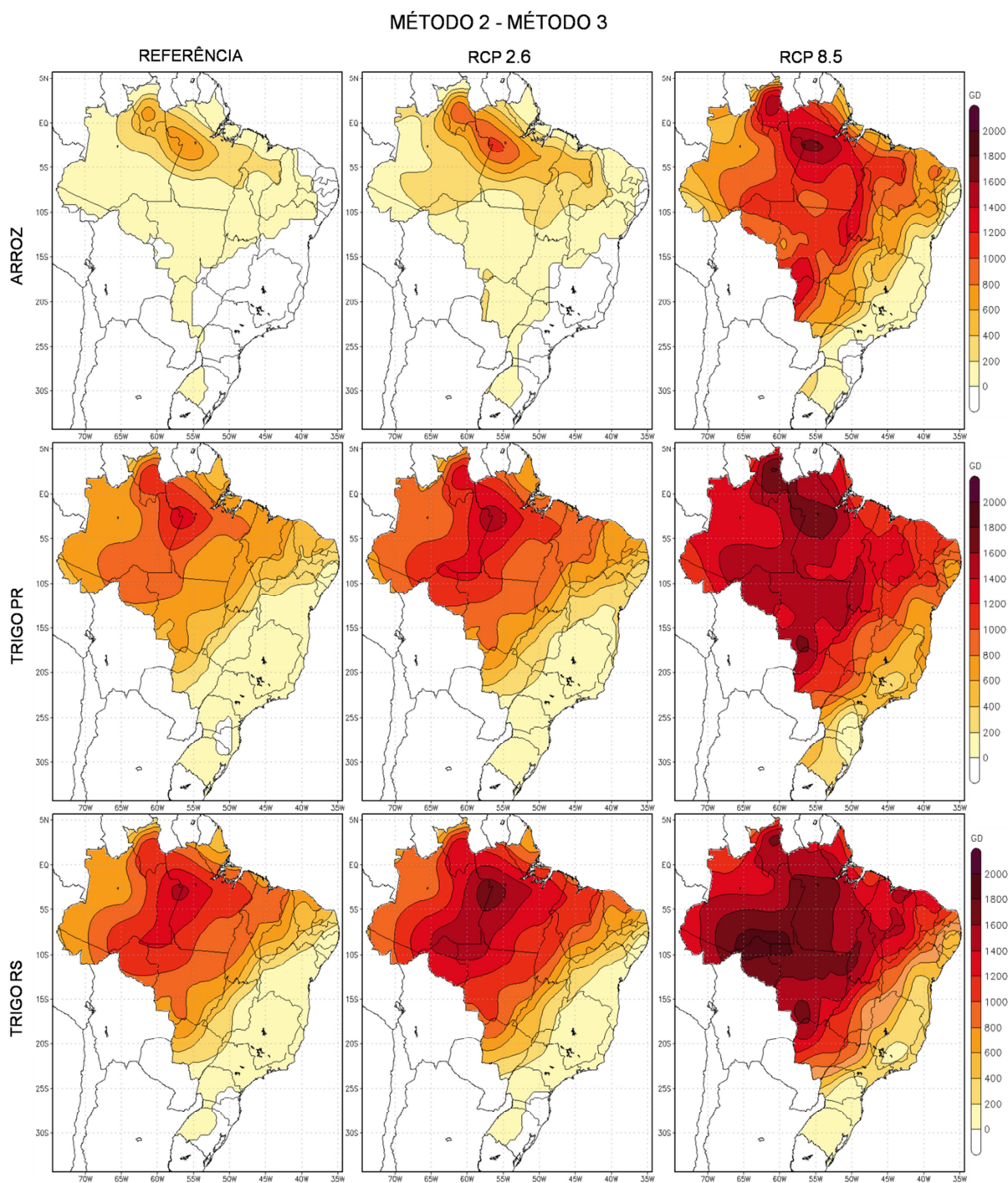


Figura 4.9 – Diferença dos resultados da soma térmica acumulada estimada pelo método 2 em relação ao método 3 para arroz irrigado e trigo no Rio Grande do Sul e no Paraná nos diferentes cenários.

As análises a seguir devem ser tratadas como resultados preliminares e não conclusivos, pelo simples fato de que o desenvolvimento de uma planta não ocorre somente em relação à temperatura do ar e o acúmulo térmico, e sim, pela contribuição de um conjunto de fatores como, por exemplo, a temperatura e umidade do solo e o fotoperíodo, que aqui não foram consideradas.

As estimativas da duração dos ciclos de desenvolvimento das culturas (emergência até a maturação), calculadas pelo método 3, são mostradas a seguir pelas Figuras 4.10 e 4.11.

Nas regiões produtoras do algodão a duração do ciclo para a referência foi de 110 a 210 dias, sendo as regiões do Oeste da BA, onde a cultura demora mais para se desenvolver e, no estado do MT, onde os valores encontrados se aproximam mais da literatura (ROSOLEM, 2001). Observando os resultados obtidos para os cenários climáticos, nota-se uma diminuição gradativa de dias de um cenário a outro em todas as regiões produtoras, com duração de 110 até 170 dias em ambos os cenários climáticos, porém se observa um aumento considerável da área de ciclo de 110 dias. O impacto desta diminuição é discutido a seguir.

Nas regiões de cultivo do milho e da soja, por ocorrerem em praticamente todo o Centro-Sul do Brasil (Figura 3.4), o fato de considerar um período em comum de cultivo para todas as regiões pode gerar uma diferença maior em relação aos valores de dias do ciclo para comparação (Tabela 3.1). Para o milho a duração do ciclo no período de referência variou de 90 a 150 dias e, para a soja a variação foi de 70 a 120 dias. Considerando a porção central do país referente ao calendário adotado, os valores encontrados de 90 a 130 dias para o milho e de 70 a 110 dias estão condizentes com a literatura.

O comportamento da variação da duração dos ciclos para os cenários futuros foi semelhante para as duas culturas, visto que no RCP2.6 ambas tiveram uma ligeira diminuição de dias do ciclo, enquanto que no RCP8.5 se observa um aumento mais significativo nas regiões produtoras do Centro-Oeste e uma diminuição nas demais regiões, resultando em redução da área em que a duração dos ciclos correspondem aos observados na literatura.

Na cultura de arroz (Figura 4.11), os valores encontrados para a referência ficaram, próximos ao encontrado por Steinmetz et al. (2015), na qual, estimou-se um ciclo de 130 dias para cultivares de ciclo médio na localização de Pelotas, RS. As demais áreas produtoras variaram de 100 até 140 dias, que ainda concordam com os valores estimados por Steinmetz et al. (2015), que mostram valores de 100 a 120 dias para cultivares de ciclo precoce e de até 150 dias para ciclo tardio.

Em relação às projeções climáticas, a Figura 4.11 mostra um deslocamento da região de 100 a 120 dias para Leste do RS, ocasionando em uma diminuição da duração do ciclo nas áreas mais ao Leste e Sul. Vale ressaltar que a região de Pelotas, RS se mantém no intervalo de 120 a 140 dias, e os valores considerados para cultivares de ciclo médio por Steinmetz et al. (2015) se localizam dentro deste intervalo.

