

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Meteorologia
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

Dissertação



**Estimativa do Balanço Hídrico Climatológico para determinação do cultivo de
milho no Rio Grande do Sul: período atual e projeções futuras**

Gustavo Colepícolo Monteiro

Pelotas, 2020

Gustavo Colepícolo Monteiro

**Estimativa do Balanço Hídrico Climatológico para determinação do cultivo de
milho no Rio Grande do Sul: período atual e projeções futuras**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Luciana Barros Pinto

Prof. Dr. Marcelo Felix Alonso

Prof. Dr. Mateus da Silva Teixeira

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M772e Monteiro, Gustavo Colepícolo

Estimativa do balanço hídrico climatológico para determinação do cultivo de milho no Rio Grande do Sul: período atual e projeções futuras / Gustavo Colepícolo Monteiro ; Luciana Barros Pinto, orientador ; Marcelo Felix Alonso, Mateus da Silva Teixeira, coorientadores. — Pelotas, 2020.

96 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Milho. 2. Déficit hídrico. 3. Precipitação. 4. Evapotranspiração. 5. Meteorologia. I. Pinto, Luciana Barros, orient. II. Alonso, Marcelo Felix, coorient. III. Teixeira, Mateus da Silva, coorient. IV. Título.

CDD : 633.15

Gustavo Colepícolo Monteiro

Estimativa do Balanço Hídrico Climatológico para determinação do cultivo de milho no Rio Grande do Sul: período atual e projeções futuras

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Data da Defesa: 14 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr^a. Luciana Barros Pinto (orientadora)
Doutora em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, Brasil

Prof.^o Dr. Marcelo Félix Alonso (coorientador)
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

Prof.^o Dr. Mateus da Silva Teixeira (coorientador)
Doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

Pref.^o Dr. Leonardo Calvetti
Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo, Brasil

Prof.^a Dr^a. Morgana Vaz da Silva
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, Brasil

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus avós maternos (Hélia e Geraldo) que, com muita dedicação e sabedoria, sempre me mostraram desde os primeiros anos de vida o significado do reconhecimento e gratidão.

À minha mãe (Elenice) pela determinação e luta na minha formação e dos meus irmãos, se doando incansavelmente para nos proporcionar o melhor sempre, fazendo amparar os ensinamentos de meus avós.

Aos meus irmãos (Raíssa e Alessandro) que por mais difícil que fossem as circunstâncias, sempre estiveram comigo, me dando todo apoio e me motivando sempre em ultrapassar qualquer barreira para eles o melhor também poder oferecer.

Aos meus colegas de mestrado e com certeza futuros excelentes profissionais.

A todos meus amigos de Pelotas por sempre estarem comigo, me proporcionando o melhor que esta cidade pode me oferecer.

Ao meu namorado (Rodolfo) que se fez mais que um amigo, tornou parte de mim e me fez enfrentar todas as minhas dificuldades com muito mais alegria, e amor. E que, de quebra, ainda me “emprestou” uma família que cumpriu tudo o que a minha faria se não fosse a distância.

Aos professores da Pós-Graduação em Meteorologia por terem acreditado em um sonho que agora é de todos, e por terem me mostrado o caminho das obras científicas, à qual com muita dedicação, presteza e competência conduziram suas profissões.

Aos meus orientadores pela dedicação, paciência, e empenho na elaboração deste trabalho. Obrigado de coração pelo suporte no pouco tempo que lhes coube, pelas suas correções e incentivo.

Ao colega e excelente profissional (Douglas Lindemann), o qual tive o enorme prazer em dividir a sala de trabalho e que me auxiliou inúmeras vezes quando solicitado.

Aos membros da banca (Leonardo Calvetti e Morgana Vaz) pelos pertinentes apontamentos que engrandeceram esse estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

E a Deus, por ter me concedido o privilégio de realizar este grande desafio.

“Uma tempestade não é o céu inteiro”
(Rafaela Carvalho)

Resumo

MONTEIRO, Gustavo Colepícolo. **Estimativa do Balanço Hídrico Climatológico para determinação do cultivo de milho no Rio Grande do Sul: período atual e projeções futuras.** Orientadores: Luciana Barros Pinto, Marcelo Felix Alonso e Mateus da Silva Teixeira. 2020. 96f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

Em território nacional, o Rio Grande do Sul é um antigo produtor de milho, tendo uma significativa atuação na economia do país. Comumente o rendimento do grão é delimitado pela quantidade de água disponível no solo e, por isso, afetado em períodos de estiagem que acometem o Estado. O objetivo geral deste trabalho foi verificar a disponibilidade hídrica para a cultura de milho no Rio Grande do Sul, tendo ainda como objetivos específicos: averiguar o rendimento médio e a produção da cultura de milho no Estado e municípios que foram selecionados no período 1981-2018; identificar a disponibilidade hídrica potencial e da cultura de milho para estes municípios através do cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC) proposto por Thornthwaite e Mather (1955); avaliar o desempenho dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) através análises estatísticas entre dados mensais observados e estimados de temperatura média do ar e precipitação total no período de 1981 a 2010; determinar projeções futuras do BHC potencial e da cultura com base nos dados do modelo de melhor desempenho, permitindo identificar se as regiões em estudo apresentarão futuramente déficit ou excesso de água no solo, auxiliando assim no planejamento do cultivo de milho no RS. Cruz Alta, Iraí, Campo Bom, Cambará do Sul e Pelotas foram selecionadas como regiões de destaque na produção de milho no Estado. As quebras de safras apontadas em 2005, 2009 e 2012 podem estar associadas à atuação intensa dos ENOS. No período atual apenas Pelotas e Campo Bom apresentaram déficit hídrico. O modelo HadGEM-2-ES apresentou o melhor desempenho, sendo então utilizado para fornecer previsões de temperatura e precipitação para o cálculo do BHC futuro em dois períodos (2041-2070 e 2071-2100). No cenário otimista (RCP 4.5), Campo Bom apresentou déficit hídrico em ambos os períodos, e Pelotas apenas no último. Dentro do cenário pessimista (RCP 8.5), apenas Campo Bom e Pelotas exibiram déficit hídrico no primeiro período e, com exceção de Cambará do Sul, até o final do século, as outras localidades seguiram apresentando esse problema.

Palavra-chave: milho. déficit hídrico. precipitação. evapotranspiração.

Abstract

MONTEIRO, Gustavo Colepícolo. **Estimation of the Climatic Water Balance to determine maize cultivation in Rio Grande do Sul: current period and future projections.** Advisors: Luciana Barros Pinto, Marcelo Felix Alonso and Mateus da Silva Teixeira. 2020. 96p. Dissertation (Master in Meteorology) - Postgraduate Program in Meteorology, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

In national territory, Rio Grande do Sul is a former maize producer, having a significant role in the country's economy. Commonly the grain yield is limited by the amount of water available in the soil and, therefore, affected during periods of drought that can affect the State. The main goal of this research was to verify the water availability for maize culture in Rio Grande do Sul, also having as specific objectives: to ascertain the average yield and the production of the corn crop in the State and municipalities that were selected in the period 1981-2018; identify the potential water availability and maize crop for these municipalities by calculating the climatological water balance (CWB) proposed by Thornthwaite and Mather (1955); evaluate the performance of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) models through statistical analysis between observed and estimated monthly data of average air temperature and total precipitation in the period from 1981 to 2010; determine future projections of potential CWB and culture based on data from the best performing model, allowing to identify if the regions under study will present deficit or excess water in the soil in the future, thus helping in the planning of maize cultivation in RS. Cruz Alta, Iraí, Campo Bom, Cambará do Sul and Pelotas were selected as outstanding regions in the production of corn in the State. The crop failures identified in 2005, 2009 and 2012 may be associated with the intense performance of ENOS. In the current period, only Pelotas and Campo Bom had a water deficit. The HadGEM-2-ES model presented the best performance, being used to provide necessary temperature and precipitation forecasts for the calculation of the future CWB in two periods (2041-2070 and 2071-2100). In the optimistic scenario (RCP 4.5), Campo Bom had a water deficit in both periods, and Pelotas only in the last. Within the pessimistic scenario (RCP 8.5), only Campo Bom and Pelotas showed a water deficit in the first period and, with the exception of Cambará do Sul, until the end of the century, other locations continued to present this problem.

Keyword: corn. water deficit. precipitation. evapotranspiration.

Lista de Figuras

Figura 1 - Ciclo hidrológico.....	21
Figura 2 - Coeficiente da cultura (Kc) do milho ao longo do seu ciclo de desenvolvimento.	25
Figura 3 - Principais produtores mundiais de milho.....	29
Figura 4 - Estádio fenológico do milho.	30
Figura 5 - Regiões para recomendações do cultivo do milho.....	43
Figura 6 - Distribuição da produção (10^6 ton) (linha sólida azul) e do rendimento médio de milho (linha sólida verde) (10^3 kg ha $^{-1}$) no RS para o período de 1981-2018.	44
Figura 7 - Distribuição da produção (10^4 ton) (A) e do rendimento médio (10^3 kg ha $^{-1}$) (B) do milho para os municípios de Cruz Alta (linha rosa), Iraí (linha laranja), Campo Bom (linha azul), Cambará do Sul (linha vermelha) e Pelotas (linha verde) , no período de 1981-2018, e média do Estado (linha preta).	46
Figura 8 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A,D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B,E) e da Distribuição de Temperatura (°C) (barra azul) (C,F) no período de 1981 a 2010, para Cruz Alta e Iraí, respectivamente – RS, com CAD de 100 mm.....	49
Figura 9 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A,D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B,E) e da Distribuição de Temperatura (°C) (barra azul) (C,F) no período de 1981 a 2010, para Campo Bom e Cambara do Sul, respectivamente – RS, com CAD de 100 mm.	50
Figura 10 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde)	

Hídrica (B) e da Distribuição de Temperatura (°C) (C) no período de 1981 a 2010, para Pelotas, respectivamente – RS, com CAD de 100 mm.	51
Figura 11 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 1981 a 2010, para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde)....	53
Figura 12 - Indicadores estatísticos EMA de temperatura (°C) (A) e precipitação (mm) (C); REMQ de temperatura (°C) (B) e precipitação (mm) (D); estimativas para as séries mensais de temperatura (°C) (E) e estimativas para as séries mensais de precipitação (mm) (F) - entre dados observados em estações do INMET de 1981 - 2010 e estimados pelos modelos BESM-OA2-5 (linha sólida e barra azul), HadGEM-2-ES (linha sólida e barra vermelha), GFDL-CM3 (linha sólida e barra verde) para o município de Pelotas, no mesmo período. Linha e barra preta, referem-se a média de temperatura e precipitação, respectivamente.....	58
Figura 13 - Tendência de Temperatura (°C) para Cruz Alta (A, B), Iraí (C, D), Campo Bom (E, F), Cambará do Sul (G, H) e Pelotas (I, J), respectivamente – RS, para os períodos de 1981 – 2010 (linha vermelha); 2041 – 2070 (linha preta); e 2071 – 2100 (linha azul), dos cenários futuros – RCP 4.5 (A, C, E, G e I) e 8.5 (B, D, F, H e J).....	60
Figura 14 - Tendência de Precipitação (mm) para Cruz Alta (A, B), Iraí (C, D), Campo Bom (E, F), Cambará do Sul (G, H) e Pelotas (I, J), respectivamente – RS, para os períodos de 1981 – 2010 (linha vermelha); 2041 – 2070 (linha preta); e 2071 – 2100 (linha azul), dos cenários futuros – RCP 4.5 (A, C, E, G e I) e 8.5 (B, D, F, H e J).....	61
Figura 15 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Crua Alta – RS, com CAD de 100 mm	63

- Figura 16 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Iraí – RS, com CAD de 100 mm.....64
- Figura 17 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Campo Bom – RS, com CAD de 100 mm.....65
- Figura 18 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (E, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Cambará do Sul – RS, com CAD de 100 mm.....66
- Figura 19 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Pelotas – RS, com CAD de 100 mm.....67
- Figura 20 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2041-2070, do cenário futuro – o RCP (4.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).....69
- Figura 21 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2071-2100, do cenário futuro – o RCP (4.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C),

Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).....	70
Figura 22 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Cruz Alta – RS, com CAD de 100 mm.	72
Figura 23 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B,C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Iraí – RS, com CAD de 100 mm.....	73
Figura 24 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Campo Bom – RS, com CAD de 100 mm.....	74
Figura 25 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Cambará do Sul – RS, com CAD de 100 mm.....	75
Figura 26 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (C, F) no período de 2041-2070	

(A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Pelotas – RS, com CAD de 100 mm.....	76
Figura 27 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2041-2070, do cenário futuro – o RCP (8.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).	78
Figura 28 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2071-2100, do cenário futuro – o RCP (8.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).	79

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Indicação dos fatores de correção de evapotranspiração em função da latitude - dado para o Brasil.	36
Tabela 2 - Planilha utilizada para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico.....	36
Tabela 3 - Coeficiente da cultura e duração dos estádios fenológicos da cultura utilizada no estudo.	39
Tabela 4 - Planilha utilizada para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico aplicado a cultura do milho.	40
Tabela 5 - Modelos Globais Climáticos utilizados.	40
Tabela 6 - Características específicas de cada modelo Global Climático.	41
Tabela 7 - Valores de EMA e REMQ, na comparação entre observado e estimados de temperatura (°C) e precipitação (mm) pelos modelos BESM-OA2-5, HadGEM-2-ES e GFDL-CM3, para os municípios de Cruz Alta (CA), Iraí (IR), Campo Bom (CB), Cambará do Sul (CS) e Pelotas (PE), no período da Normal Climatológica 1981-2010.....	56

Lista de abreviaturas e siglas

ALT	Alteração do armazenamento de água no solo
ARM	Armazenamento da água no solo
BH	Balanço hídrico
BHC	Balanço hídrico climatológico
CAD	Capacidade de água disponível
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
DEF	Deficiência hídrica
EMA	Erro médio absoluto
ENOS	El niñ o oscilação sul
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração de cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
EXC	Excesso hídrico
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kc	Coeficiente de cultura
MCG _s	Modelos de Circulação Global ou Geral
P	Precipitação total
P-ETP	Disponibilidade hídrica
RCP	Representative Concentration Pathway
REMQ	Raiz do erro médio quadrático
RS	Rio Grande do Sul
SCM	Sistemas convectivos de mesoescala
T	Temperatura média do ar

Sumário

1 Introdução.....	15
2 Revisão de Literatura.....	17
2.1 Disponibilidade Hídrica.....	17
2.1.1 Disponibilidade de água doce no planeta.....	17
2.1.2 A água como fator limitante à produtividade agrícola.....	17
 2.2 Balanço hídrico	21
2.2.1 Evapotranspiração	23
2.3 Projeções futuras de temperatura e precipitação	26
2.4 A cultura do Milho.....	28
2.4.1 A cultura do Milho no Rio Grande do Sul	32
3 Metodologia	34
3.1 Determinação dos municípios produtores de milho.....	34
3.2 Cálculo do balanço hídrico climatológico	34
3.3 Determinação do modelo CMIP5 de melhor desempenho	40
3.4 Cálculo do balanço hídrico futuro	42
4 Resultados	43
4.1 Municípios produtores de milho.....	43
4.2 Balanço hídrico climatológico atual e da cultura.....	47
4.3 Determinação dos modelos CMIP5 de melhor desempenho	54
4.3.1 O modelo CMIP5 de melhor desempenho	59
4.4 Balanço hídrico climatológico futuro e da cultura	62
5 Conclusões	80
6 Referências	84

1 Introdução

O agronegócio no Brasil tem uma significativa atuação na economia do país e representou 21,4% do Produto Interno Bruto (PIB) para o ano de 2019 (CEPEA, 2019). Sua capacidade pode atender uma ampla demanda alimentícia, tendo em vista a utilização de diferentes tipos de tecnologias, investimentos em produção, pesquisa e desenvolvimento.

A população mundial deve atingir 9,7 bilhões em 2050 (UNITED NATIONS, 2019), resultando em uma maior busca por alimentos e, consequentemente, por água. Tais processos de desenvolvimento estão estreitamente correlacionados, à qual o uso ponderado dos recursos hídricos passa a ser ainda mais relevante no intuito de se alcançar uma alta produtividade através do seu consumo eficiente.

Além do destaque na alimentação humana e, principalmente, animal, o milho é uma matéria prima capaz de dar origem a uma infinidade de outros produtos, tais como combustíveis, bebidas e polímeros (MIRANDA, 2018). No âmbito da produção agrícola brasileira, sua cultura apresenta duas safras anuais: a primeira, no intervalo de outubro a dezembro, e a segunda, chamada de safrinha, que vai de janeiro a abril. E, um dos principais fatores vinculados à produtividade desta cultura é a quantidade de umidade no solo (MATOS et al., 2007).

O Rio Grande do Sul apresenta momentos de restrições para tal cultivo, tendo em vista a ocorrência de fases com déficit hídrico, que abrangem algumas regiões desde o centro sul, extremo oeste e norte do Estado e, mesmo sendo períodos curtos de estiagem, podem acabar se equiparando aos de maior demanda hídrica pela cultura (MATZENAUER et al., 2002).