Nas áreas produtoras de trigo do RS (Figura 4.11) se observa valores de 120 a 140 dias para o período de referência, que enquanto no PR o intervalo encontrado foi um pouco maior, com valores entre 110 e 140 dias, pelo fato de o PR registrar temperaturas mais elevadas do que o estado gaúcho. Esses valores são correspondentes ao estabelecido por Walter et al. (2009).

Nos cenários RCP2.6 e RCP8.5, observa-se o mesmo padrão de redução da duração do ciclo de um cenário para o outro em ambos os estados. Em ambos os estados, no cenário RCP2.6, se observa uma manutenção do intervalo de 110 a 140 dias, porém há um aumento da área de 120 a 130 dias no RS e de 110 a 120 dias no PR. Para o cenário RCP8.5, se observa um predomínio da duração do ciclos de 110 a 130 dias, com aumento somente no oeste do PR para 130 a 140 dias.

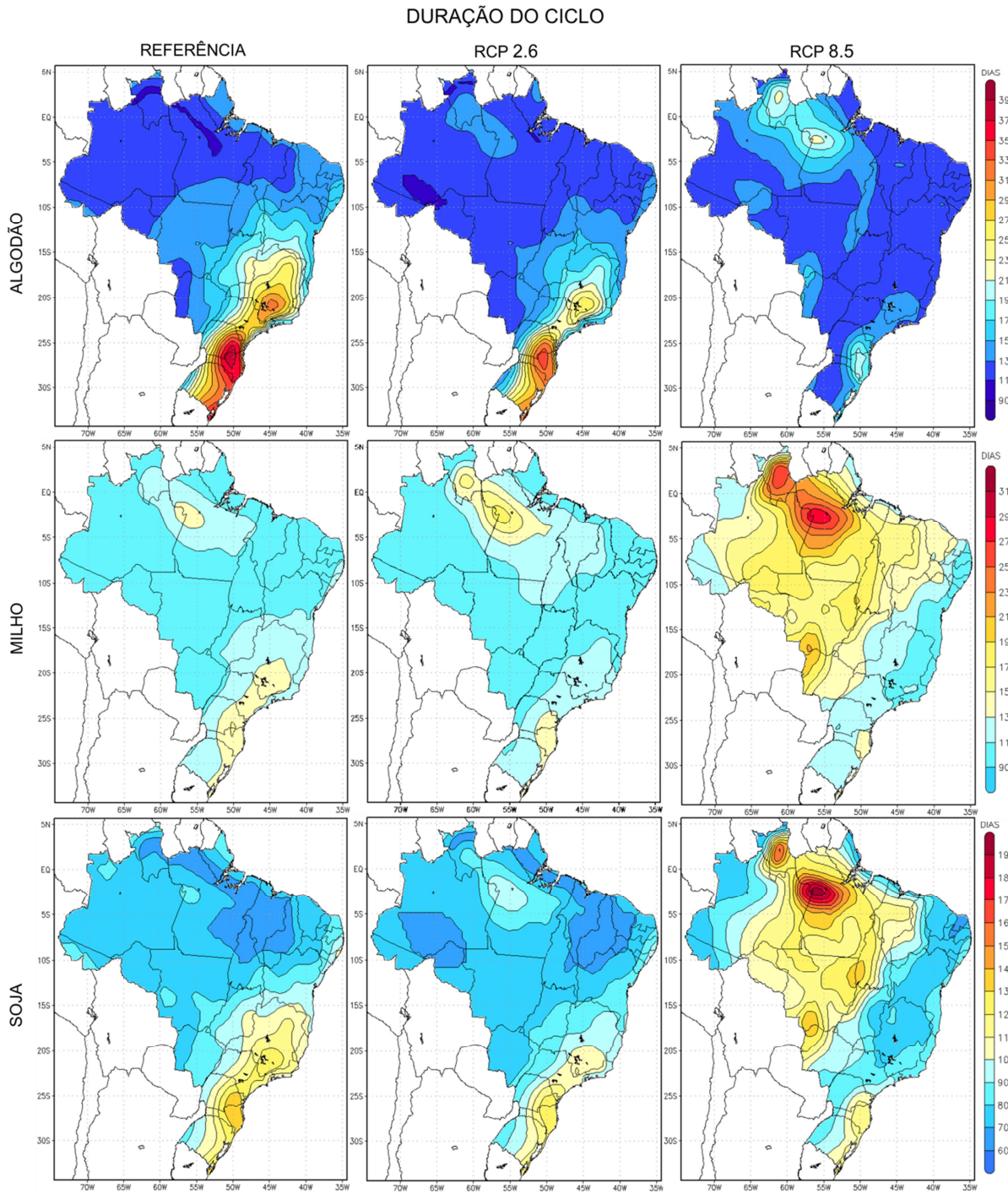


Figura 4.10 – Duração dos ciclos, em dias, estimada pelo método 3 para as culturas de algodão (1675 °C dia), milho (1800 °C dia) e soja (1336 °C dia) referente ao período de referência 1976-2005, e aos cenários climáticos RCP2.6 e RCP8.5 para o período 2070-2099.