A parcela de água no solo pode ser estimada através do cálculo do Balanço Hídrico (BH), que é capaz de quantificar as entradas e as saídas de água do solo. Sua disponibilidade está associada ao regime de precipitação, que representa o principal componente de entrada e atua como uma das principais variável meteorológica capaz de interferir no desempenho da lavoura, tanto no período vegetativo quanto no reprodutivo. Enquanto que, a evapotranspiração (ET) é tida como a principal componente de saída de água do sistema hídrico (BERLATO, 1992).

Compreender melhor o BH de um local contribui na determinação de uma agricultura praticável ou viável numa determinada área, melhor época para o seu cultivo, bem como se haverá necessidade de investimentos em reposição hídrica por meio de irrigação (PEREIRA et al., 2002). Além disso, como há uma dependência direta com as condições climáticas, quaisquer mudanças nas variáveis de temperatura do ar ou precipitação pluvial podem acarretar em modificação no balanço hídrico (CARVALHO e STIPP, 2004).

Neste contexto, alterações no clima são capazes de gerar impactos na disponibilidade hídrica regional, afetando a agricultura (DE SOUZA et al., 2011). Para isso, o Balanço Hídrico Climatológico (BHC) evidencia flutuações temporais de períodos com excedentes e déficits hídricos, permitindo, dessa forma, o planejamento das atividades agrícola (PEREIRA et al., 2002).

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo geral, avaliar a disponibilidade hídrica para cinco municípios, localizados em regiões distintas recomendadas para a semeadura do milho no Rio Grande do Sul. Sendo os objetivos específicos: avaliar o rendimento médio e a produção da cultura do milho para todo o Estado e municípios selecionados, no período 1981 - 2018, no intuito de identificar os anos de quebra de safra; avaliar a disponibilidade hídrica potencial e da cultura do milho para estes municípios; avaliar o desempenho dos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) (versão 5) através análises estatísticas entre dados mensais observados e estimados de temperatura média do ar e precipitação total no período de 1981 a 2010; determinar, com base nos modelos de melhor desempenho, projeções futuras para o BHC potencial e da cultura, permitindo identificar se as regiões em estudo apresentarão futuramente deficiência ou excesso de água no solo, auxiliando assim no planejamento do cultivo de milho no RS.

2 Revisão de Literatura

2.1 Disponibilidade Hídrica

2.1.1 Disponibilidade de água doce no planeta

A água é tida como um recurso natural essencial a manutenção da vida, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento social, ambiental e também para a maioria dos setores econômicos de uma determinada região. No entanto, com o aumento da demanda hídrica através das suas mais variadas formas de utilização, tem-se contribuído para alterações da quantidade e da qualidade desse recurso natural (TUNDISI, 2003). Assim, esses aspectos devem ser observados e considerados no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

A situação de escassez de água deve se intensificar ainda mais e algumas regiões ao redor do mundo passarão também a sofrer com a escassez de alimentos, uma vez que são necessárias em média, mil toneladas de água para produzir uma tonelada de grãos (BROWN, BARLETTA E MENDOÇA, 2000).

Embora grande parte da superfície da Terra seja coberta por água, apenas 2,5% representa a água doce, e dessa porcentagem, 68,9% corresponde às geleiras e calotas polares, 29,9% são águas subterrâneas, 0,9% constitui a umidade do solo e apenas 0,3% integra de fato a água doce armazenada nos rios e lagos, que é efetivamente disponível para uso em diferentes atividades (TUNDISI, 2003).

O balanço hídrico e a biodiversidade dos sistemas aquáticos irão sofrer fortes mudanças, com alterações nos ciclos hidrológicos e processos de evaporação, gerando grandes danos ao funcionamento dos ecossistemas, um fator limitante à produtividade agrícola (TUNDISI, 2003).

2.1.2 A água como fator limitante à produtividade agrícola

A ocorrência de déficit hídrico em plantas cultivadas tende a afetar o crescimento e o desenvolvimento das culturas em todo o mundo. A produtividade, que é o rendimento

por hectare, tem seu máximo desempenho dependendo dos processos evaporativos, tipo de solo e características das plantas - área foliar, altura e profundidade do sistema radicular (MATZENAUER e SUTILI, 1983).

A frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores mais importantes à limitação da agrícola mundial. Na ausência desses efeitos extremos, a produção pode alcançar um rendimento significativo, com baixos riscos à quebra de safra (ORTOLANI e CAMARGO, 1987).

Inúmeras pesquisas já são capazes de apontar como o momento exato e a duração do déficit hídrico pode interferir na produtividade. A maneira de como a planta irá responder a falta de água no solo depende do estádio de desenvolvimento, do genótipo, do período de duração e da severidade do déficit (SANTOS e CARLESSO, 1998).

A redução da quantidade de umidade disponível no solo promove danos à planta, pois partes de sua estrutura deixam de receber o potencial da água necessário para sua sobrevivência (RAY e SINCLAIR, 1997). A vegetação passa a ter dificuldades em assimilar o carbono presente no dióxido de carbono (CO_2) dependendo do seu grau de desidratação, alterado pela abertura dos estômatos (ROSA, DILLENBURG E FORSETH, 1991).

Em contrapartida, plantas que não apresentam restrição hídrica passam a aumentar o volume estomático, ocasionando uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática se intensifica (JONES, 1994). Assim, a cultura passa por situações de maior taxa evaporativa para atmosfera através da transpiração vegetativa em situações de quantidade favorável de umidade presente no solo. No entanto, se a perda não for reposta através da absorção de água suficiente pelas raízes, poderá haver um desequilíbrio entre a transpiração e absorção, ocasionando estresse à planta. Esse cenário pode ser agravado em épocas quentes e secas, com baixos índices pluviométricos e em culturas sem sistemas de irrigação, tornando os danos irreversíveis (MONTEIRO, 2009).

O déficit hídrico afeta o crescimento e desenvolvimento ótimo das plantas, alterando sua capacidade foliar e, consequentemente, na taxa fotossintética (BERGAMACHI, 1992). Tais efeitos geram mudança na anatomia, morfologia, fisiologia

e bioquímica da vegetação. Situações onde há déficit hídrico nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura, por exemplo, acabam contribuindo para um desenvolvimento radicular profundo e estruturas aéreas mais reduzidas (MANFRON et al., 2003). Além disso, o envelhecimento das folhas pode ocorrer ao passo que solos secos não subsidiam quantidades de nitrogênio necessárias para atender seu crescimento vegetativo (WOLFE et al., 1988).

O rendimento do grão sofre com a variabilidade ao longo do ano para as culturas de primavera-verão devido à heterogeneidade na distribuição de chuvas no Estado do Rio Grande do Sul. Existe uma dependência entre as condições meteorológicas e climatológicas com os resultados na produtividade em escalas de tempo e espaço, tendo o fator pluviométrico como principal responsável no desfecho final da produção (MATZENAUER et al., 1995).

Para a maioria dos estudos realizados sobre o comportamento pluvial no Estado, a distribuição anual e mensal dessa variável meteorológica foi levada em consideração. Tais valores são extremamente importantes, mas acabam ficando restritos à meteorologia, pois esse é um tipo de informação inconsistente, visto que a análise das chuvas engloba apenas valores de precipitação pluvial e não a efetiva ou aproveitável pela cultura - definida como sendo a precipitação total menos o escoamento superficial, percolação profunda e evaporação (FONTANA e ALMEIDA, 2002). Logo, os resultados podem sofrer variações, tendo em vista que existem outros fatores influenciando isoladamente ou interagindo entre uns com os outros, e quaisquer que sejam suas alterações, poderá ocorrer influência direta na precipitação efetiva (HAYES e BUELL, 1955).

Em situações onde a evapotranspiração das plantas é superior à taxa de chuvas, ocorrerá déficit hídrico. Os meses de setembro e outubro têm maiores chances de a precipitação pluvial ser superior a perda de água pelas plantas, caracterizando o início do ano agrícola para as culturas de primavera-verão. No entanto, em novembro esse cenário pode sofrer alterações, possibilitando o surgimento de períodos com deficiência hídrica durante seus primeiros estádios de desenvolvimento. Os meses mais críticos ocorrem em dezembro, janeiro e fevereiro, quando a taxa evaporativa para atmosfera é consideravelmente aumentada pela maior intensidade da radiação solar e temperatura

do ar. É nesse período que tais culturas ficam mais sensíveis ao déficit hídrico, pois apresentam seu máximo crescimento vegetativo e reprodutivo, com o máximo consumo de água (ÁVILA et al., 1996).

A irrigação é utilizada na agricultura e tem, por objetivo, o fornecimento controlado de água para as plantas em quantidade suficiente e no momento certo, assegurando sua sobrevivência. Em climas temperados ou subtropicais úmidos essa técnica é uma forma factível de promover uma complementação de água às culturas durante períodos de déficit hídrico (LORENZI et al., 2010). Mesmo que a precipitação pluvial seja bem distribuída ao longo do ano no Rio Grande do Sul, há, no entanto, uma alta demanda evaporativa nos meses de dezembro a fevereiro, tornando as chuvas insuficientes para atender as necessidades da cultura nesse período (BERLATO, 1992).

Embora a irrigação tenda a complementar a falta ou a má distribuição de água, sua aplicação inadequada pode potencializar distúrbios de erosão do solo, percolação profunda, lixiviação de nutrientes e, problemas de compactação do solo em superfícies úmidas, afetando diretamente a cultura (REINERT, REICHERT e SILVA, 2001).

Ter a irrigação como meio alternativo de possibilitar um aumento na produtividade dos cultivos, na qualidade de produção e de agregação ao valor do produto, diminui os riscos na atividade agrícola, evitando assim os prejuízos e propiciando uma melhor otimização de renda e recursos dos agricultores. Além disso, como a água é um recurso natural finito, seu uso deve ser controlado para evitar que aconteçam perdas no processo de captação, condução e distribuição (TESTEZLAF, 2011).

Assim, sua eficiência na agricultura pode ser ampliada através do manejo das culturas, no intuito de um melhor aproveitamento das águas das chuvas e por intermédio da programação da irrigação. Gerar uma redução da lâmina de água aplicada mediante o máximo aproveitamento das precipitações pluviais assegura reduções do número de horas de funcionamento do sistema, com consequente diminuição no consumo de energia elétrica. Isso porque as despesas geradas pela utilização da lâmina de irrigação, juntamente com a depreciação dos equipamentos, são os principais responsáveis pelo alto custo da produção em lavouras irrigadas (CARLESSO et al., 2003).

De maneira geral a determinação da disponibilidade hídrica do solo é realizada pela estimativa do balanço hídrico que permite contabilizar as entradas e as saídas do

sistema. Contudo, além de garantir informações fundamentais da relação de água no sistema solo-planta-atmosfera durante todo o desenvolvimento da cultura, tende a aprimorar também o conhecimento na área para a tomada de decisão a respeito da exploração agrícola local (LIMA et al., 2006).

2.2 Balanço hídrico

Uma forma de estabelecer a quantidade de água presente no solo exigida para atender às necessidades metabólicas de uma determinada cultura agrícola é através do balanço hídrico, método que fornece informações sobre as entradas e saídas do sistema solo.

A contabilização é regida pelo princípio de conservação de massa, em um determinado volume, e dentre os elementos que fazem parte deste processo, podemos destacar como entrada de água no sistema a precipitação pluvial, a irrigação, o orvalho, o escoamento superficial para dentro da área, a drenagem lateral e a ascensão capilar. Enquanto que as saídas são consideradas como sendo a evapotranspiração, o escoamento superficial para fora da área, a drenagem lateral e a drenagem profunda (OMETTO, 1981).

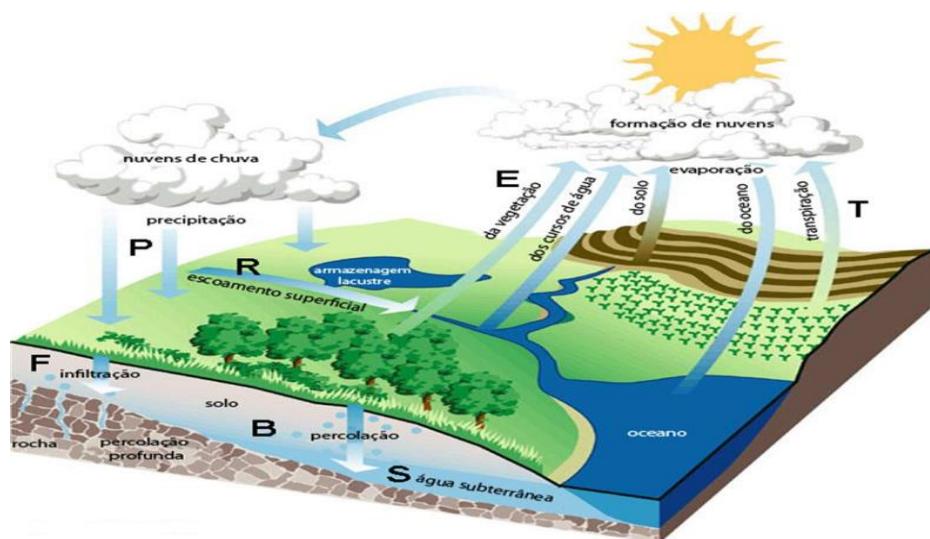


Figura 1 - Ciclo hidrológico.

Fonte: FISRWG (1998).

Existem inúmeros tipos de balanços hídricos, no entanto, cada um com a sua finalidade principal, que varia de acordo com o que está sendo avaliado. O modelo mais utilizado foi o proposto por Thornthwaite em 1948, posteriormente modificado por Mather em 1955, que ficou conhecido como “Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather, 1955” (COSTA, 1994).

O balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite e Mather (1955) estabelece a determinação do regime hídrico local, sem que haja necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para ser formulado, necessita de informações sobre o armazenamento máximo no solo (capacidade de água disponível - CAD), da precipitação pluvial (P), da temperatura do ar (T) e da estimativa da evapotranspiração potencial (ETP). A CAD varia em função da textura do solo e da profundidade das raízes das espécies vegetais que o cobre (PEREIRA e ALLEN, 1997). Com isso, é possível calcular a evapotranspiração real (ETR), o déficit (DEF) e o excedente hídrico (EXC), além do total de água armazenada (ARM), retido e reposto no solo em cada período (ALT) (PEREIRA e PRUITT, 2004).

Entre diferentes versões do BHC está o balanço hídrico climatológico normal, no qual se utilizam as normais climatológicas, em escala mensal, para caracterizar o regime hídrico de um ano médio em uma região (SENTELHAS et al., 1999).

Seu cômputo é traçado a partir de valores das normais climatológicas, servindo como parâmetro climático sobre a quantidade de água disponível no local de estudo e planejamento para a escolha da melhor época e tipo de manejo a ser explorado dentro do ramo agrícola (NOGUEIRA, 2019).

Inúmeros trabalhos na literatura aplicam o método de Thornthwaite e Mather (1955) para determinar o BHC, visto que seus cálculos utilizam elementos climatológicos que são os mais observados e de melhor qualidade (precipitação e temperatura do ar) (TOLEDO et al., 2002).

2.2.1 Evapotranspiração

As variáveis do clima tendem a influenciarem na disponibilidade hídrica, uma vez que, o incremento da temperatura tende a gerar o aumento da capacidade do ar em reter vapor d'água e, consequentemente, de elevar a evapotranspiração das plantas.

A ET compreende a mudança de fase do estado líquido para o gasoso de uma superfície de água livre (mar, lago e rio) ou úmida (solo e planta). Em cenários de solos parcialmente vegetativos, essa perda de água para atmosfera ocorre de forma conjunta (BERLATO e MOLION, 1981).

Esses processos são regidos pela disponibilidade de água no solo, pela demanda atmosférica e pela energia no ambiente, que por sua vez depende da topografia e latitude (PEREIRA e ALLEN, 1997). São também controlados pela demanda evaporativa da atmosfera, apontada pelos componentes meteorológicos: radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Quanto aos aspectos vegetativos, alguns outros fatores são levados em consideração, como área e arquitetura foliar, estádio de desenvolvimento e resistência do dossel (MEDEIROS, 2002).

Em casos onde não há deficiência de água para uso das plantas, esse processo foi definido originalmente como evapotranspiração potencial e, é representado pela máxima perda de água em uma superfície de solo bastante úmido, repleto por uma extensa área vegetativa e em fase de desenvolvimento ativo. Neste caso, como o solo está bem suprido de umidade, a demanda atmosférica não sofre comedimento pela falta de água no solo (THORNTHWAITE, 1948).

Anos depois, a ETP passou a ser introduzida como evapotranspiração de referência (ETo), segundo o boletim nº 24 - Irrigação e Drenagem “Necessidades hídricas das culturas” - a qual a *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)* definiu como sendo a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de gramínea verde de 8 a 15 cm de altura, uniforme, em crescimento ativo, sombreando completamente o solo e onde não exista limitação de água (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Para Allen et al. (2006), o conceito de ETo refere-se ao estudo da quantidade de evapotranspiração para a atmosfera, o qual ocorre de forma autônoma do tipo e fase de

desenvolvimento da cultura e das práticas de manejo que são aplicadas. Os únicos fatores capazes de afetar a ETo são os dados climáticos. Essa variável expressa o poder evaporativo da atmosfera em uma determinada localidade e época do ano, sem levar em consideração as características das culturas, e nem mesmo os fatores do solo.