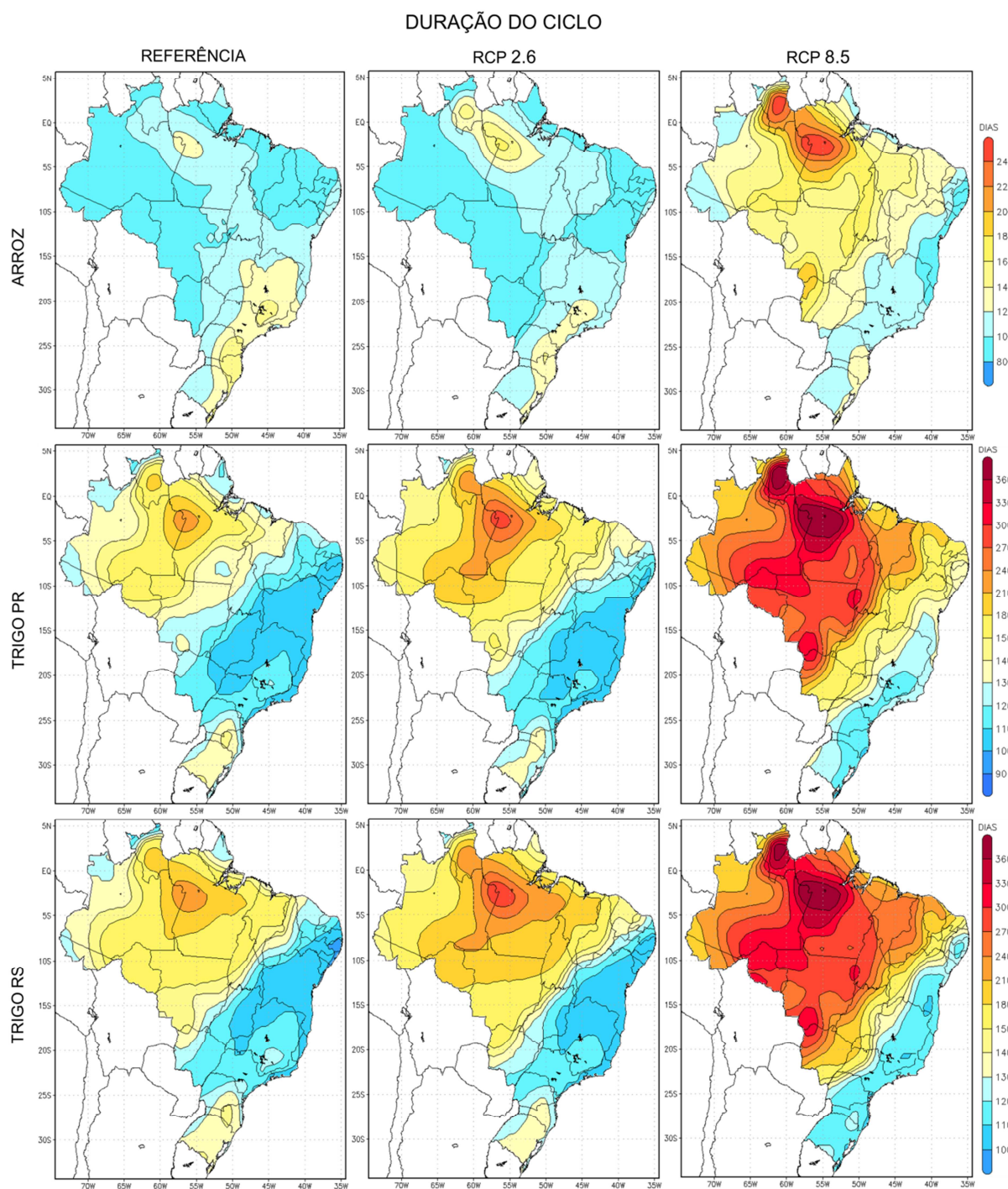


Figura 4.11 – Duração dos ciclos, em dias, estimada pelo método 3 para as culturas de arroz (1446 °C dia), trigo no Paraná (2040 °C dia) e trigo no Rio Grande do Sul (2040 °C dia) referente ao período de referência 1976-2005, e aos cenários climáticos RCP2.6 e RCP8.5 para o período 2070-2099.

Na discussão anterior foi possível notar que a regionalização do modelo RegCM4 pode ser usada para estimar a duração dos ciclos de desenvolvimento, independente das discrepâncias observadas.

No intuito de avaliar o impacto do aquecimento global proporcionado pelas condições dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 na duração do ciclo de desenvolvimento e na distribuição

geográfica das principais regiões produtoras, as anomalias de dias do ciclo em relação à referência apresentadas nas Figuras 4.12 e 4.14.

Para o algodão (Figuras 4.12a e 4.12b) as condições de aquecimento do cenário RCP2.6 de 1,0°C a 2,0°C proporcionaram uma diminuição de 15 a 45 dias na duração do ciclo em todas as regiões produtoras, representando que a cultura de algodão atinge os 1675 °C dia necessários para atingir a maturidade mais rapidamente. No cenário RCP8.5 o aquecimento de 4°C a 9°C, também ocasiona, em redução do ciclo. Observam-se anomalias negativas de 15 a 90 dias, sendo as regiões do estado baiano que apresentam a maior redução. Essa condição acaba sendo favorável ao desenvolvimento do algodão, uma vez que a T_m se aproxima mais de T_{ot} , e pela Equação 3 se distancia mais de T_b , contribuindo para o aumento da diferença e, conseqüentemente, do aumento de STd .

Nas culturas de milho (Figura 4.12c e 4.12d) e soja (Figuras 4.12e e 4.12f) não são observados impactos significativos em RCP2.6, com diminuição do ciclo de no máximo 15 a 30 dias apenas nas regiões produtoras de MG e do Leste de GO, sendo esta uma condição contornável no ponto de vista do calendário agrícola e da utilização de cultivares de ciclo mais precoce que se desenvolvem mais rapidamente. No entanto, para o cenário RCP8.5 o impacto é extremamente desfavorável para a maior parte das regiões produtoras do Centro-Norte do país. Para a cultura do milho se observa um aumento de 15 a 90 dias. Essa condição é agravada pelo fato de que a T_m passa a ser superior a T_{ot} se aproximando muito T_{max} e promovendo queda da taxa de desenvolvimento e aumento do estresse térmico da planta, tornando inviável o cultivo do milho em relação às condições térmicas. Portanto, o aquecimento de 5°C a 11°C na temperatura média do ciclo do milho no Centro-Oeste, impacta negativamente no seu desenvolvimento. Já as regiões produtoras do Sudeste e Sul há redução da duração do ciclo, com a cultura de milho se desenvolvendo mais rapidamente em até 15 dias.

A soja por ser mais tolerante as temperaturas elevadas ($T_{ot} = 31^\circ\text{C}$) do que o milho ($T_{ot} = 28^\circ\text{C}$) sofre impactos um pouco mais brandos, porém ainda bastante significativos para o seu desenvolvimento. Sob condições de aquecimento de 6°C a 11°C, as regiões produtoras do MT e do Noroeste do MS são as que sofrem os impactos negativos, com aumento do ciclo em 15 a 75 dias. No entanto as para as regiões produtoras do NE, SE e estados do PR e de SC, acabam obtendo o encurtamento de 15 a 45 dias.

As afirmações anteriores são complementadas pela Figura 4.13, na qual se observa a diferença entre T_m e T_{ot} para ambos os cenários climáticos. A cultura de algodão (Figuras

4.13a e 4.13b) por possuir um ciclo mais prolongado, na qual a T_m é mais baixa em relação ao ciclo do milho e da soja, nas condições climáticas atuais e no RCP2.6, T_m dificilmente atinge a condição ótima de 30°C. Portanto, sob condições de aquecimento médio elevado (RCP8.5), a T_m se aproxima mais de T_{ot} e a STd aumenta contribuindo para o desenvolvimento mais rápido do algodão.

No entanto, para as culturas de milho (Figuras 4.13c e 4.13d) e soja (Figuras 4.13e e 4.13f) se observa que T_m está mais próximo de T_{ot} em RCP2.6 (Figuras 4.13c e 4.13e) não há anomalias de °C dia. Já no cenário RCP8.5 (Figuras 4.13d e 4.13f), T_m supera em até 11°C o valor de T_{ot} para o milho para a soja, fazendo com que se aproxime mais de T_{max} e diminuindo STd . Esse aquecimento contribui para que outras regiões se aproximem de T_{ot} e passem ter uma condição de desenvolvimento mais acelerado.

No RS, as regiões produtoras de arroz irrigado (Figura 4.14a), a discussão é semelhante à feita para o algodão. No cenário RCP2.6, para o acréscimo de temperatura no ciclo de 0,5°C a 1,5°C não se observou impactos significativos. No cenário RCP8.5, as regiões produtoras, em sua maioria, atingem a maturidade 15 a 30 dias antes. Já nas áreas do oeste, o aquecimento de 0,5°C a 3°C provoca o prolongamento do ciclo em 15 a 30 dias.