A ETo pode ser determinada através de métodos diretos ou a partir de informações climáticas locais por meio de métodos de estimativa (CARVALHO et al., 2006; BARROS et al., 2009). Em situações onde não há equipamentos de medidas direta de evapotranspiração da cultura (ETc), por exemplo, os pesquisadores acabam utilizando estimativas baseadas na ETo e do coeficiente indicativo da necessidade de água da cultura (Kc) em cada um de seus estádios de desenvolvimento (DOORENBOS e PRUITT 1977).

Visto que a ETo corresponde ao índice climático da demanda evaporativa, o Kc varia, basicamente, de acordo com as características da cultura, traduzindo, em menor escala, a variação dos elementos climáticos. O índice da cultura é determinado empiricamente e varia com seu estádio de desenvolvimento, com o clima e práticas agronômicas que são empregadas (FREVERT, HILL e BRAATEN, 1983).

Sua caracterização está associada nos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração de referência: i) a altura da cultura que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; ii) a resistência de superfície relativa ao binômio solo-planta, que é afetado pela área foliar (determinada pelo número de estômatos), pela fração de cobertura do solo com vegetação, pela idade e condições das folhas, e pela umidade no perfil do solo; iii) e pelo albedo da superfície da cultura-solo, que é influenciado pela fração de cobertura do solo, pela vegetação e pelo teor de água na superfície do solo, que influencia o saldo de radiação disponível à superfície, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evapotranspiração (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A estimativa da ETo deve ser padrão e para isso recomenda a utilização método de Penman-Monteith, propondo um método de aproximação dos coeficientes de cultivo e novos valores de Kc para diferentes culturas, levando em consideração valores médios ao longo da vegetação (para o estádio inicial, intermediário e final) (ALLEN et al., 1998; OLIVEIRA, 2003).

Alguns valores de Kc são indicados para as culturas anuais e perenes nos manuais 24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977) e 56 (ALLEN et al., 1998) da FAO, e é utilizado com frequência no mundo quando os valores locais não estão disponíveis. No Brasil, Albuquerque (2000) desenvolveu valores de Kc de algumas culturas anuais para algumas regiões, ajudando as pesquisas na utilização desses dados para o controle de irrigação e cálculo do balanço hídrico.

Os valores de Kc podem ser afetados pelas condições distintas do ambiente, solo e práticas de manejo de irrigação, resultando em variações dele próprio para a mesma cultura (DJAMAN e IRMAK, 2013).

A evapotranspiração da cultura pode ocorrer em suas diferentes fases de desenvolvimento, e em condições ótimas de plantio. O solo deve estar fertilizado, livre de doenças e com quantidades adequadas de umidade - sem restrição hídrica (ALLEN et al., 1998). Conhecer a ETc é bastante relevante para o manejo de irrigação, visto que essa variável representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais, embora sua determinação esteja sujeita a muitos erros (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

A figura a seguir mostra os coeficientes da cultura, segundo o Boletim 33 da FAO (DOORENBOS e KASSAM, 1994) para a cultura do milho, que é extremamente relevante para o desenvolvimento desse trabalho.

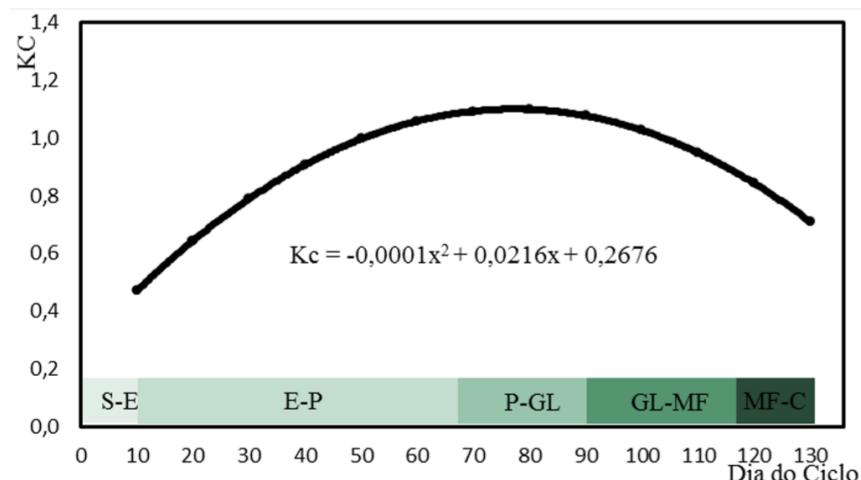


Figura 2 - Coeficiente da cultura (Kc) do milho ao longo do seu ciclo de desenvolvimento.

Fonte: Adaptado por Doorenbos e Kassam (1994).

Sendo S-E estabelecimento (semeadura); E-P vegetativo (emergência); P-GL floração (pendoamento); GL-MF desenvolvimento (grão leitoso); MF-C maturação (conclusão do ciclo).

A Evapotranspiração Real é aquela que ocorre quando a quantidade de água é utilizada. Ocorre em superfícies de gramínea, independentemente de sua área e condições de umidade do solo, podendo assumir valores como o potencial ou a de oásis. Logo, é aquela que ocorre em diferentes circunstâncias e, sem imposição de qualquer condição de contorno (ALLEN et al., 1998). Quando não se tem restrição hídrica no solo, a ETR será igual à ETP, porém nunca maior.

2.3 Projeções futuras de temperatura e precipitação

No intuito de fornecer informações sobre o desempenho dos Modelos de Circulação Global ou Geral (MCGs), um projeto chamado *Coupled Model Intercomparison* foi criado a fim de avaliar e comparar modelos de vários centros de pesquisas climáticas ao redor do mundo. Sua avaliação é exercida através da utilização de procedimentos comuns e de dados padronizados durante certo período ou projeções futuras (EYRING et al., 2015).

Os dados provenientes do CMIP são capazes de contribuir na elaboração dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), mediante as respostas dos modelos sobre a previsibilidade do sistema climático em diferentes escalas de tempo e espaço.

O IPCC é uma conferência designada em tratar de questões sobre as mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais. Foi desenvolvido pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988 e fornece tais relatórios sobre eventuais cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera e suas influências sobre as variáveis climáticas (IPCC, 2007).

Devido à estreita relação entre as produções agrícola e as variáveis climáticas, qualquer que seja sua alteração no clima poderá gerar impactos diretos no rendimento final da cultura. Regimes de precipitação e temperatura do ar já sofrem variações devido

ao incremento de gases de efeito estufa, aumentados nos últimos dez anos, contando, por exemplo, com a participação do dióxido de carbono. O Quinto Relatório Científico do IPCC (IPCC, 2014) revela um acréscimo de 2°C, para o cenário otimista (baixas emissões de GEE) a 4,8°C, para o cenário pessimista (altas emissões de GEE).

Supondo que essas emissões sejam mantidas nos níveis atuais, haverá grandes chances das temperaturas aumentarem ainda mais, chegando a 5,2°C, resultando também na variação dos padrões de chuva, além de eventos extremos como geadas, secas e inundações (IPCC, 2014; CASTILLO, 2016).

Estão previstas anomalias de temperatura média anual, com variação nas diferentes regiões do país, com maiores valores nas regiões Norte e Centro-Oeste (4,5°C), e com menores valores previstos na região Sul (2,9°C). As maiores anomalias de temperatura média do ar ocorrerão na primavera, exceto para a região Sul, onde será no inverno (de junho a agosto) (HAMADA et al., 2011; MELO, 2013).

O sul do Brasil será afetado também por anomalias positivas de precipitação em todas as estações do ano, projetando aumentos mais significativos na média mensal nos meses de outono e fim da primavera (CUADRA et al., 2017).

Estes resultados mostram, entre outros aspectos, que o aprimoramento dos MCGs é necessário para reduzir as acurárias e diminuir as incertezas. É importante ressaltar que as projeções indicadas pelos modelos climáticos viabilizam observações a nível regional, uma vez que as mudanças podem ocorrer de forma desigual até mesmo dentro do mesmo Estado (MELO, 2013).

Além de causar impactos no regime de precipitação, as alterações no clima tendem a influenciar na qualidade e quantidade de água para o uso (MARENGO, 2008). Este assunto foi discutido também por Carvalho e Stipp (2004), ao apresentar informações sobre o balanço hídrico para o estado do Paraná, que ao observar o comportamento das temperaturas médias do ar e da distribuição das precipitações em um determinado período de um ano, comprovaram que não houveram períodos de deficiência hídrica no Estado. No entanto, uma variabilidade climática poderia ocasionar modificações nos valores de temperatura e precipitação e, consequentemente, provocar alterações no cenário atual de excesso hídrico para déficit hídrico.

Devido a relevância sobre o conhecimento da disponibilidade de água futura, principalmente para o setor agrário, inúmeras pesquisas foram realizadas no intuito de colaborar na criação de políticas ambientais e do gerenciamento do seu uso. Liberato e Brito (2010) buscaram avaliar os impactos de cenários futuros das mudanças climáticas sobre o balanço hídrico na Amazônia Ocidental. Seus resultados indicaram que o incremento da temperatura esperado pelo IPCC foi capaz de elevar a evapotranspiração real e gerar uma diminuição da umidade do solo.

Coutinho e Moraes (2012), com o objetivo de analisar as prováveis mudanças no regime hídrico de São José de Mipibu – RN em decorrência do aquecimento global, verificaram que o balanço hídrico experimentará algumas modificações, uma vez que o aumento na temperatura elevará também a evaporação.

Santos e Sentelhas (2012) atestaram que para os diferentes cenários projetados, houve um aumento na evapotranspiração e no déficit hídrico para todas as regiões estudadas no Estado de São Paulo, independente da adição ou redução na precipitação.

2.4 A cultura do Milho

A exploração do milho vem ganhando destaque no cenário da alimentação humana e animal. O grão também é utilizado para fabricação dos mais diversos produtos como medicamentos e do bioetanol (ŽALUD et al., 2017). Devido a sua versatilidade dentro do mercado como forma de matéria-prima, há também uma crescente pressão sobre a produção, o que resulta, portanto, na disputa pela água disponível.

Devido aos avanços tecnológicos e desenvolvimento de cultivares transgênicos e híbridos de alta qualidade, o Brasil ocupa a terceira posição como produtor mundial de milho, e perde apenas para os Estados Unidos e China (Figura 3). Além disso, a consolidação da safrinha, definida como o milho de sequeiro na região Sul do país, cultivado extemporaneamente, de janeiro a abril, favorece a produção nacional, permitindo sua elevação como potência na colheita e comercialização desse cereal (CARVALHO et al., 2011).

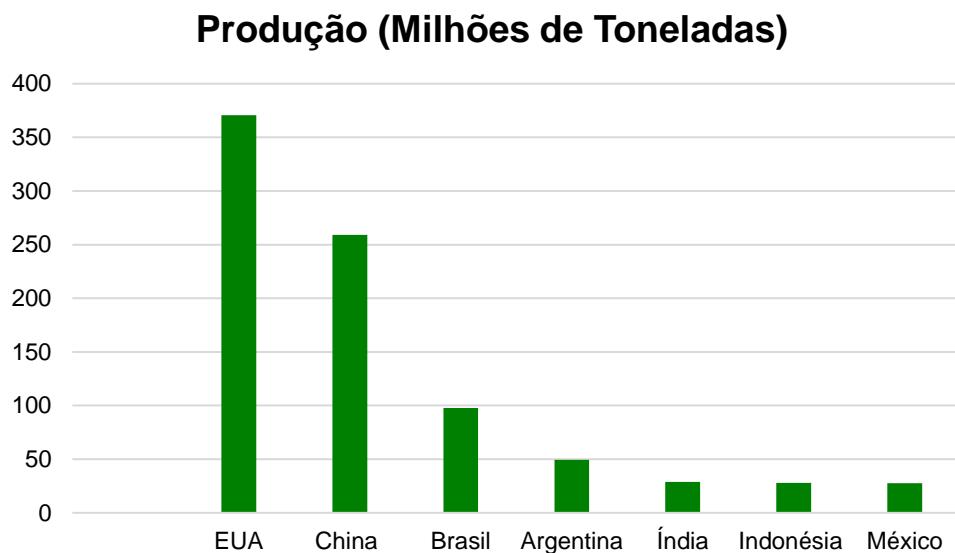


Figura 3 - Principais produtores mundiais de milho.

Fonte: FAOSTAT (2019).

De acordo com a CONAB (2019), o Brasil foi responsável por 90,4 milhões de toneladas na safra 2018/2019, ocupando uma área de mais de 16 milhões de hectares para o cultivo da cultura.

Dentre as produções nacionais deste insumo, o Rio Grande do Sul é o sexto maior produtor no Brasil, sendo superado pelos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás, Paraná e Mato Grosso. A produtividade pode sofrer oscilações entre as diferentes regiões do país, provenientes da heterogeneidade climática às quais a cultura é submetida (AGRIANUAL, 2009). Vale ressaltar que o milho representa uma parcela importante da produção agrícola do Estado, sendo cultivada na maior parte na modalidade de sequeiro (COLLISCHONN e LOUZADA, 2011).

O ciclo da cultura compreende cinco etapas de desenvolvimento: (I) estabelecimento: ocorre entre a semeadura e o aparecimento da plântula, em função da temperatura e umidade do solo; (II) vegetativo: iniciado a partir da emissão da segunda folha, até o início do florescimento, sua extensão varia em função do genótipo e de fatores climáticos, caracterizando e classificando diferentes genótipos entre ciclos superprecoces (120 dias), precoces (120-130 dias) e normais (130-140 dias); (III) floração: ocorre entre o início da polinização e o início da frutificação; (IV)

desenvolvimento: compreendida entre a fecundação e o enchimento completo dos grãos, cuja duração varia de 40 a 60 dias; (V) maturidade: período compreendido entre o final da frutificação e o aparecimento da camada negra, sendo este relativamente curto e indicativo do final do ciclo de vida da planta (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

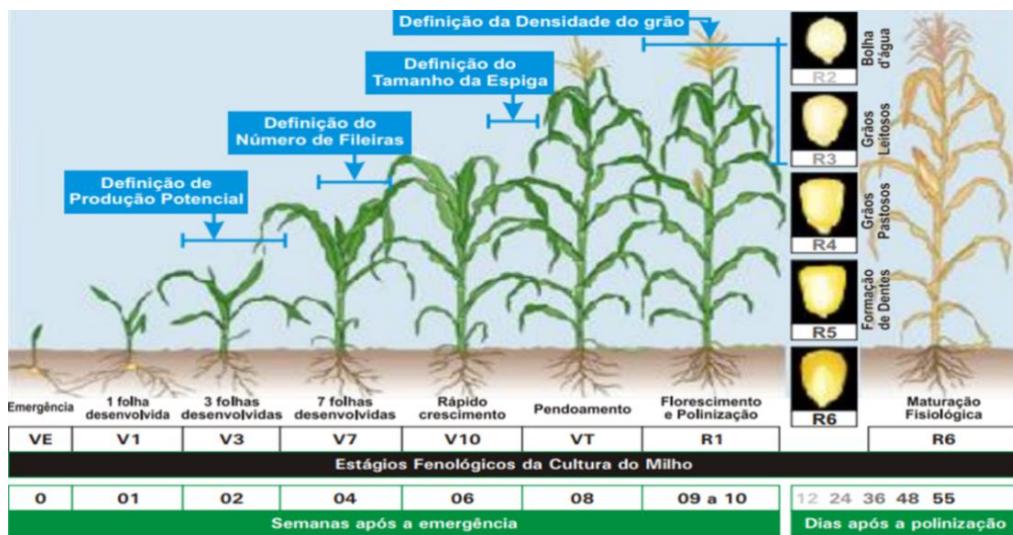


Figura 4 - Estágio fenológico do milho.

Fonte: (Ritchie et al., 1993).

O milho por ser considerada uma cultura de ciclo vegetativo variado, pode ser explorado nas regiões tropicais e subtropicais, até mesmo em locais semiáridos em condições adequadas de água e nutrientes no solo (FIGUEREDO JR., 2004). No geral, seu desenvolvimento é demarcado basicamente pela quantidade de água disponível, temperatura, radiação solar e pelo fotoperíodo (CRUZ et al., 2008).

Os solos mais recomendados para a cultura do milho são aqueles que apresentam textura média, teores de argila em torno de 30-35% e com boa estrutura, como os latossolos. Eles são capazes de realizar uma drenagem adequada, por demonstrarem boa capacidade de retenção de água e nutrientes disponíveis às plantas. Já os solos arenosos (teor de argila inferior a 15%), por apresentarem baixa retenção de umidade e nutrientes, são prejudiciais devidas às condições de permeabilidade e a livre penetração do sistema radicular, por isso nesse caso, deve ser evitada (MATOS et al., 2007).

Basicamente, a faixa de temperatura requerida para que haja o desenvolvimento das plantas de milho encontra-se entre 10 e 30 °C (KUNZ, 2005). O solo entre 25 e 30 °C é o ideal para o processo germinativo das sementes e emergência das plântulas, enquanto valores inferiores a 10°C e superiores a 42°C acabam sendo prejudiciais durante o período inicial do crescimento da planta, em razão da sensibilidade durante esse processo. O florescimento e a maturação podem ser acelerados em temperaturas médias diárias superiores a 26 °C, da mesma forma que podem sofrer um retardamento em ocasiões de temperaturas inferiores a 15,5 °C (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000). Mesmo que haja uma relação complexa entre a temperatura e o desempenho da cultura, a condição ótima para planta pode variar nos seus diferentes estádios de crescimento.

O melhor aproveitamento da radiação solar se dá quando o pré-florescimento e o enchimento de grãos da cultura coincidem com o período de mais alta radiação solar, que ocorre de meados de novembro a meados de fevereiro. Isso é possível quando se cultiva milho em outubro com irrigação ou em regiões com adequadas disponibilidades e distribuição hídrica na estação de crescimento (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

O consumo diário de água durante o ciclo da cultura do milho varia de 2 a 7 mm, dependendo do estádio e da demanda atmosférica. A maior exigência ocorre durante o pendoamento e espigamento, cerca de 7 mm/dia, que é quando a planta apresenta uma maior área foliar (BERGAMASCHI et al., 2001). O milho consome em média 450 a 600 mm de água durante todo o seu ciclo, onde se exige um mínimo de 350 mm, para que a produção não seja significativamente afetada (FANCELLI, 2001). Esse grão pode ser lavrado em regiões com precipitação média anual entre 250 a 5000 mm, tendo como complemento de seu ciclo fenológico a necessidade hídrica de aproximadamente 600 mm (SANS e SANTANA, 2001).

No entanto, o excesso de água proveniente do grande volume de chuvas pode ser nocivo para a cultura do milho. Neste caso, pode haver hipóxia - situação a qual ocorre baixa concentração de oxigênio, elemento imprescindível no processo de respiração nas raízes para absorção de água e nutrientes. Essa superabundância pode gerar também consequências danosas para o plantio, principalmente na fase do pendoamento, pois, pode haver redução da polinização e fecundação da boneca. Além disso, em período de maturação e colheita, há queda na produtividade da cultura (GALON et al., 2011).

Seu rendimento é consequência do potencial genético de suas sementes, das condições edafoclimáticas locais e do manejo da cultura. Essas são ferramentas essências para resguardar os produtores contra futuros prejuízos econômicos quando tais técnicas não são bem aplicadas (CRUZ et al., 2008).

2.4.1 A cultura do Milho no Rio Grande do Sul

A cultura do milho para o Rio Grande do Sul denota uma expressiva participação socioeconômica em razão dos cultivos de primavera-verão, somando as áreas de produção do grão e silagem, tendo sua importância como matéria-prima presente nas mais variadas cadeias produtivas.

Moraes (2009) lista que entre os diversos benefícios, a planta de milho pode ser aproveitada em quase sua totalidade. Isso porque, após a comercialização das espigas, seus resíduos podem ser incorporados junto à cobertura do solo para plantio direto, ou ainda, ser triturado para compor a alimentação animal.

Mesmo que o cultivo desse grão possa ser explorado todo ano utilizando-se da irrigação, a melhor época considerada para semeadura do milho no Rio Grande do Sul está entre os meses de setembro e outubro (PEREIRA, ANGELOCCI e SENTELHAS, 2002).

Além disso, o escalonamento da produção e o emprego de técnicas agrícolas vêm permitindo um fluxo constante do produto para a comercialização. Estima-se que a área de milho plantada no Estado em 2018 seja de aproximadamente 740 mil hectares, com uma perspectiva de aumento em até 5,53% em relação à safra anterior (CONAB, 2018).

A região Noroeste do RS apresenta um microclima peculiar, permitindo que a semeadura do milho ainda seja realizada durante o mês de julho. No entanto, objetivando-se uma produção com um maior potencial produtivo, a melhor época de plantio vai da segunda quinzena de setembro até meados de outubro, quando as condições climáticas são mais favoráveis para um desenvolvimento ótimo das plantas, devido à maior incidência de luz solar, com dias mais longos e com um regime térmico necessário para atender suas exigências (EMBRAPA, 2019).

Os plantios tardios que são efetuados ao final do mês de outubro apresentam melhores resultados quanto ao rendimento, pois nessa fase os genótipos do milho alcançam as maiores produtividades. No entanto, esse é o intervalo de maior risco para a cultura, tendo em vista que o florescimento das plantas pode ocorrer coincidentemente com as estiagens de verão. Assim sendo, essa prática deve ser mais bem executada em regiões mais frias do Estado, onde as colheitas de inverno acontecem mais tarde e a temperatura durante a noite permanece abaixo dos 15°C durante a primavera (NASCIMENTO et al., 2015).

O Rio Grande do Sul por apresentar uma precipitação média mensal na ordem de 100 a 150 mm, as necessidades da cultura conseguiriam ser supridas pelas precipitações pluviais. Apesar disso, a quantidade média de precipitação não contribui às exigências da cultura em épocas de maior consumo de água, devido a perdas por escoamento superficial, evaporação e drenagem, aliadas à baixa capacidade de retenção de água da maioria dos solos e à distribuição espacial irregular da precipitação. Além disso, há também um consumo de água não uniforme durante todo o ciclo da planta (EMYGDIO et al., 2013).

Devido ao seu posicionamento geográfico, o Estado sofre com os principais sistemas atmosféricos, tais como as frentes frias e os sistemas convectivos de mesoescala (SCM), responsáveis por eventuais desastres naturais. Muitas regiões são acometidas por acontecimentos climáticos relacionados com a interação oceano-atmosfera, como El Niño e La Niña, que representam o aquecimento e resfriamento das águas do oceano pacífico equatorial, respectivamente. Esses fenômenos climáticos acabam gerando inundações e secas severas na região Sul do Brasil (NEDEL et al., 2010).

O Zoneamento Agrícola do Ministério da Agricultura foi criado para minimizar ao máximo os riscos de insucessos nas safras devido às condições climáticas, ainda que tal procedimento indique uma ampla janela de semeadura, assegurando bons resultados durante o plantio do milho ao longo de todo ano, as operações são concentradas nos meses de setembro e outubro (ASSAD et al., 2008).

3 Metodologia

3.1 Determinação dos municípios produtores de milho

Com o objetivo de selecionar as localidades para o estudo do balanço hídrico climatológico, foram utilizadas informações de produção total, provenientes de todas as regiões produtoras de milho no RS, no período de 1981 a 2018, com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponíveis na plataforma SIDRA (Sistema IBGE de Recuperação Automática).

Para tal, uma análise temporal da produção total foi aplicada para 497 municípios do Estado, para então, serem escolhidos os que ocupassem regiões distintas recomendadas para a semeadura do milho no Rio Grande do Sul, segundo a classificação de Sutili e Matzenauer (1980, apud BRESOLIN, 1995, p.58). Além da localização, considerou-se também, que estes estivessem bem distribuídas dentro do Estado e, que dispusessem dados da Normal Climatológica do INMET de 1981 a 2010.

Avaliou-se a relação entre o rendimento médio e a produção da cultura do milho para todo o Estado e municípios selecionados, no período 1981-2018, no intuito de identificar os anos de quebra de safra.

3.2 Cálculo do balanço hídrico climatológico

Para o cálculo do BHC, empregou-se o método de Thornthwaite e Mather (1955), que considera dados mensais de temperatura média do ar (°C) e precipitação total (mm). Para tal, utilizou-se dados da Normal Climatológica do INMET de 1981 a 2010 para as localidades selecionadas no item anterior.

O BHC facilita o monitoramento da variação do armazenamento de água no solo, fornecendo estimativas da evapotranspiração real, da deficiência hídrica, do excedente hídrico e do armazenamento de água no solo para cada mês do ano, mediante a precipitação, temperatura, evapotranspiração potencial, e do nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAMARGO, 1971; PEREIRA e ALLEN, 1997).

Para a estimativa da ETP aplicou-se o método empírico proposto por Thornthwaite e Mather (1948), necessitando apenas de dados de temperatura média dos períodos e da latitude local de cada município, para devidos ajustes de cálculo (DOURADO; LIER, 1991), exposto conforme equações 1 a 4:

$$ETP_P = 16 \left(\left(10 * \frac{T_n}{I} \right) \right)^\alpha, \text{ para } 0 \leq T_n \leq 26,5^\circ\text{C} \quad (1)$$

Sendo T_n a temperatura média do mês, em $^\circ\text{C}$ e I um índice que expressa o nível de calor disponível na região. No caso de $T_n \geq 26,5^\circ\text{C}$ a ETP_P é dada por uma adaptação de WILLMOTT et al. (1985):

$$ETP_P = -415,82 + 32,24 Tn - 0,43 Tn^2; \text{ para } T_n \geq 26,5^\circ\text{C} \quad (2)$$

O valor de I depende do padrão anual da temperatura (preferencialmente com valores normais), integrando o efeito térmico de cada mês, sendo calculado pela fórmula:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 T_n)^{1,514} \quad (3)$$

Sendo T_n a temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$) para o n -ésimo mês. O índice n representa os meses do ano (janeiro a dezembro).

Para identificar o valor de α , foi utilizada a seguinte equação:

$$\alpha = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 10^{-2} I + 0,49239 \quad (4)$$

Os coeficientes α e I , calculados com as normais climatológicas são característicos da região e tornam-se constantes, sendo independentes do ano de estimativa de ETP_P .

Como o valor de ETP_P calculado representa o total mensal de evapotranspiração que ocorreria naquelas condições térmicas para um mês de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo, tal variável deverá passar por um ajuste. O fator de

correção mensal foi obtido pela metodologia de Villela e Matos (1975) e é em função do número real de dias, do fotoperíodo do mês e da latitude local. Para determinar a ETP, basta multiplicar a ETP_p pelos fatores de correção correspondente de cada mês. Neste caso, foram selecionados apenas os valores equivalentes às latitudes de interesse, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Indicação dos fatores de correção de evapotranspiração em função da latitude - dado para o Brasil.

Latit.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez
28°	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29°	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,86	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30°	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31°	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32°	1,21	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23

Fonte: Villela e Matos, 1975.

Considerou-se CAD de 100 mm, uma vez que Camargo (1971) e Tubelis e Nascimento (1983) sugerem que este valor pode ser considerado para fins de classificação climática em culturas anuais e para as plantas agrícolas em geral. Como o balanço hídrico, segundo Thornthwaite e Mather (1955), é mais utilizado para fins de caracterização da disponibilidade hídrica de uma região em bases climatológicas e comparativas, a seleção da CAD é feita mais em função do tipo de cultura ao qual se quer aplicá-lo do que do tipo de solo (PEREIRA, ANGELOCCI e SENTELHAS, 2007).

Utilizou-se uma planilha EXCEL desenvolvida por Rolim et al. (1998) para o cálculo dos BHC pelo método Thornthwaite e Mather (1955) conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Planilha utilizada para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Mês	T (°C)	ETP_p .	Correção	ETP mm	P mm	P-ETP mm	Neg Acum. mm	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm

A planilha foi preenchida seguindo o roteiro abaixo:

- A coluna 1 foi preenchida com os meses de janeiro a dezembro;
- A coluna 2 foi preenchida com dados de temperatura do ar;
- A coluna 3 foi preenchida com dados de evapotranspiração potencial (não ajustada);
- A coluna 4 foi preenchida com os fatores de correção de evapotranspiração em função da latitude;
- A coluna 5 foi preenchida com dados de evapotranspiração potencial (ajustada);
- A coluna 6 foi preenchida com dados de precipitação;
- A coluna 7 foi representada pela disponibilidade hídrica, dada diferença entre a P e a ETP. A subtração entre a precipitação e a evapotranspiração potencial ($P - ETP$) gerou resultados positivos e negativos. Isso serviu como base na determinação do negativo acumulado (NEG ACUM) e no cálculo do armazenamento disponível (ARM).
- A coluna 8 foi representada pelo negativo acumulado, do termo $P - ETP$.

Quando observado um valor negativo de ($P - ETP$), o valor da NEG ACUM foi igual ao do negativo de ($P - ETP$). O valor do negativo acumulado do mês seguinte foi igual à soma do valor negativo de ($P - ETP$) do mês recorrente e o valor de NEG ACUM do mês anterior – seguindo esse processo até o último mês que apresentasse valor negativo de ($P - ETP$).

- A coluna 9 foi representada pelo armazenamento de água no solo, e foram preenchidos concomitantemente ao procedimento dos negativos acumulados. Quando os valores de ($P - ETP$) deixarem de ser negativos e passarem a ser positivos, os seguintes passos foram seguidos:

Se $(P-ETP) < 0$ (período seco) \Rightarrow calculou-se o NEG ACUM, ou seja, os valores de ($P-ETP$) negativos, e posteriormente o valor do ARM, (Equação 5 e 6):

$$NEG\ ACUM = NEG\ ACUM\ anterior + (P - ETP) \quad (5)$$

$$ARM = CAD * \exp(-|NEG\ ACUM/CAD|) \quad (6)$$

Se $(P - ETP) \geq 0$ (período úmido) \Rightarrow calculou-se primeiramente o ARM e, posteriormente o NEG ACUM (equação 7 e 8):

$$ARM = ARM\ anterior + (P - ETP) \quad (7)$$

$$NEG\ ACUM = CAD * \ln(ARM/CAD) \quad (8)$$

O valor do ARM do mês em questão não deve ser maior que a CAD. Quando isso acontece, o ARM do mês necessita ser igual à própria CAD, indicando a presença de excesso de água em tal mês.

- A coluna 10 foi representada pelo armazenamento de água no solo, indicando o armazenamento do mês em questão menos o armazenamento do mês anterior.
- A coluna 11 foi representada pela evapotranspiração real mensal. Seu valor igualou ao da evapotranspiração potencial quando o armazenamento foi total (igual à CAD determinada) e quando $(P - ETP)$ foi positivo, mesmo que o ARM não tivesse sido total. Quando $(P - ETP)$ mostrou-se negativo, a ETR foi expressa pela soma de P e da ALT, sem levar em consideração o sinal negativo da ALT.
- A coluna 12 foi representada pela deficiência de água no solo, calculada pela diferença entre ETP e ETR.
- A coluna 13 foi representada pelo excesso de água no solo, quando $(P - ETP) > 0$ e o ARM igual a 100. Neste caso, o excesso foi sempre igual a $[(P - ETP) - (ALT)]$.

Para o cálculo do BHC aplicado a cultura do milho, foi necessário estimar a ETc (Equação 9) utilizando-se o Kc disponíveis em Doorenboms e Kassam (1994) apresentados na Tabela 3.

$$ETc = Kc * ETP \quad (9)$$

Tabela 3 - Coeficiente da cultura e duração dos estádios fenológicos da cultura utilizada no estudo.

Fases fenológicas do milho	Kc	Duração (dias)
Estabelecimento	0,35	25
Vegetativo	0,83	40
Floração	1,12	20
Desenvolvimento	0,88	45
Maturação	0,56	15
Total		145

Fonte: Adaptado por Doorenbos e Kassam (1994).

Nas condições brasileiras, como a cultura do milho apresenta ciclo variado entre 110 a 180 dias de acordo com a classificação dos cultivares em superprecoce, precoce ou normal, período compreendido entre a emergência e o florescimento (FORNASIERI, 2007), foi considerado uma cultura com duração de 145 dias, iniciando a semeadura na segunda quinzena de setembro.

A partir daí, foi adotada uma nova planilha EXCEL, para o cálculo dos BHC aplicado a cultura do milho, conforme mostrado na Tabela 4. O roteiro de execução desta planilha seguiu os mesmos passos da Tabela 2.

Tabela 4 - Planilha utilizada para o cálculo do Balanço Hídrico Climatológico aplicado a cultura do milho.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Mês	T (°C)	ETP _{p.}	Correção	ETc mm	P mm	P-ETc mm	Neg Acum. mm	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm

3.3 Determinação do modelo CMIP5 de melhor desempenho

Essa etapa constituiu-se na escolha de um dos modelos do CMIP5 (versão 5) (Tabela 5), com melhor desempenho.

Tabela 5 - Modelos Globais Climáticos utilizados.

Instituição	Abreviação da Instituição	Nome Reanálise/Modelo	Referência
Met Office Hadley Centre	MOHC	HadGEM-2-ES	Collins et al. (2011)
Center for Weather Forecast and Climate Studies	CPTEC/INPE	BESM-OA2-5	Nobre et al. (2013)
NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	NOAA GFDL	GFDL-CM3	Griffies et al. (2011)

O CMIP5 avalia a saída de modelos acoplados de circulação geral atmosfera-oceano, provenientes de diferentes centros de pesquisas. O mesmo promove um conjunto padrão de simulações para avaliar o quão realistas são os modelos na simulação do passado recente, fornecendo projeções de mudanças climáticas futuras em duas escalas de tempo: curto prazo (até cerca de 2035) e longo prazo (até 2100 e além) (TAYLOR, STOUFFER e MEEHL, 2012).

Esses modelos são descritos conforme a Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 - Características específicas de cada modelo Global Climático.

Modelos
HadGEM-2-ES
Modelo britânico que representa o sistema terrestre acoplado, de resolução atmosférica igual a 1.875 graus de longitude, 1.25 graus de latitude e 38 níveis verticais. Inclui componentes da atmosfera, de oceano e geleiras.
BESM-OA2-5
Modelo brasileiro que retrata as componentes de superfície continental, oceano, atmosfera e química globais, com o principal objetivo de gerar cenários de mudanças climáticas com perspectiva brasileira. Apresenta resolução atmosférica de 1.875 graus de longitude e latitude, e 28 níveis verticais.
GFDL-CM3
Modelo americano capaz de representar o comportamento atmosférico, oceânico e climático. São utilizados como ferramenta para identificar as causas das mudanças climáticas observadas, levando em consideração os fatores naturais ou antropogênicos. Possui uma resolução atmosférica de aproximadamente 2.5 graus de longitude, 2.0 graus de latitude e 32 níveis verticais.