As condições de aquecimento do cenário RCP2.6 não apresentam impactos significativos na cultura de trigo dos estados do RS (Figura 4.14c) e PR (Figura 4.14e). Para ambos o acréscimo de temperatura faz com que T_m se aproxime mais de T_{ot} , porém mantém a STd próximo ao da referência. No cenário RCP8.5, para o RS se observa uma diminuição da duração do ciclo em praticamente todo o estado de 15 a 30 dias, proporcionando, além de um desenvolvimento mais acelerado, a manutenção das regiões produtoras. Já para o PR, o acréscimo de temperatura passa a impactar negativamente nas regiões produtoras do extremo Oeste e das que se localizam entre o Noroeste e Centro do estado, com o prolongamento do ciclo em até 30 dias, pela mesma razão discutida anteriormente para o milho e a soja: os valores de T_m passam a ser superiores a T_{ot} e mais próximos de T_{max} , impactando em STd menor e em um maior tempo para atingir os °C dia necessários até a maturação. Nas demais áreas paranaenses, o aquecimento referente ao cenário pessimista passa a ser mais favorável com redução do ciclo em até 30 dias.

A Figura 4.15 mostra o quanto T_m se aproxima ou se afasta de T_{ot} nos ciclos de desenvolvimento do arroz irrigado e do trigo. Para o arroz o aumento da temperatura em RCP2.6 manteve os valores de T_m abaixo de T_{ot} . Já no RCP8.5 a T_m , o acréscimo de até 3°C, aproxima T_m de T_{ot} , promovendo um desenvolvimento mais acelerado, ainda que a diferença

entre as temperaturas se mantenha alta. Em relação ao trigo do RS (Figuras 4.15c e 4.15d), se observa o mesmo comportamento, no qual o acréscimo de temperatura aproximou T_m de T_{ot} em ambos os cenários, sendo observado em RCP8.5 um impacto mais significativo, mesmo com T_m 4°C abaixo de T_{ot} .

Já para o trigo do Paraná (Figuras 4.15e e 4.15f), se observa o mesmo para o cenário RCP2.6, com T_m inferior a T_{ot} . No entanto, no cenário RCP8.5, onde T_m é 3°C a 4°C maior que T_{ot} , o ciclo do trigo sofre prolongamento, e na região onde há melhor condição de desenvolvimento T_m é praticamente igual à T_{ot} , com uma diferença de no máximo 1°C.

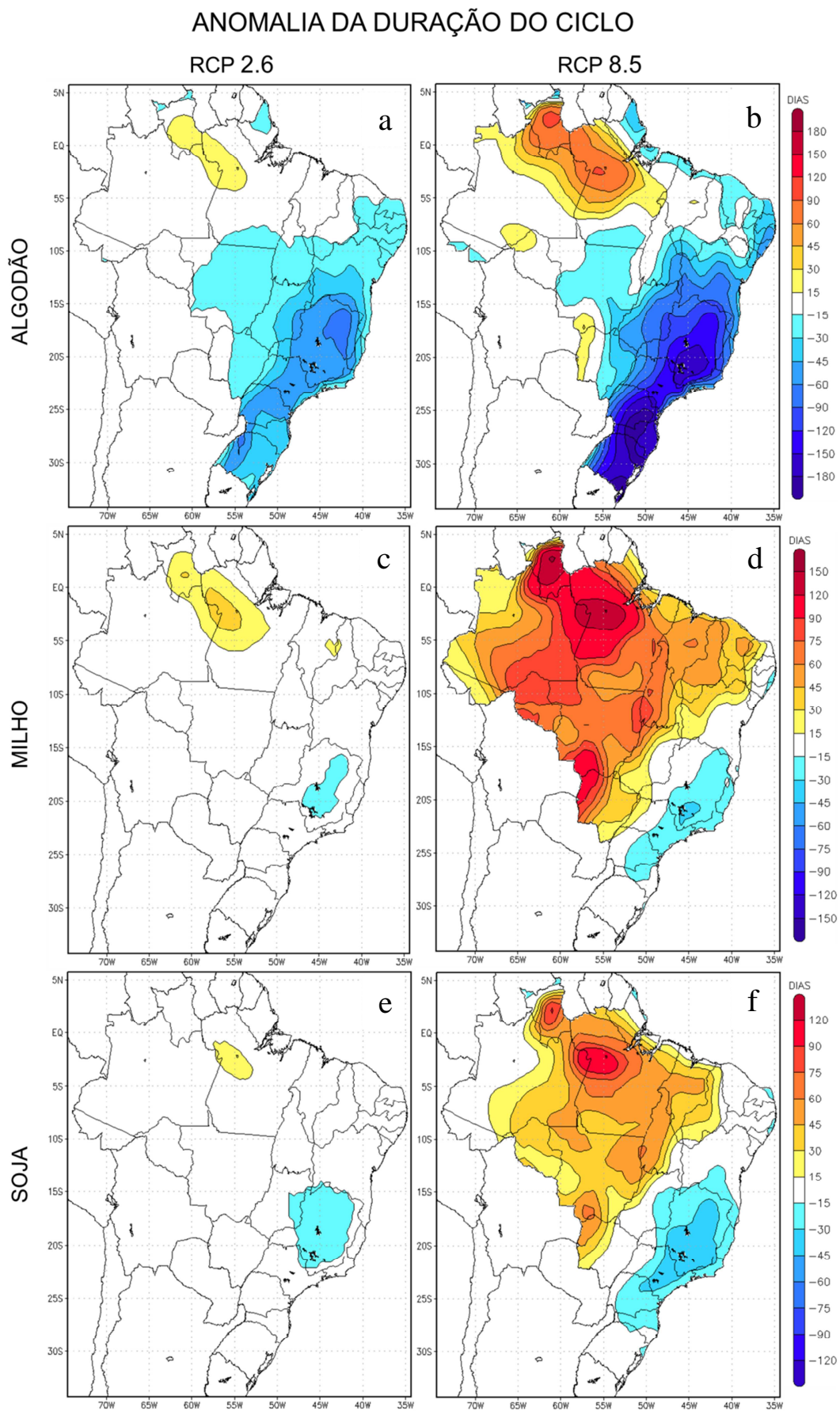


Figura 4.12 – Anomalia da duração do ciclo, em dias, dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação à referência para as culturas de algodão, soja e milho.