A fim de definir o modelo do CMIP5 que pudesse melhor representar o BHC futuro, foram utilizadas análises estatísticas entre dados observados e estimados de temperatura e precipitação, no período de 1981 a 2010.

Essa avaliação foi realizada por meio do erro médio absoluto (EMA), que fornece um valor típico para os erros de previsão, em outras palavras, descreve o erro médio do modelo avaliado dado por:

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |y_k - o_k| \quad (10)$$

Sendo N o tamanho da amostra ou pares de previsão e observação, y_k é a previsão e o_k é a observação.

Além do EMA, as projeções dos modelos climáticos também foram avaliadas com a raiz do erro médio quadrático (REMQ), dado por:

$$\text{REMQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_k - o_k)^2} \quad (11)$$

Os símbolos em REMQ são os mesmos usados em EMA. Ambos EMA e REMQ são medidas orientadas negativamente. Isso significa que previsões perfeitamente concordantes com as observações geram $\text{EMA} = \text{REMQ} = 0$, enquanto que quanto mais discrepantes forem as previsões das observações, maiores seus valores.

A REMQ fornece uma ideia da magnitude típica para os erros de previsão (WILKS, 2006), sendo particularmente interessante, pois penaliza os maiores erros, dessa forma, seu uso é recomendado quando não se desejam grandes erros entre previsões e observações.

Os dados dos modelos HadGEM-2-ES e GFDL-CM3 foram obtidos através do programa Copernicus, enquanto que as informações do modelo BESM-OA2-5 foram extraídos do portal CPTEC/INPE.

3.4 Cálculo do balanço hídrico futuro

Para as projeções, calculou-se o BHC com base nas normais climatológicas do período de 2041 a 2070 (denominado de PC1 - projeção climática 1) e para o período de 2071 a 2100 (denominado de PC2 - projeção climática 2). Os dados foram obtidos do modelo de melhor desempenho e extraídos de sua respectiva plataforma, conforme indicado no passo anterior.

Para isso utilizou-se de um conjunto de dados que compõem o CMIP5 para realizar as simulações históricas e dos cenários futuros por meio dos modelos climáticos - o RCP (*Representative Concentration Pathway*) - 4.5 (cenário otimista) e 8.5 (cenário pessimista) – do *World Climate Research Program's* (TAYLOR et al., 2012).

4 Resultados

4.1 Municípios produtores de milho

Dentre os produtores de milho no Rio Grande do Sul no período de 1981-2018, foram selecionados cinco municípios - Cruz Alta, Iraí, Campo Bom, Cambará do Sul e Pelotas – situados em regiões distintas do Estado, segundo a classificação de Sutili e Matzenauer (1980, apud BRESOLIN, 1995, p.58) (Figura 5).

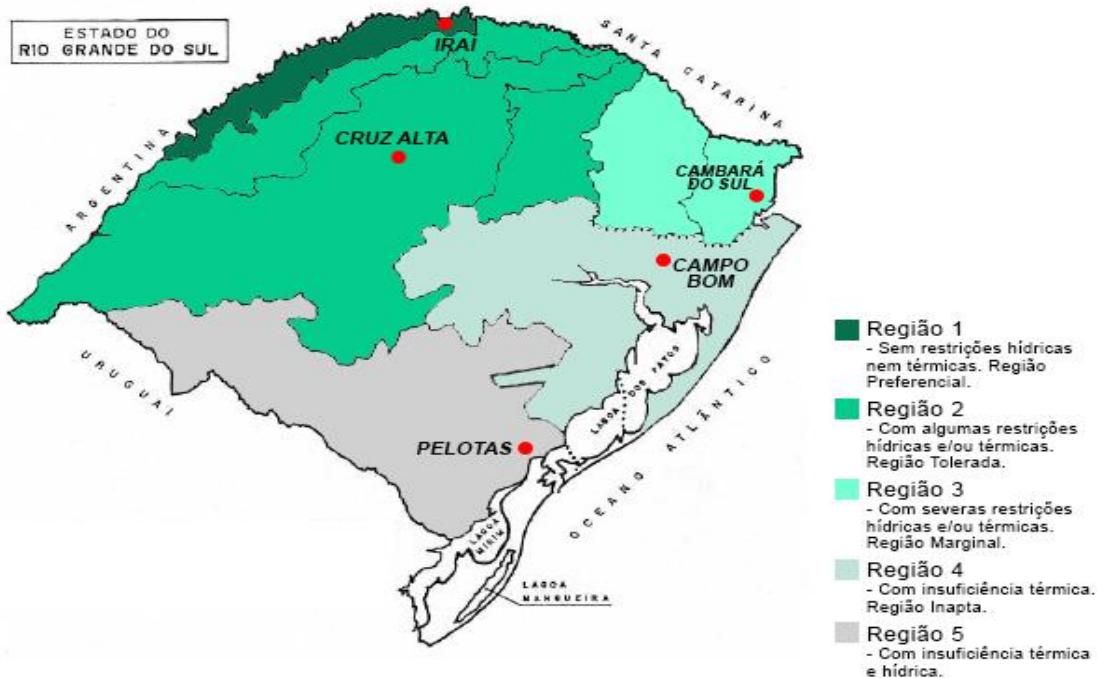


Figura 5 - Regiões para recomendações do cultivo do milho.

Fonte: Sutili e Matzenauer (1980).

Pela avaliação entre a quantidade produzida e o rendimento médio da produção para o Rio Grande do Sul, é possível verificar uma tendência de crescimento linear ao longo dos 37 anos de estudo (Figura 6). Nos anos de 2005, 2009 e 2012 existem períodos com acentuada redução de produção e produtividade para a cultura do milho.

Essa queda pode estar associada aos períodos de estiagem que acometeram o Estado, devido à atuação intensa dos ENOS. A estiagem é a principal responsável pelas

perdas agrícolas, pois tendem a coincidir com o período de cultivo das principais culturas de verão no RS, como por exemplo, o milho (FOCCHEZATTO e GRANDO, 2009).

No ano de 2005, o El Niño Modoki intensificou as secas na região Sul do Brasil, o que possivelmente contribuiu para o decréscimo de até 45,3% no rendimento do milho. Neste ano foi apresentada uma queda na produtividade de aproximadamente 1.278 kg ha^{-1} em relação ao ano anterior. Ao passo que, essas reduções se mantiveram em 16,7% e 40,3% para os anos de maior atuação de La Niña, em 2009 e 2012, respectivamente (BRAZ, 2015).

A cultura do milho, em relação a produtividade de grãos, apresenta diferentes resultados devida interação de diversos fatores que interagem entre si, tais como o solo, o clima e decisões relacionadas ao manejo da cultura (BERGAMASCHI e MATZENAUER, 2014; ANDRÉA, 2016).

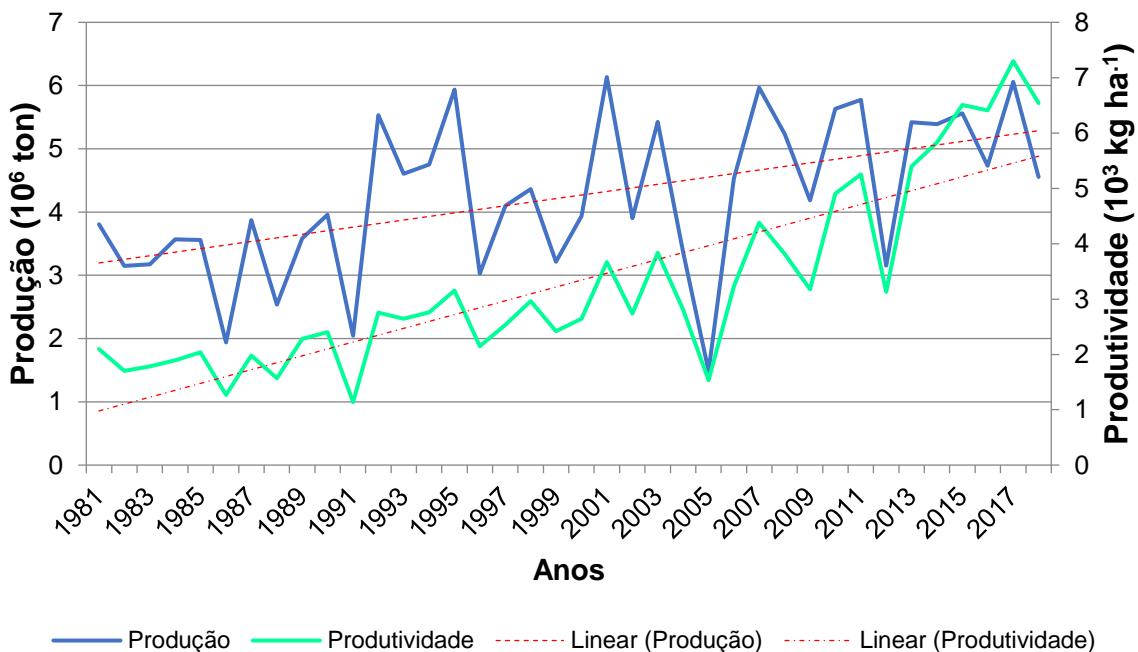


Figura 6 - Distribuição da produção (10^6 ton) (linha sólida azul) e do rendimento médio de milho (10^3 kg ha^{-1}) (linha sólida verde) no RS para o período de 1981-2018.

A distribuição da produção (Figura 7A) e do rendimento médio do milho (Figura 7B) para os municípios de Cruz Alta, Iraí, Campo Bom, Cambará do Sul e Pelotas,

apresentaram um padrão de crescimento distinto entre si no período de 1981-2018. A média de produção para todo o Rio Grande do Sul foi de 42.415,26 toneladas, enquanto que a produtividade foi de 3.279,5 kg ha⁻¹.

Em relação à média do Estado, Cruz Alta exibiu os maiores valores de produção e produtividade. Para essa localidade, a quantidade produzida teve os picos mais significativos, principalmente nos anos de 1995 e 2017, com quedas acentuadas nos anos subsequentes às máximas (Figura 7A). O rendimento médio de produção passou a ser expressivo a partir de 2001, com tendência de crescimento progressivo até o ano de 2018 (Figura 7B).

Sendo a segunda maior produtora dentre os municípios analisadas, Pelotas assumiu o posto com menor rendimento (produtividade) deste grão. Durante os anos de 2010 a 2018 a produção foi acima da média do RS, quando houve também, nesse período, os maiores valores de produtividade (Figuras 7A e 7B).

Campo Bom e Cambará do Sul que indicaram o menor montante produzido de milho (Figura 7A), puderam garantir aproximadamente 80% de toda a produtividade, com valores acima da média do Estado para os respectivas municípios e anos de 2007 a 2008 (Figura 7B). Enquanto isso, Iraí que tinha uma produção intermediária (Figura 7A), se evidenciou com a segunda maior produtividade, com valores acima da média entre 2010 e 2017 (Figura 7B).

Com exceção de Pelotas, cuja curva de produtividade tendeu a acompanhar a de produção (Figura 7A e 7B), os demais municípios revelam uma disparidade entre essas variáveis. Isso pode ocorrer, pois o aumento da produtividade pode estar relacionado às mudanças na estrutura de produção. Neste contexto, em situações onde a cultura experimentam baixa fertilidade do solo, déficit ou excesso hídrico e dificuldade ao acesso a insumos agrícolas, por exemplo, faz com que não seja de se esperar que ambas as curvas comportem-se de maneira igualmente crescente e/ou decrescente (CRUZ et al., 2008).

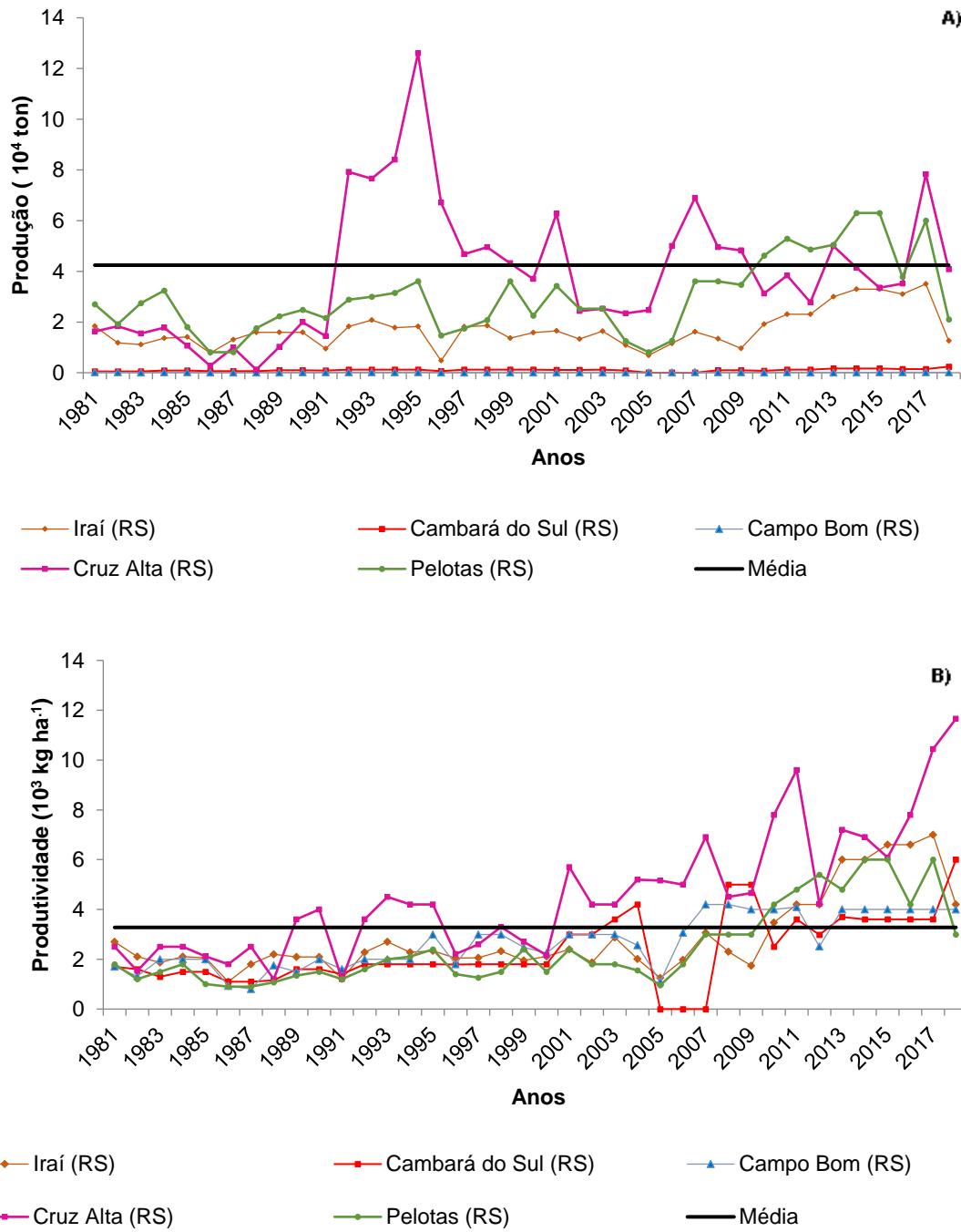


Figura 7 - Distribuição da produção (10^4 ton) (A) e do rendimento médio (10^3 kg ha $^{-1}$) (B) do milho para os municípios de Cruz Alta (linha rosa), Iraí (linha laranja), Campo Bom (linha azul), Cambará do Sul (linha vermelha) e Pelotas (linha verde) , no período de 1981-2018, e média do Estado (linha preta).

4.2 Balanço hídrico climatológico atual e da cultura

Os balanços hídricos climatológicos e o comportamento de temperatura (°C), ao longo do período de estudo e nos cinco municípios, são exibidos nas Figuras 8, 9, e 10. No cenário atual, Cruz Alta (Figura 8A), Iraí (Figura 8D) e Cambará do Sul (Figura 9D) apresentaram uma quantidade de chuva acima da taxa evaporativa, exibindo assim um excedente hídrico. Campo Bom (Figura 9B) e Pelotas (Figura 10B) indicaram déficit hídrico, cerca de 2 mm (dezembro) e 4 mm (dezembro e janeiro), respectivamente. Para ambos os municípios o déficit hídrico ocorreu nas fases mais críticas da cultura (florescimento e enchimento dos grãos), levando em consideração os plantios realizados entre os meses de setembro e outubro, podendo afetar substancialmente a produtividade de grãos nessas localidades.

Em relação à variabilidade anual, foi possível perceber que Cruz Alta (Figura 8A) e Iraí (Figura 8D), apresentam os maiores acumulados totais de precipitação, com máxima incidência nos meses de primavera e verão. Muitas vezes é decorrente de sistemas frontais estacionários que produzem chuvas convectivas e sistemas convectivos de mesoescala. Tais processos resultam em ocorrência de temporais com chuvas fortes em curto período de tempo (CLIMANÁLISE, 2001).

Os meses das estações de outono e inverno apresentaram-se como sendo os mais chuvosos para Campo Bom (Figura 9A), possivelmente pelo fato do município estar próximo ao litoral e por conta do predomínio da formação de ciclones extratropicais nesse período, gerando nebulosidade e, em alguns casos, resultando no desenvolvimento de sistemas frontais e linhas de instabilidade. Tal perfil tende a potencializar a chuva, tendo então, os meses de janeiro e dezembro uma taxa evaporativa superior a quantidade de água precipitável (ANDRADE, 2005; BRITTO, BARLETTA e MENDOÇA, 2006).

Entretanto, os meses de primavera e verão foram os mais representativos para o volume de chuva em Cambará do Sul (Figura 9D). Neste período, há um maior aquecimento da superfície, gerando assim, um aporte de umidade dentro do continente, que em associação com o sistema de monção da América do Sul, propicia uma incidência de sistemas convectivos de mesoescala. Já na primavera, há um máximo de convecção

com intensa precipitação, sendo importante na distribuição de chuvas no norte do estado (RASERA e CAMPOS, 2013).

Para Pelotas, com relação ao total de chuva acumulada, pôde-se comprovar que os resultados de precipitação ficaram abaixo dos 1500 mm do total que é esperado para a metade sul do Estado (Figura 10A) (BRITO, BARLETTA e MENDOÇA, 2008).

Mesmo que o Sul do Brasil não apresente uma sazonalidade considerável em relação ao comportamento de chuvas, há um contraste no regime pluviométrico devido às características distintas do relevo e da transição entre os trópicos e as latitudes médias (RAO; HADA, 1990; GRIMM et al., 2000).

Como a cultura do milho se desenvolve bem em regiões cujos limites de temperaturas médias anuais do ar se encontram entre 10 e 30°C, e de precipitação média anual entre 250 e 5000 mm, os municípios estudados, quanto a esses parâmetros, estiveram dentro das condições para produção (KUNZ, 2005; SANS e SANTANA, 2001).

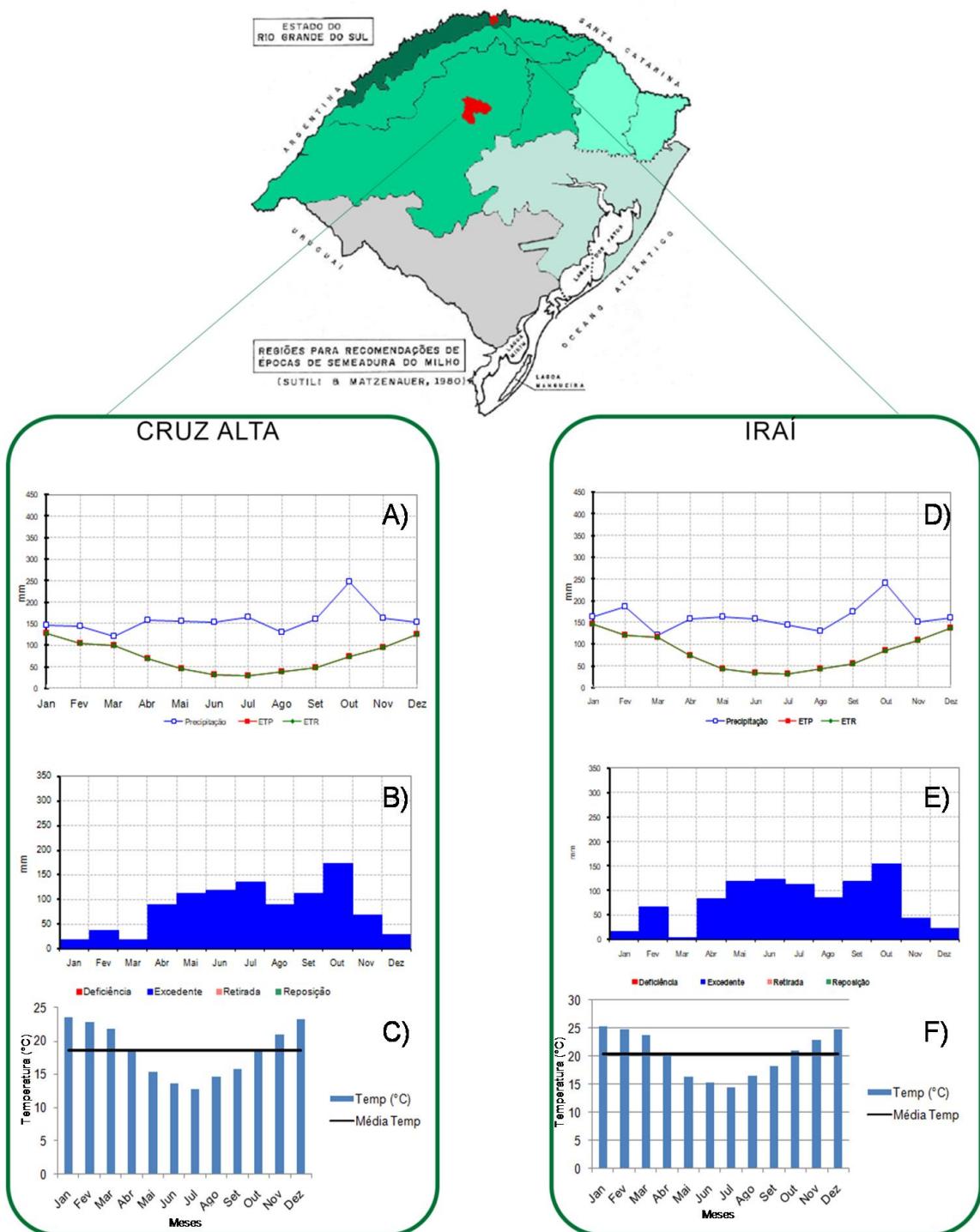


Figura 8 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A,D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B,E) e da Distribuição de Temperatura (°C) (barra azul) (C,F) no período de 1981 a 2010, para Cruz Alta e Iraí, respectivamente – RS, com CAD de 100 mm.

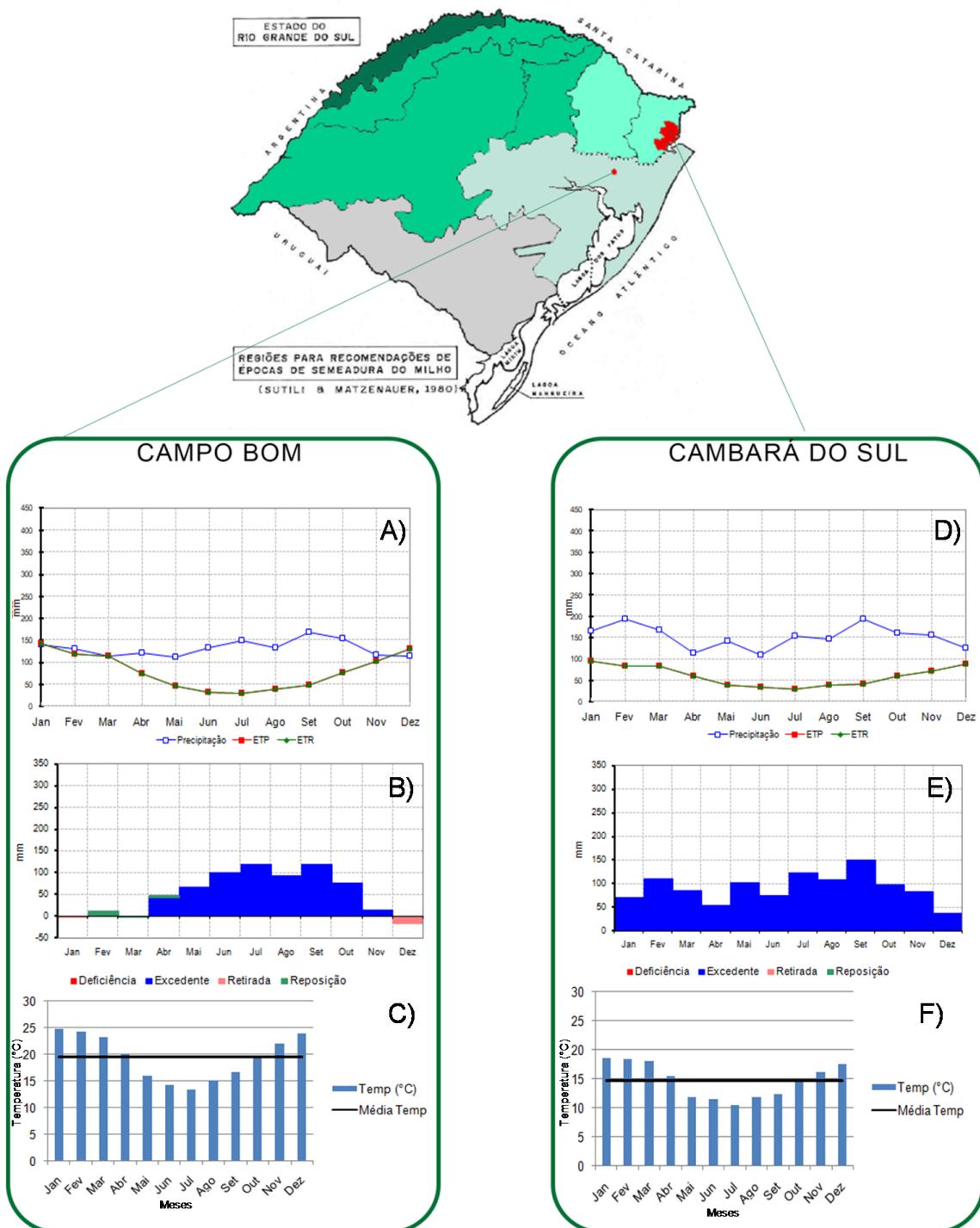


Figura 9 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A,D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B,E) e da Distribuição de Temperatura (°C) (barra azul) (C,F) no período de 1981 a 2010, para Campo Bom e Cambara do Sul, respectivamente – RS, com CAD de 100 mm.

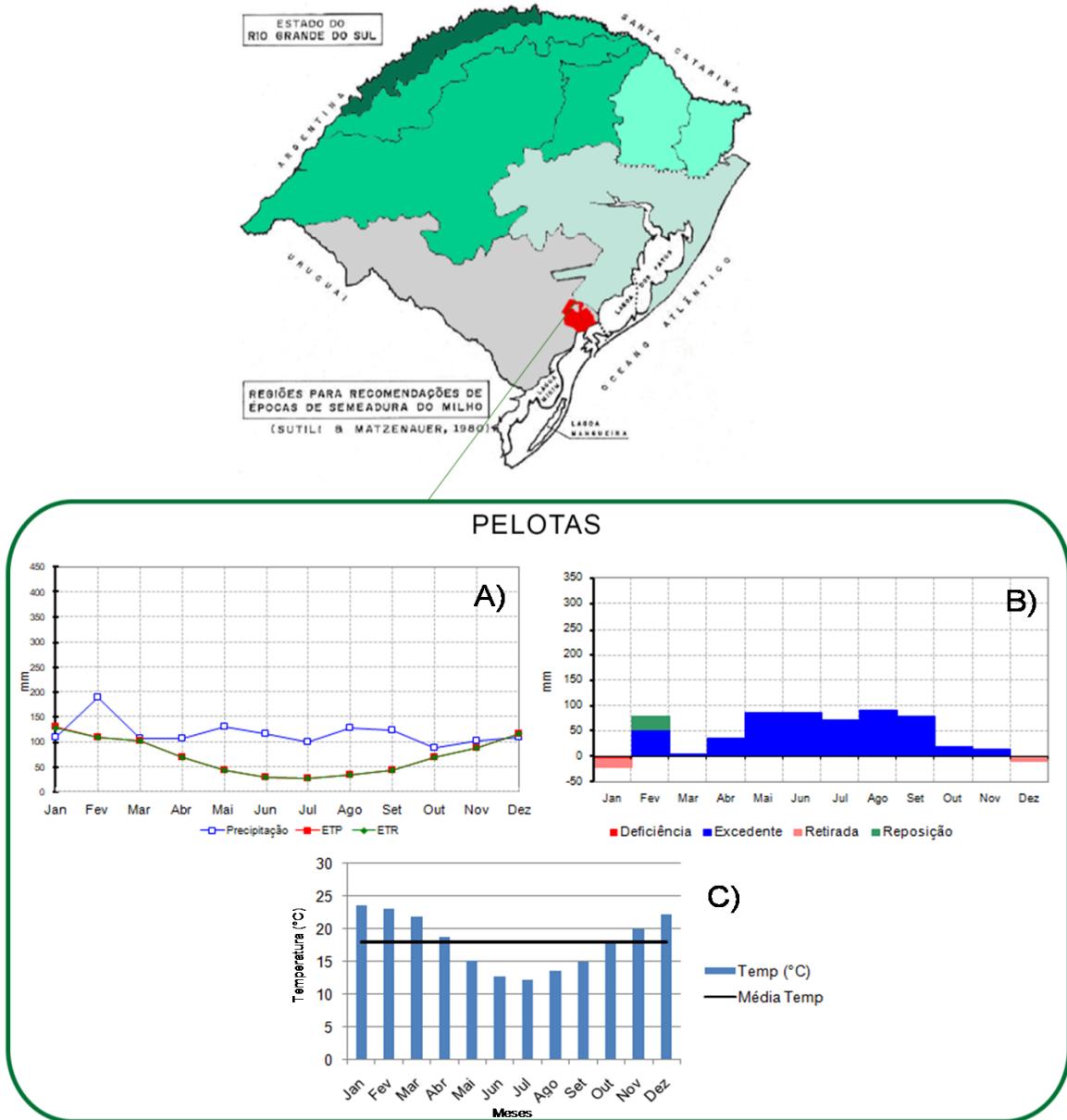


Figura 10 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B) e da Distribuição de Temperatura (°C) (C) no período de 1981 a 2010, para Pelotas, respectivamente – RS, com CAD de 100 mm.

Em se tratar do BHC da cultura do milho para o período atual (1981-2010), levando em consideração o coeficiente da cultura, percebe-se que apenas Campo Bom (Figura 11C) e Pelotas (Figura 11E) mantiveram apresentando déficit hídrico no solo nos meses de dezembro e janeiro, com valores superiores (4,6 mm) e inferiores (3,45 mm) em relação ao BHC potencial, nas respectivas localidades. Todos os demais municípios revelaram um excedente hídrico.

Tendo em vista que esse grão necessita de até 7 mm de água por dia na sua fase de maior demanda hídrica (fase IV), quando ocorrem situações de déficit hídrico, por menor quantidade que seja, pode provocar um estresse para a cultura (BERGAMASCHI et al., 2001). Essas coincidências temporais dos picos de maior necessidade de água pela planta, somados a baixa quantidade de água no solo e a maior taxa evaporativa sobre a precipitação, podem influenciar de maneira crítica em aspectos como o ciclo fenológico, quantidade e qualidade final do produto (SANS e SANTANA, 2001).

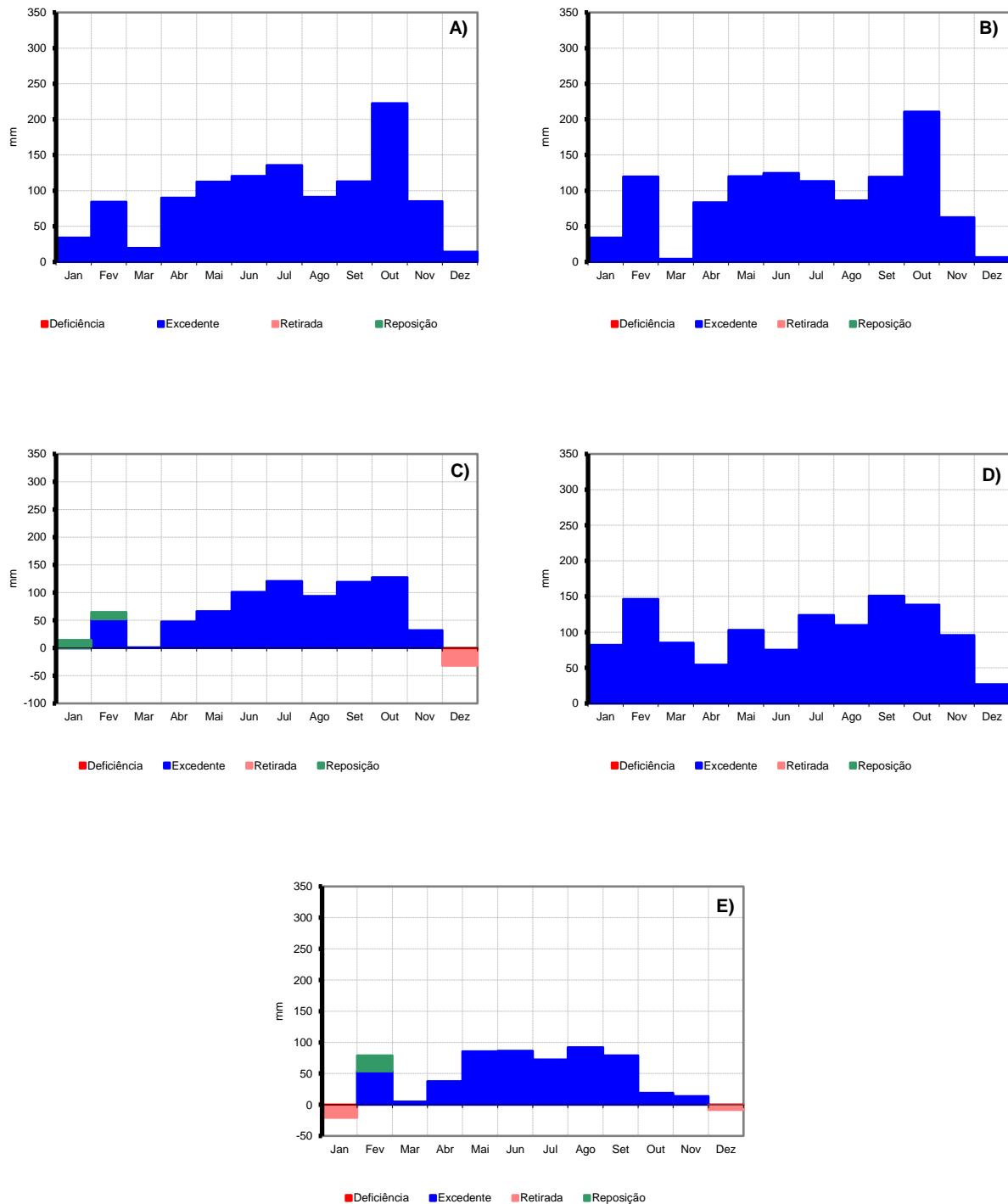


Figura 11 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 1981 a 2010, para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).