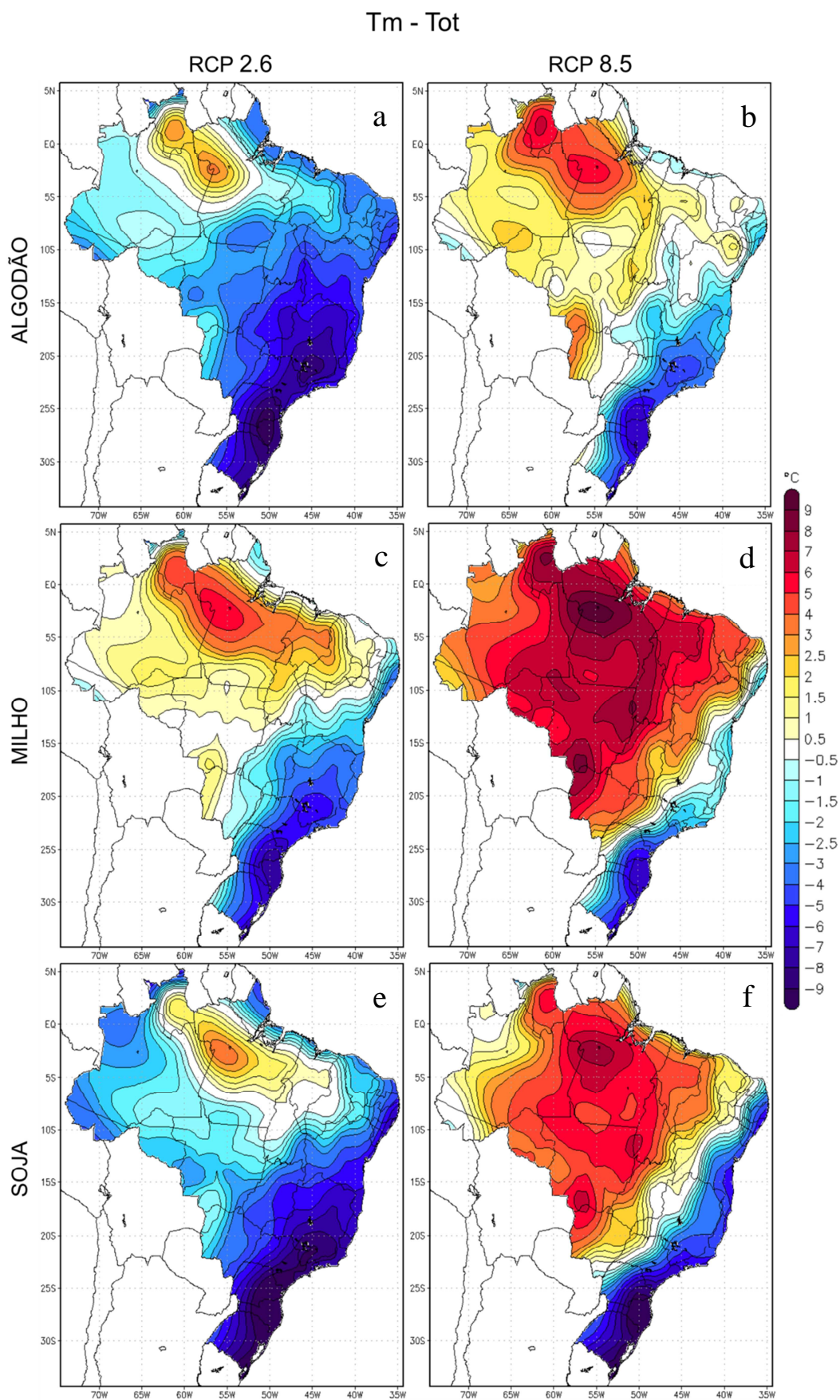


Figura 4.13 – Diferença entre a temperatura média do ar (T_m) e a temperatura de máximo desenvolvimento (T_{ot}) dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação para as culturas de algodão, soja e milho.

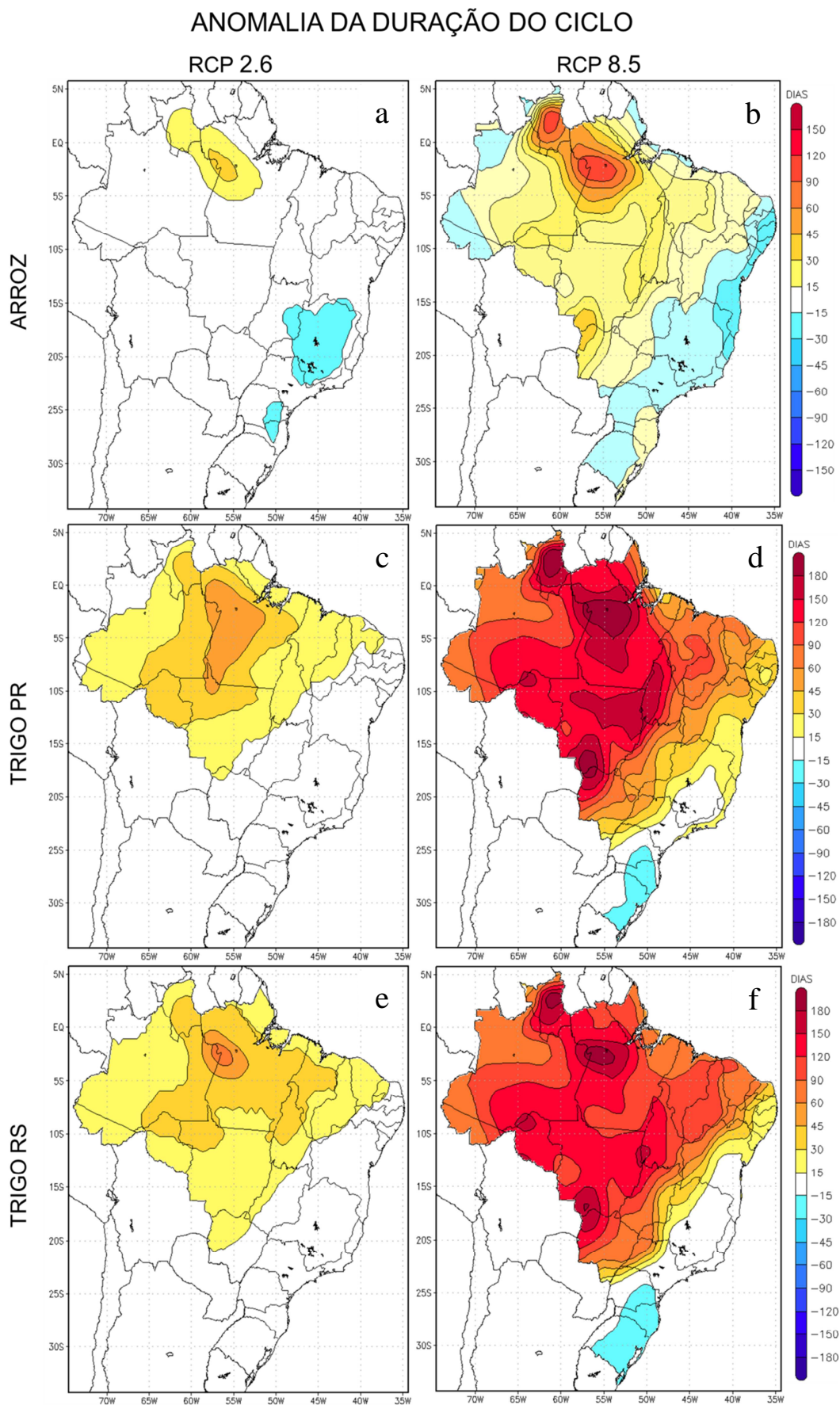


Figura 4.14 – Anomalia da duração do ciclo, em dias, dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação à referência para as culturas de arroz e trigo.