4.3 Determinação dos modelos CMIP5 de melhor desempenho

Através da análise estatística do erro médio absoluto e da raiz do erro médio quadrático (Tabela 7), verificou-se que, para a temperatura, o modelo HadGEM-2-ES produziu os menores resultados do conjunto de erros estatísticos e, portanto, gerou estimativas mais precisas. Do montante de cinco municípios, o modelo conseguiu estimar os menores índices dos dois erros avaliados para Cruz Alta, Cambará do Sul e Pelotas.

O HadGEM-2-ES teve componentes do sistema Terra adicionado em sua formulação, o que induziu critérios mais rigorosos no seu desempenho físico. Mesmo que o modelo apresente vieses de temperatura e/ou precipitação, no entanto, não afeta necessariamente a capacidade do mesmo em simular mudanças climáticas futuras em relação aos demais modelos do CMIP5. Além disso, por apresentar menor ponto de grade em comparação aos demais estudados, há um aumento na qualidade de informações geradas, permitindo noções mais detalhadas do local (COLLINS et al., 2011).

Ao mesmo tempo, os modelos BESM-OA2-5 e GFDL-CM3, ficaram nas mesmas posições de pior desempenho dos erros considerados (Tabela 7). Enquanto o primeiro representou os dois menores erros para Campo Bom, o GFDL-CM3 fez o mesmo para Iraí. Isso indica que estes dois últimos são pouco representativos, justamente, pois os dados previstos estiveram mais distantes dos dados observados.

No que diz respeito à precipitação, pôde-se observar que o HadGEM-2-ES e o GFDL-CM3 (Tabela 7) trouxeram os melhores resultados, mostrando, portanto, uma significativa aproximação entre os dados previstos e observados. Estes modelos, no ranking geral, se sobressaíram, tendo o HadGEM-2-ES conseguido representar os menores EMA para Cruz Alta, Iraí e Campo Bom, ao passo que o GFDL-CM3 expressou os menores REMQ para Cruz Alta, Campo Bom, Cambará do Sul e Pelotas.

O GFDL-CM3 passou por melhorias, apresentando índices climáticos médios mais estáveis, pois incluiu em sua formulação dados de vegetação terrestre, ciclos do carbono, interação dos aerossóis, composição química e relação entre troposfera com o oceano (GRIFFES et al., 2011).

O modelo BESM-OA2-5 revelou os piores resultados para ambos os erros, representando apenas o EMA para Cambará do Sul, e o REMQ para Iraí (Tabela 7).

Nobres (2013) ao analisar a capacidade do BESM-OA2-5 em reproduzir o modelo do clima observado, sugere um extenso viés de temperatura da superfície do mar e precipitação em comparação a outros modelos do CMIP5, indicando que esses são causados pela formulação do modelo. Ainda descreve que o mesmo consegue melhor representar a climatologia em períodos compreendidos entre 1960-2035 e, então, para projeções muito futuras não seria bem empregado.

De modo geral, verificou-se que, dentre os modelos do CMIP5, o HadGEM-2-E pode representar o BHC futuro, pois apresentou o melhor desempenho e, por isso, foi capaz de fornecer dados mais confiáveis para elaboração dos cálculos.

Comparando as magnitudes dos EMA e REMQ (Tabela 7), percebe-se que esse último tende a penalizar grandes erros, pois eleva ao quadrado a diferença entre os dados previstos e observados. Além disso, previsões perfeitamente concordantes com as observações tendem a gerar $EMA=REMQ=0$ e, neste caso, para a variável de temperatura vê-se que dentre as diferenças das magnitudes dos erros avaliados, os maiores valores foram indicados para Cruz Alta pelo modelo GFDL-CM3. Para a variável de precipitação, foi o modelo HadGEM-2-E que apontou também para Cruz Alta a maior diferença entre EMA e REMQ.

Sobre os municípios analisados (Tabela 7), Pelotas apresentou em grande parte os menores erros (EMA e REMQ), tanto para a variável de temperatura quanto para a de precipitação, e por isso pode ser considerado aquele com melhor desempenho. Como os modelos levam em consideração características distintas da região, os erros não foram sistemáticos para as localidades em estudo.

Tabela 7 - Valores de EMA e REMQ, na comparação entre observado e estimados de temperatura (°C) e precipitação (mm) pelos modelos BESM-OA2-5, HadGEM-2-ES e GFDL-CM3, para os municípios de Cruz Alta (CA), Iraí (IR), Campo Bom (CB), Cambará do Sul (CS) e Pelotas (PE), no período da Normal Climatológica 1981-2010.

BESM-OA2-5	EMA (°C)	REMQ (°C)	EMA (mm)	REMQ (mm)
CA	2,89	3,12	96,49	102,97
IR	2,2	2,43	69,05	84,31
CB	1,31	1,55	59,94	76,37
CS	4,22	4,37	63,27	77,1
PE	1,87	2,11	54,65	64,08
HadGEM-2-ES	EMA (°C)	REMQ (°C)	EMA (mm)	REMQ (mm)
CA	1,24	1,53	71,02	93,88
IR	3,3	3,53	68,37	86,41
CB	1,58	1,8	55,91	70,27
CS	2,31	2,58	70,19	88,74
PE	1,07	1,3	60,61	76,93
GFDL-CM3	EMA (°C)	REMQ (°C)	EMA (mm)	REMQ (mm)
CA	1,41	1,76	72,65	81,56
IR	1,5	1,82	81,52	89,33
CB	1,85	2,13	59,95	69,79
CS	3,22	3,46	63,45	72,52
PE	1,24	1,48	48,04	59,25

São apresentados mensalmente dois dos indicadores estatísticos - EMA e REMQ, das variáveis de temperatura (°C) e precipitação (mm) entre os valores estimados pelos modelos BESM-OA2-5, HadGEM-2-ES, GFDL-CM3 e observados para o município de melhor desempenho (Pelotas), no período da Normal Climatológica de 1981-2010 (Figura 12).

Com relação à temperatura, notou-se que o modelo HadGEM-2-ES apresenta os menores valores, uma média de aproximadamente 1 °C para ambos os erros e, que para os resultados simulados, são relativamente baixos (Figuras 12A e 12B). Considerando um cenário pessimista, com aumento de até 4,8°C na temperatura média global para as

projeções futuras, provavelmente, a cultura agrícola de milho não seria afetada com um erro de 1°C na temperatura média mensal, pois esse valor simulado seria muito próximo ao observado para o clima atual.

O BESM-OA2-5 foi o que apresentou os maiores erros entre os modelos, cerca de duas vezes o valor dos erros do HadGEM-2-E, concentrando-se nos meses de janeiro a março (Figuras 12A e 12B). Tal comportamento pôde ser visto no gráfico das temperaturas estimadas pelos modelos e observadas, que no decorrer do ano, mostrou que apenas o HadGEM-2-E ficou extremamente próximo dos valores observados. O GFDL-CM3 teve uma tendência a superestimar os valores em praticamente todo o ano, enquanto o BESM-OA2-5 superestimou os valores de novembro a junho e subestimou de junho a outubro (Figura 12E).

No que diz respeito à precipitação o modelo que anteriormente foi tido como melhor (HadGEM-2-E), acabou apresentando as maiores médias de erros: 60,61 mm (EMA) e 76,93 mm (REMQ) (Figuras 12C, 12D e 12F). Esses erros dos acumulados mensais de chuva são significativos e, portanto, podem influenciar nas estimativas do balanço hídrico. Neste caso, os resultados encontrados sustentam a necessidade de aprimoramento nos métodos de previsão de precipitação para elaborarem prognósticos cada vez mais eficazes. Contudo, sabe-se que o campo de precipitação é mais complicado de se representar do que o de temperatura, principalmente em escala regional ou local (FLATO et al., 2013).

Para Pelotas, o GFDL-CM3 apresentou as menores médias de erros: 48,04 mm (EMA) e 59,25 mm (REMQ). As maiores diferenças entre as medidas dos erros EMA e REMQ foi indicado pelos modelos BESM-OA2-5 e GFDL-CM3 para a variável de temperatura (Figura 12A e 12B), enquanto que o modelo HadGEM-2-E indicou para variável de precipitação (Figuras 12C, 12D e 12F).

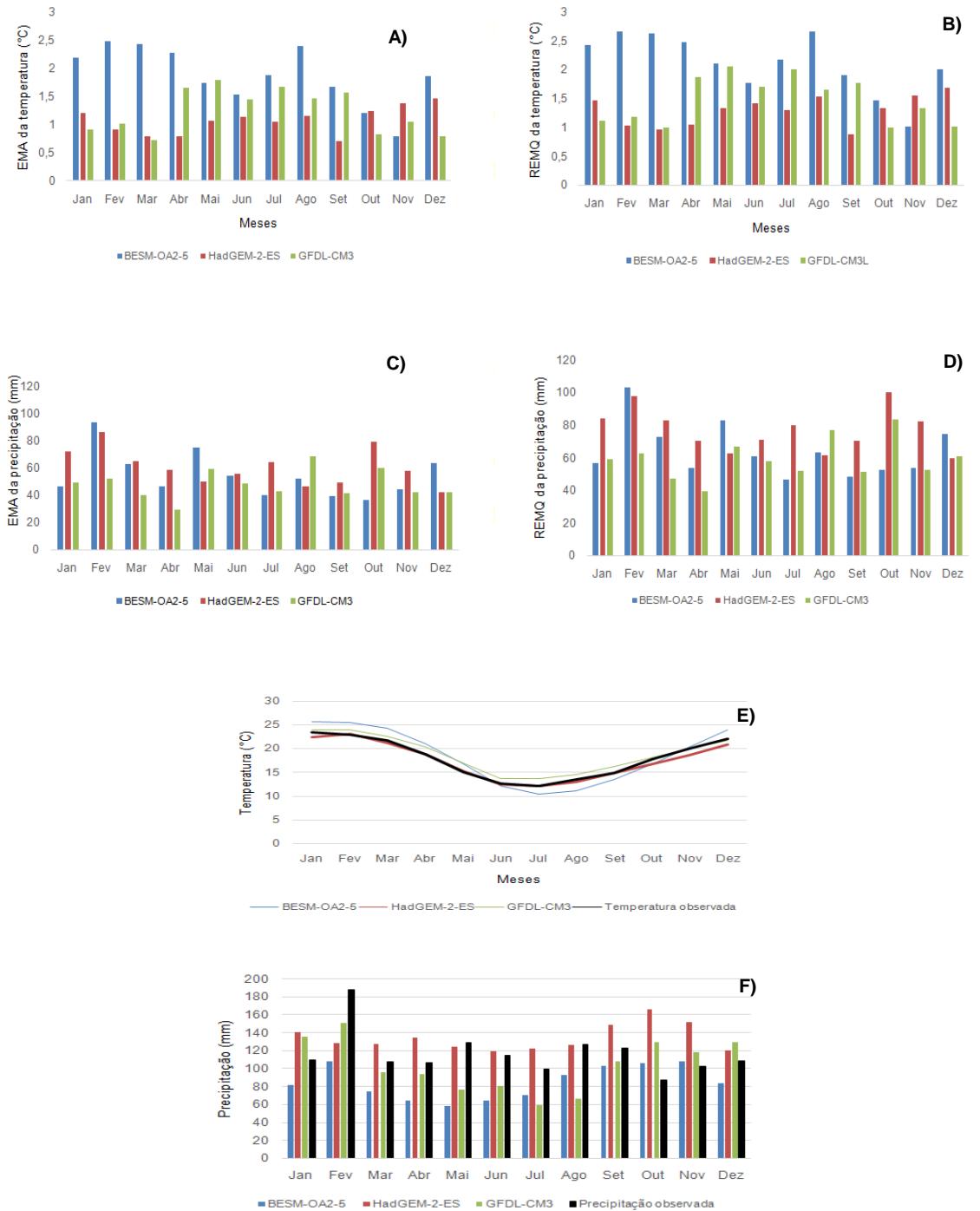


Figura 12 - Indicadores estatísticos EMA de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (A) e precipitação (mm) (C); REMQ de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (B) e precipitação (mm) (D); estimativas para as séries mensais de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (E) e estimativas para as séries mensais de precipitação (mm) (F) - entre dados observados em estações do INMET de 1981 - 2010 e estimados pelos modelos BESM-OA2-5 (linha sólida e barra azul), HadGEM-2-ES (linha sólida e barra vermelha), GFDL-CM3 (linha sólida e barra verde) para o município de Pelotas, no mesmo período. Linha e barra preta, referem-se a média de temperatura e precipitação, respectivamente.

4.3.1 O modelo CMIP5 de melhor desempenho

As projeções de temperatura e precipitação média mensal, gerados a partir dos dados do modelo de melhor desempenho (HadGEM-2-E), para o clima futuro das localidades em estudo estão apresentados nas Figuras 13 e 14, e foram comparados com o cenário atual (1981-2010). No geral, todas os municípios revelam que as projeções de temperatura e precipitação sofreram um aumento em relação ao período atual.

O modelo HadGEM-2-E apresentou projeções com maior acréscimo de temperatura e de precipitação para Cambará do Sul, principalmente no PC1-projeção climática 1, do RCP 8.5 (Figuras 13H e 14H). Nesse caso, as anomalias mensais de temperatura indicaram um acréscimo de aproximadamente 5°C em praticamente todo o ano, ao passo que as maiores anomalias de precipitação são esperadas para os meses de setembro a dezembro, variando entre 176 a 185 mm, respectivamente. Até o final do século a chuva acumulada anual deve aumentar cerca de 1200 mm, correspondendo um pouco menos da metade do que foi registrado no total acumulado no período atual.

Estes resultados reiteram as afirmações de Leite et al. (2012) sobre o panorama futuro diante das alterações dos padrões da temperatura média da superfície da Terra, que poderão atingir valores de até 3,18°C para o século XXI, impactando no meio ambiente, recursos hídricos, agricultura, ecossistemas e biodiversidade.

Blanc (2012) expõe que a compensação da precipitação com o incremento da temperatura pode ser favorável nos rendimentos das culturas do milho, caracterizando assim, um impacto benéfico sobre a agricultura da região. No entanto, Marengo et al. (2009) afirma que condições de anomalias úmidas persistentes, podem também gerar danos graves, como por exemplo, inundações e atrasos nas colheitas.

Melo (2015) em sua pesquisa sobre mudanças climáticas na região noroeste do Rio Grande do Sul, indicou uma tendência de aumento na média anual de precipitação, principalmente nos meses de outubro a dezembro.

Ao analisar a tendência de temperatura e precipitação em cenários de mudanças climáticas para Pelotas (RS), Anjos et al. (2018) indicaram anomalias positivas de precipitação para o cenário RCP 4.5, nos períodos de 2006-2037, 2038-2068 e 2069-2099, também entre os meses de outubro e novembro.