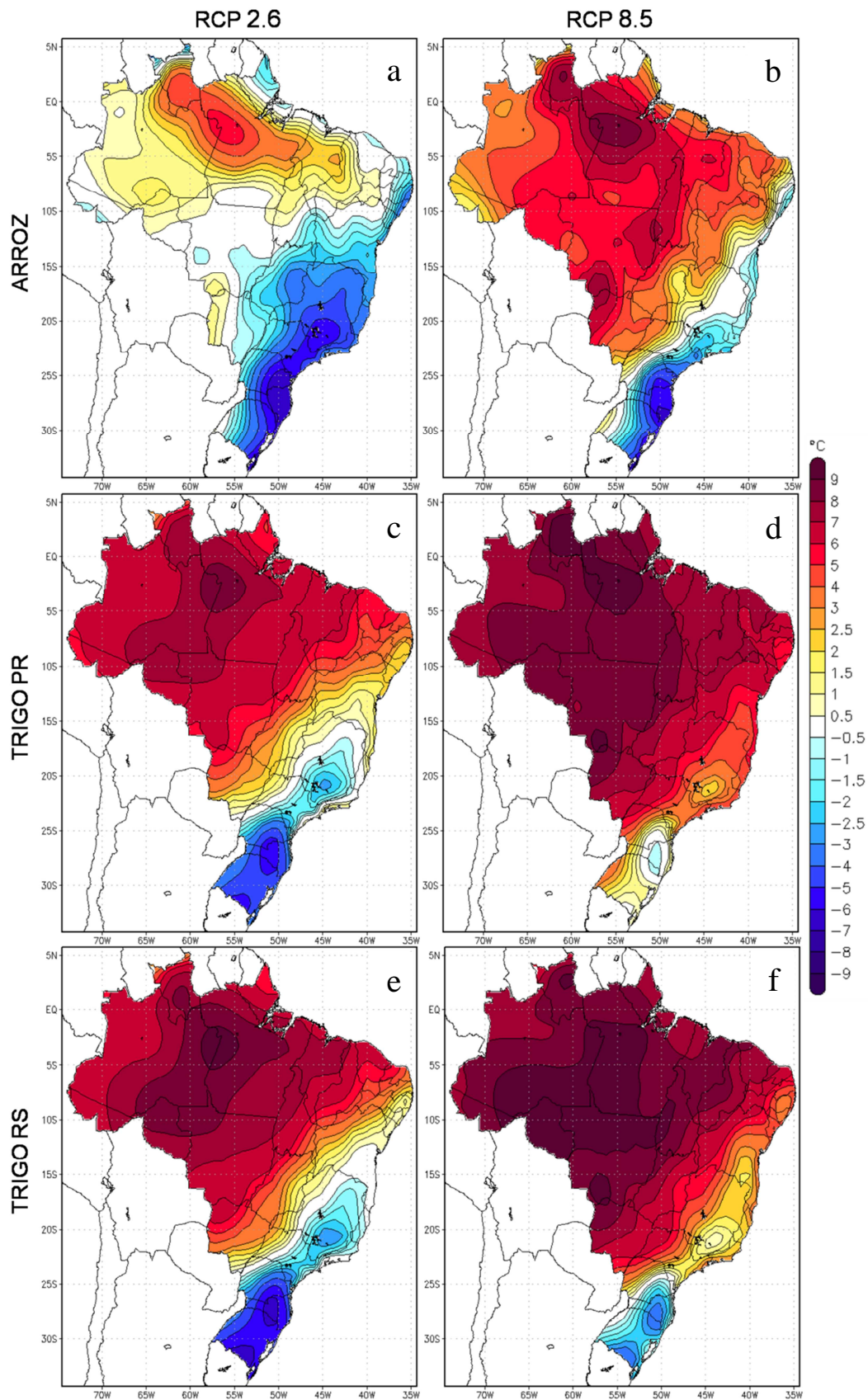
T_m - T_{ot}

Figura 4.15 – Diferença entre a temperatura média do ar (T_m) e a temperatura de máximo desenvolvimento (T_{ot}) dos cenários RCP2.6 e RCP8.5 em relação para as culturas de arroz e trigo.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste estudo foi em analisar o impacto preliminar do aquecimento global no ciclo de desenvolvimento das culturas e algodão, arroz irrigado, milho, soja e trigo, e verificar a viabilidade de cultivo das principais regiões produtoras em relação ao acréscimo na temperatura média do ar utilizando o conceito de graus-dia.

O primeiro fator a ser considerado é que o processo de regionalização acarreta em erros derivados do modelo global HadGEM2-ES, mas não significando que isso seja um erro na execução do processo de *downscaling*. Isso pode ser observado na Figura 4.1, na qual a simulação do RegCM4 para o clima presente apresentou diferenças em relação aos valores de T_m , principalmente na porção mais ao norte do país nas quatro estações, com uma diferença de até 4°C observada no outono e na primavera. No entanto, nas demais regiões, as diferenças nos valores foram de no máximo 3°C em todas as estações. Em relação a padrão de distribuição de T_m , o modelo foi condizente com os dados observados.

Após a análise dos resultados da regionalização para o clima presente, foi efetuada outra análise comparativa, observando as diferenças dos cenários de clima futuro RCP2.6 e RCP8.5 entre o modelo RegCM4 e a média dos modelos globais apresentados no IR5 do IPCC (Figura 2.7). Observou-se coerência na distribuição das anomalias, com maiores valores mais localizadas entre as regiões Centro-Oeste e Norte, e menores ao Sul do país e em toda a faixa litorânea. As diferenças se estabeleceram em relação à intensidade do aquecimento. Em ambos os cenários, foi observado um aumento no valor máximo no modelo regional, de 0,5°C em RCP2.6 e de 2°C em RCP8.5.

A utilização do método 3 para a geração dos resultados, foi justificada através das comparações feitas nas Figuras 4.8 e 4.9, e pode-se concluir que os métodos 1 e 2, por não considerarem a relação em conjunto das temperaturas cardinais (T_b , T_{ot} e T_{max}) acabam superestimando os valores de °C dia quando a T_m supera T_{ot} , principalmente nos cenários de aquecimento global, na qual se espera um incremento de T_m durante os ciclos de desenvolvimento.

Os valores da duração dos ciclos de desenvolvimento obtidos para as condições de clima atuais, em geral foram coincidentes com a literatura para todas as culturas.

Em relação aos impactos do aquecimento dos cenários climáticos no ciclo de desenvolvimento das culturas, se observou condições favoráveis e desfavoráveis. Para o algodão o acréscimo de 1,5°C a 2°C, no RCP2.6, e de 5°C a 9°C, no RCP8.5, contribui para

que T_m se aproxime mais do limiar ótimo (T_{ot}) ocasionando em um desenvolvimento mais rápido da planta e redução do ciclo de até 90 dias, o que proporciona em manutenção das regiões produtoras. Já para as culturas de milho e soja, o cenário RCP2.6 não ocasionou grandes impactos, se comparado ao cenário RCP8.5, na qual T_m passa superar T_{ot} e a se aproximar de T_{max} , provocando STd menor sob uma condição mais estressante para a planta (Figura 3.2 e Equação 4), resultando em um prolongamento do ciclo de até 90 dias para o milho e de 75 dias para a soja. Sob essas condições, se observa uma redução da área, principalmente do milho 1ª safra.

No ciclo do arroz irrigado do RS o aumento de temperatura de 0,5°C a 1,5°C (RCP2.6) não provoca impacto significativo. Já sob condições de aquecimento de 1,5°C a 3°C, o arroz tem o seu desenvolvimento acelerado e ciclo reduzido em até 30 dias, somente no Leste do estado que o impacto é negativo, com desenvolvimento prolongado em até 30 dias.

Os impactos no desenvolvimento da cultura de trigo sob as condições do cenário RCP2.6 mantém a duração do ciclo próxima ao observado sob as condições climáticas da referência. Já no cenário RCP8.5, o incremento de 3°C a 5°C na T_m , acelera o desenvolvimento do ciclo em 15 a 30 dias do RS. No entanto, no estado do PR, o aquecimento maior de 5°C a 7°C, favorece as regiões do Centro-Sul do estado, com redução do ciclo de até 30 dias. Nas áreas do extremo Oeste, o aumento de 7°C a 8°C prolonga o ciclo em 15 a 30 dias.

De maneira geral, as condições de aquecimento do cenário RCP2.6 não apresentaram impacto significativo, a ponto de concluir se haverá alguma mudança na distribuição geográfica das culturas. Já para o aquecimento proposto pelo cenário RCP8.5, os impactos são bastante significativos. Para o algodão além da manutenção das regiões produtoras, a cultura se desenvolverá de forma mais rápida, sendo a mesma condição observada para o trigo no RS. Já para as demais culturas e regiões, pode-se concluir que haverá redução da área cultivável. Para o milho, as regiões produtoras do MS, MT, Oeste de GO e da BA, não estarão em condições ideais de cultivo. Já as demais áreas, as condições se mantêm favoráveis ou se beneficiam com o aceleração do desenvolvimento. No entanto, de forma geral, a previsão é de redução da área de milho.

Para a soja, apesar de o impacto em redução de áreas ser menor, todo o estado do MT e pequena parte do MS e GO se tornam inviáveis ao cultivo, em relação às condições de

temperatura. Nas demais regiões produtoras há a manutenção ou favorecimento do desenvolvimento.

No caso do trigo no PR e do arroz irrigado no RS, as condições desfavoráveis são apenas para uma pequena região do extremo Oeste paranaense e do Leste gaúcho, podendo ocorrer uma pequena redução de área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTO, C. M. et al. Modelagem do desenvolvimento de trigo considerando diferentes temperaturas cardinais e métodos de cálculo da função de resposta à temperatura. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, nº 6, p. 545-553, 2009.

AMBRIZZI T. et al. **Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais**, Relatório nº 3 do Subprojeto Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_3.pdf>. Acesso em: 10 Out. 2017.

ANTUNES, A. P. S. **Coprodutos de oleaginosas em dietas para vacas lactantes em pastejo**. 2017. 117 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, BA, 2017.

ARAÚJO, S. M. B. **Estudo da variabilidade climática em regiões homogêneas de temperaturas média do ar no Rio Grande do Sul**. 2005. 54 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005.

ASSOCIAÇÃO MATO-GROSSENSE DOS PRODUTORES DE ALGODÃO: AMPA. **História do algodão**. Cuiabá, 2016. Disponível em: <http://www.ampa.com.br/site/qs_historia.php>. Acesso em: 26 out. 2017.

BELTRÃO, N. E. M.; ARAÚJO, A. E. **Algodão: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Algodão. Brasília, DF, 265 p., 2004.

BERLATO, M. A.; CORDEIRO, A. P. A. Variabilidade climática e agricultura do Rio Grande do Sul. In: FEDERAÇÃO DOS CLUBES DE INTEGRAÇÃO E TROCA DE EXPERIÊNCIA – FEDERACITE. (Org.). **As estiagens e as perdas na agricultura: fenômeno natural ou imprevisibilidade?**. 1. ed. Porto Alegre: Ideograf Editora Gráfica, p. 43-59, 2005.

BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil: história e estatística**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 61 p., 1987.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO: CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira grãos - Safra 2016/17**, v. 4, n. 9, p. 1-161, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA: EMBRAPA. **EMBRAPA SOJA: História da soja**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/historia>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA: EMBRAPA. **Sistemas de produção Embrapa: Cultivo do arroz irrigado no Brasil**. Brasília: DF, 2005. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col>

_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=5101&p_r_p_-996514994_topicoId=5515>. Acesso em: 26 Dez. 2017.

FARIAS, J. R. B; NEPOMUCNO, A. L., NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FERREIRA, W. P. M.; COSTA, L. C.; SOUZA, C. F. Modelo de estimativa de produtividade de soja {*Glycine max* (L.) Merrill} em função da variabilidade da temperatura. **Engenharia na Agricultura, Viçosa**, MG, v. 15, nº 4, p. 400-407, 2007.

FLANDRIN, J. L.; MONTANARI, M. **História da alimentação**. São Paulo, SP: Estação da Liberdade, 888 p., 1998.

FOCHEZATTO, A.; GRANDO, M. Z. **Produção agropecuária e crescimento econômico no Rio Grande do Sul: uma análise de insumo-produto**. In: 47º Congresso Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Soc. Rural. Porto Alegre, 26 a 30 jul., 2009.

GALVÃO, J. C. C. et al. Sete décadas de evolução do sistema produtivo da cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 61, p. 819-828, 2014.

GAO, L.; JUN, Z.; HUANG, L. Rice clock model—a computer model to simulate rice development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 60, nº 1, p. 1-16, 1992.

GILMORE, E. C.; ROGERS, J. S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. **Agronomy Journal**, v. 50, nº 10, p. 611-615, 1958.

GIORGI, F.; ANYAH, R. O. The road towards RegCM4. **Climate Research**, v. 52, p. 3-6, 2012.

HOSTETLER, S.W.; ALDER, J.R.; ALLAN, A.M. Dynamically downscaled climate simulations over North America: Methods, evaluation and supporting documentation for users. U.S. Geological Survey: Open-File Report 2011-1238, 64 p., 2011.

HOWDEN, S. M. et al. Adapting agriculture to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, USA, 104, p. 19691-19696, 2007.

INFELD, J. A.; SILVA, J. B.; ASSIS, F. N. Temperatura base e graus-dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, nº 2, p. 187-191, 1998.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report, Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014.

LERAYER, A. **Guia do milho: tecnologia do campo à mesa**. Conselho de Informações sobre Biotecnologia, p. 1-16, 2006. Disponível em: <http://www.cib.org.br/pdf/guia_do_milho_CIB.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2017.

LOBELL, D. B.; SCHLENKER, W.; COSTA-ROBERTS, J. Climate trends and global crop production since 1980. **Science**, v. 333, nº 6042, p. 616-620, 2011.

MANDARINO, J. M. G. **Origem e história da soja no Brasil**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2017/04/05/origem-e-historia-da-soja-no-brasil/>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO: MAPA. **Projeções do agronegócio: Brasil 2016/17 a 2026/27**. Brasília: DF, MAPA, 103 p., 2017.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology*, v. 28, n° 7, p. 893-904, 2008.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 206 p., 2007.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: MCTI. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – volume I. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 135 p., 2016.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 530 p., 2009.

MORI, C. et al. **Trigo: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 309 p., 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/trigo/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1040211/trigo-o-produtor-pergunta-a-embrapa-responde>>. Acesso em: 23 Dez. 2017.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, p. 747-756, 2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION: NASA. **February 2017 was second-warmest February on record**. New York, 2017. Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/news/2564/february-2017-was-second-warmest-february-on-record/>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

NATIVIDADE, U. A. **Observação e projeção de eventos climáticos extremos sobre o Brasil e identificação de possíveis vulnerabilidades sobre Minas Gerais**. 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

NUNES, J. L. S. **Importância econômica**. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/culturas/milho/informacoes/importancia_361402.html>. Acesso em: 03 Dez. 2017.

OBREGON, G.; MARENGO, J. A. **Caracterização do clima no século XX no Brasil: tendência de chuvas e temperaturas médias e extremas - Relatório nº 2 do Subprojeto Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI**. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/prod_probio/Relatorio_2.pdf>. Acesso em: 12 Nov. 2017.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: PBMC. 2013. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil, 24 p., 2013.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS: PBMC. 2014. Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 464 p., 2014.

PEIXOTO, C. M. **O milho no Brasil, sua importância e evolução**. Santa Cruz do Sul, 2014. Disponível em: <<http://www.pioneersementes.com.br/media-center/artigos/165/o-milho-no-brasil-sua-importancia-e-evolucao>>. Acesso em: 05 Dez. 2017.

PORTER, J. R. et al. Food security and food production systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects*. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 para o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, p. 485-533, 2014.

REDDY, K. R. et al. Temperature effects on Pima cotton growth and development. **Agronomy Journal**, v. 84, p. 237-243, 1992.

ROSOLEM, C. A. **Informações Agronômicas nº 95**: Ecofisiologia e manejo da cultura do algodoeiro. Botucatu, SP: Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, p. 1-9, 2001. Disponível em: <https://sag.fucamp.com.br/assets/professor/material_apoio/8404enc95p1-9.pdf>. Acesso em: 04 Jan. 2018.

ROSSI, R. M.; NEVES, M. F. **Estratégias para o trigo no Brasil**. São Paulo, SP: Atlas, 224 p., 2004.

SANTOS, D. N. et al. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, nº 5, p. 492-500, 2010.

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, nº 2, p. 257-271, 2007.

SILVA, W. L.; DEREZYNSKI, C. P. Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no Estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 37, nº 2, p. 123-138, 2014.

SILVA, W. L. et al. Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, nº 2, p. 181-194, 2015.

SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M. F. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 311-320, 2000.

SIQUEIRA, O. J. W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira** [LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G.]. Jaguariúna: EmbrapaMeioAmbiente, p. 33-63, 2001.

SLAFER, G. A.; RAWSON, H. M. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: A re-examination of some assumptions made by physiologists and modelers. **Australian Journal Physiologist**, v. 21, p. 393-426, 1994.

SLAFER, G. A. Differences in phasic development rate among wheat cultivars independent of responses to photoperiod and vernalization. A viewpoint of the intrinsic earliness hypothesis. **Journal of Agricultural Science**, v. 126, p. 403-419, 1996.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA: SNA. **Terceiro maior produtor de algodão, Brasil procura crescimento na produção**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://sna.agr.br/terceiro-maior-produtor-de-algodao-brasil-procura-crescimento-na-producao/>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO: SOSBAI. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. In: XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado, Bento Gonçalves, RS, Brasil. – Pelotas: SOSBAI, 2016, 200 p. Disponível em: < http://www.sosbai.com.br/docs/Boletim_RT_2016.pdf>. Acesso em: 16 Dez. 2017.

SOUSA, L. B. O algodoeiro: alguns aspectos importantes da cultura. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 5, n. 4, p. 19-26, 2010.

SPERLING, S. et al. **Recorrência do fenômeno de estiagens na estação de cultivo da soja no município de Cruz Alta, Rio Grande do Sul**. In: XVII Seminário Interinstitucional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2012, Cruz Alta. UNICRUZ, p. 3-6, 2012.

STEINMETZ, S. et al. GD arroz: programa baseado em Graus-Dia como suporte ao planejamento e à tomada de decisão no manejo do arroz irrigado. Circular Técnica Embrapa, nº 162, Pelotas-RS, 2015.

STEINMETZ, S. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: **Arroz irrigado no Sul do Brasil** [GOMES, A. S.; MAGALHÃES, A. M.]. Brasília: DF, Embrapa, p. 45-74, 2004.

STRECK, N. A. A generalized nonlinear air temperature response function for node appearance rate in muskmelon (*Cucumis melo*L.). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, nº 1, p. 105-111, 2002.

STRECK, N. A. et al. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, nº 3, p.139-150, 2003.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Revista Ciência Rural**, v. 35, p. 734-744, 2005.

STRECK, N. A. et al. Estimativa do plastocrono em meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado em estufa plástica em diferentes épocas do ano. **Revista Ciência Rural**, v. 35, nº 6, p. 1275-1280, 2005.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 41, nº 9, p. 1351-1359, 2006.

STRECK, N. A. et al. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da escala de counce para cultivares sul- brasileiras de arroz irrigado. **Bragantia**, Campinas, v. 66, nº 2, p. 357-364, 2007.

TAKEITI, C. Y. Trigo. Brasília, DF: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2015. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000girlwnqt02wx5ok05vadr1qrnof0m.html>. Acesso em: 23 Dez. 2017.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **ClimaticChange**, v. 109, p. 5-31, 2011.

WALTER, L. C. et al. Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de cultivares de trigo e sua associação com a emissão de folhas. **Revista Ciência Rural**, v. 39, nº 8, p. 2320-2326, 2009.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION: WMO. **Climate breaks multiple records in 2016, with global impacts**. Genebra, 2017. Disponível em: <<https://public.wmo.int/en/media/press-release/climate-breaks-multiple-records-2016-global-impacts>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, nº 6, p. 2644-2659, 2016.

YAMAKAWA, H. et al. Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. **Plant Physiology**, v. 144, nº 1, p. 258-277, 2007.

YANG, Z. et al. Modeling of translocation rate of dry matter from vegetative organs to panicle as influenced by air temperature in rice. **Japanese Journal of Crop Science**, v. 74, nº 1, p. 65-71, 2005.

YOSHIDA, S.; PARAO, F. T. Climatic influence on yield components of lowland rice in the tropics. International Rice Research Institute: Climate and rice. Los Baños: IRRI, p. 471-494, 1976.