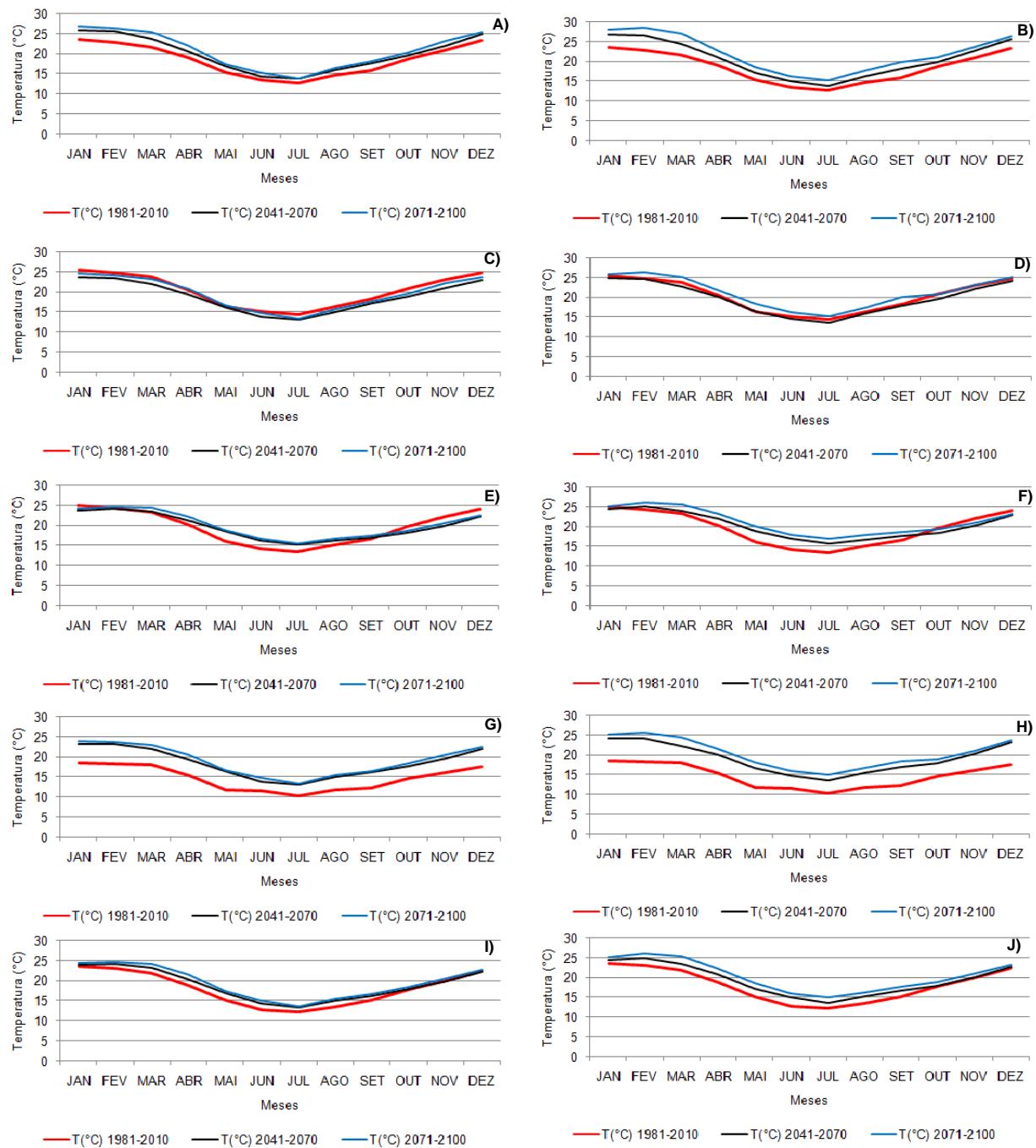


Figura 13 - Tendência de Temperatura (°C) para Cruz Alta (A, B), Iraí (C, D), Campo Bom (E, F), Cambará do Sul (G, H) e Pelotas (I, J), respectivamente – RS, para os períodos de 1981 – 2010 (linha vermelha); 2041 – 2070 (linha preta); e 2071 – 2100 (linha azul), dos cenários futuros – RCP 4.5 (A, C, E, G e I) e 8.5 (B, D, F, H e J).

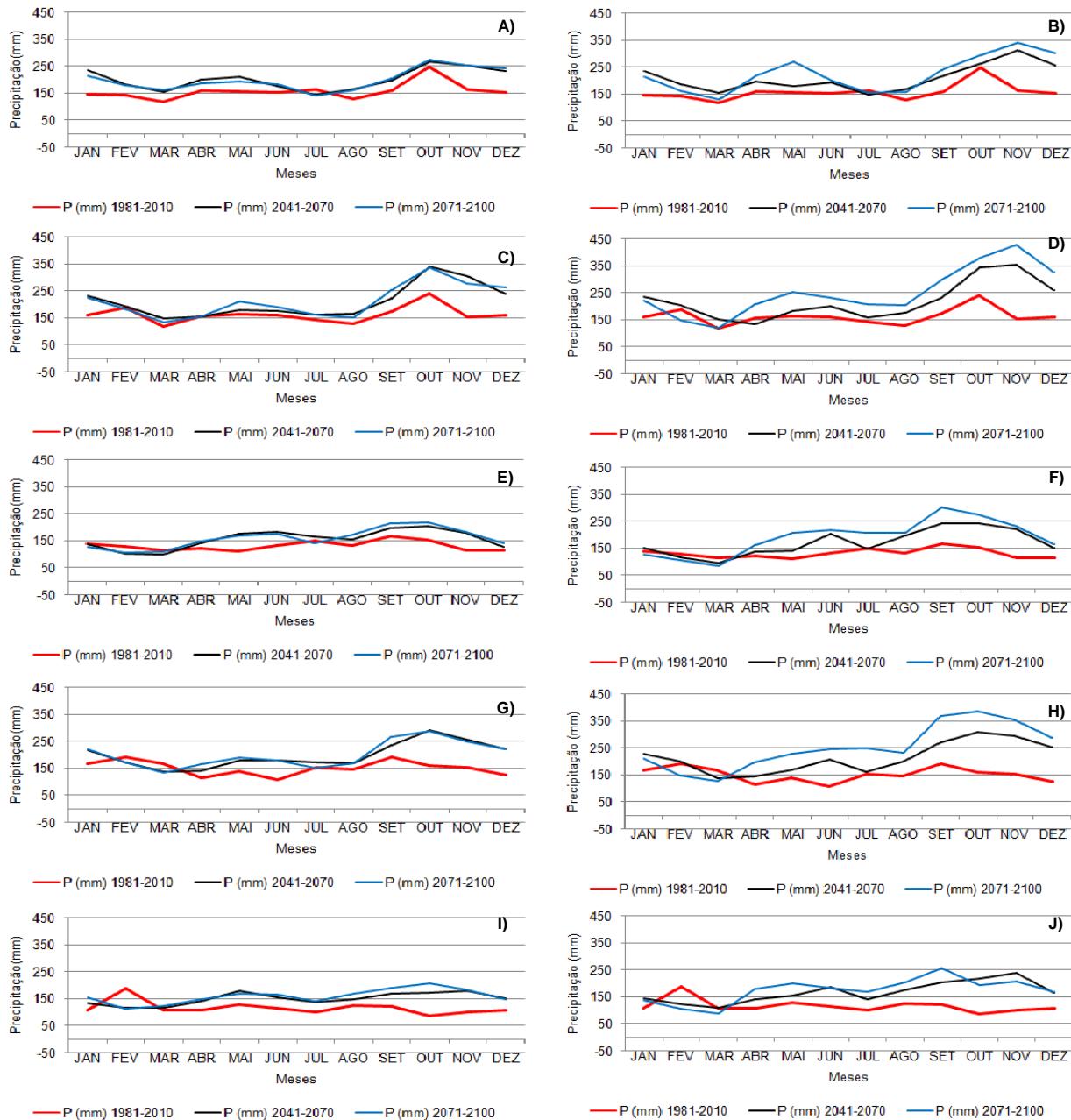


Figura 14 - Tendência de Precipitação (mm) para Cruz Alta (A, B), Iraí (C, D), Campo Bom (E, F), Cambará do Sul (G, H) e Pelotas (I, J), respectivamente – RS, para os períodos de 1981 – 2010 (linha vermelha); 2041 – 2070 (linha preta); e 2071 – 2100 (linha azul), dos cenários futuros – RCP 4.5 (A, C, E, G e I) e 8.5 (B, D, F, H e J).

4.4 Balanço hídrico climatológico futuro e da cultura

Ao analisar se essas condições atuais de disponibilidade hídrica potencial e da cultura sofreram alterações com as mudanças climáticas globais, são apresentados os balanços hídricos climatológicos e o comportamento da temperatura (°C) ao longo do ano, para o período de 2041-2070 (denominado de PC1 - projeção climática 1) e 2071-2100 (denominado de PC2 - projeção climática 2) para os cinco municípios em análise, considerando-se os dois cenários de emissões: RCP 4.5 e RCP 8.5 (Figuras 15 a 28) .

Para o cenário climático RCP 4.5 - PC1, apenas Campo Bom apresentou déficit hídrico (fevereiro e março), cerca de duas vezes a mais comparado ao valor indicado no período atual, ou seja, de aproximadamente 4 mm (Figura 17B). Nesse período a cultura encontra-se no processo de maturação fisiológica e, como a umidade do grão deve ser reduzida, o déficit hídrico não tende a ser prejudicial para as safras de verão. No entanto, para a segunda safra, que se encontra nas fases de estabelecimento e vegetativa, a falta de água no solo sobre a produção pode ser mais atenuada em comparação a sua fase de maior desenvolvimento. Ainda assim torna-se um fator limitante para o desenvolvimento do milho, pois tem o potencial de afetar os processos fisiológicos e bioquímicos como a fotossíntese, respiração, metabolismo de nutrientes, os promotores de crescimento entre outros (JALEEL et al., 2009; FAROOQ et al., 2009).

No cenário climático RCP 4.5 – PC2 ainda não foi previsto déficit hídrico para Cruz Alta, Iraí e Cambará do Sul, tendo assim um saldo positivo em maior escala no decorrer do aumento das chuvas (Figuras 15E, 16E e 18E). Apenas os municípios de Campo Bom e Pelotas exibiram tal déficit - 3,9 mm (janeiro, fevereiro e março) e 0,5 mm (fevereiro), respectivamente (Figuras 17E e 19E). Os valores de temperatura permanecem dentro do intervalo desejável para o cultivo do milho, onde apresentam um bom desenvolvimento fisiológico. Diferentemente das outras localidades analisadas, Iraí não verificou uma tendência de aumento significativo na temperatura média mensal para as projeções futuras. Em relação ao período atual que indicou valor aproximado de 20°C, apenas o cenário RCP 8.5 - PC2 teve valor superior dessa variável, 21°C (Figura 23F). As demais projeções (RCP 4.5 – PC1 e PC2; RCP 8.5 – PC1) (Figuras 16C, 16F e 23C) indicaram temperatura média mensal de 19°C.

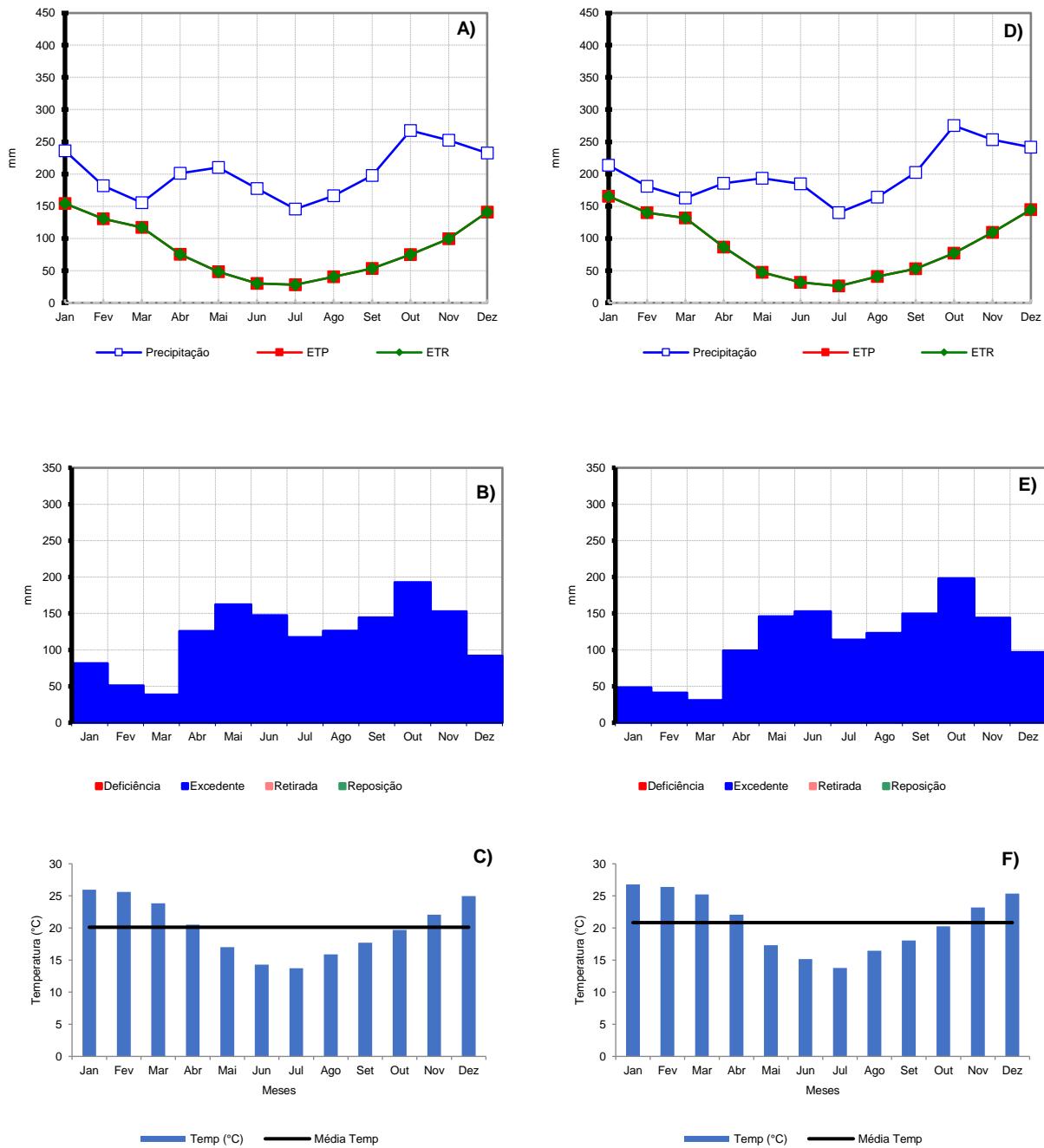


Figura 15 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Crua Alta – RS, com CAD de 100 mm

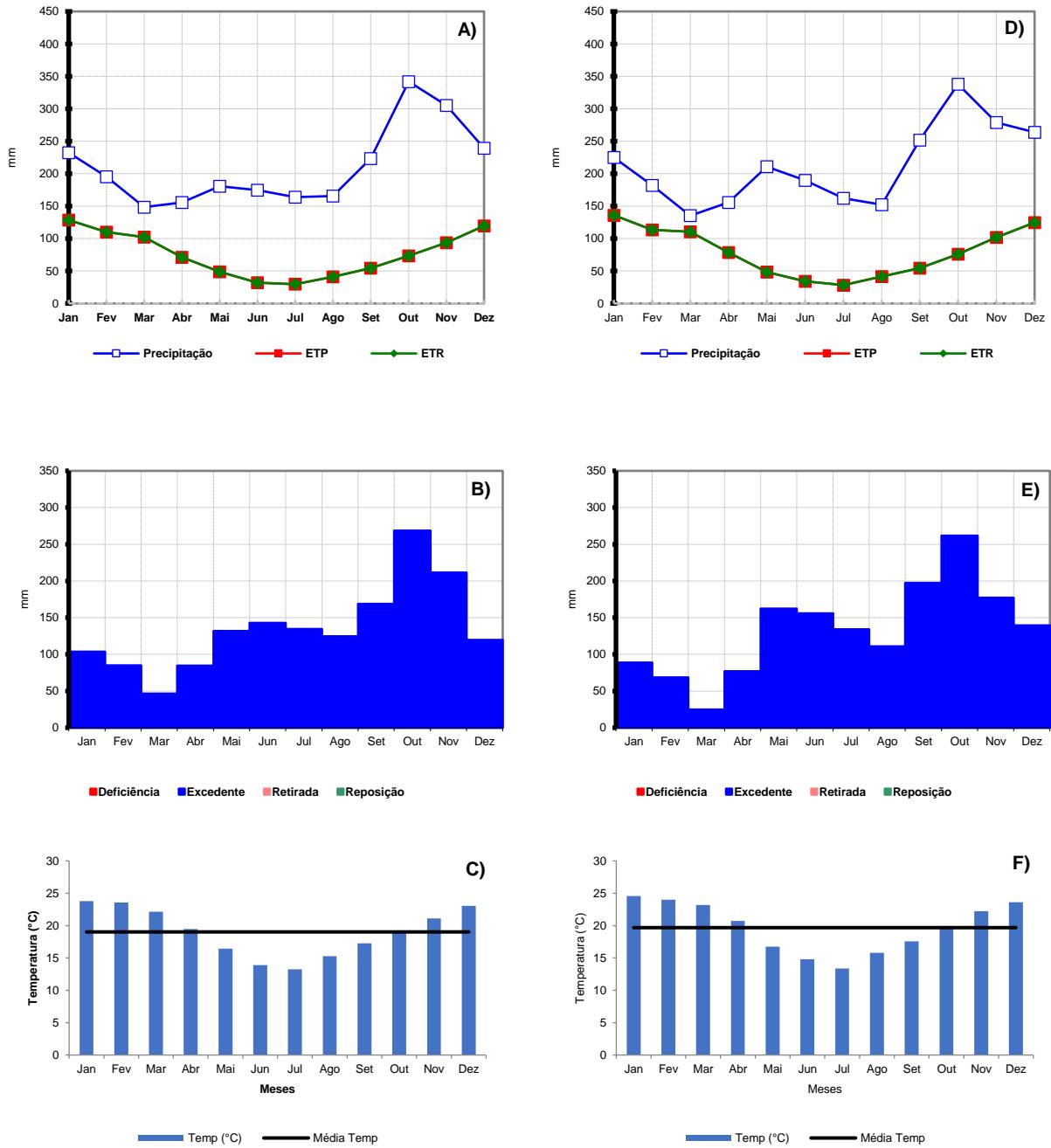


Figura 16 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Iraí – RS, com CAD de 100 mm.

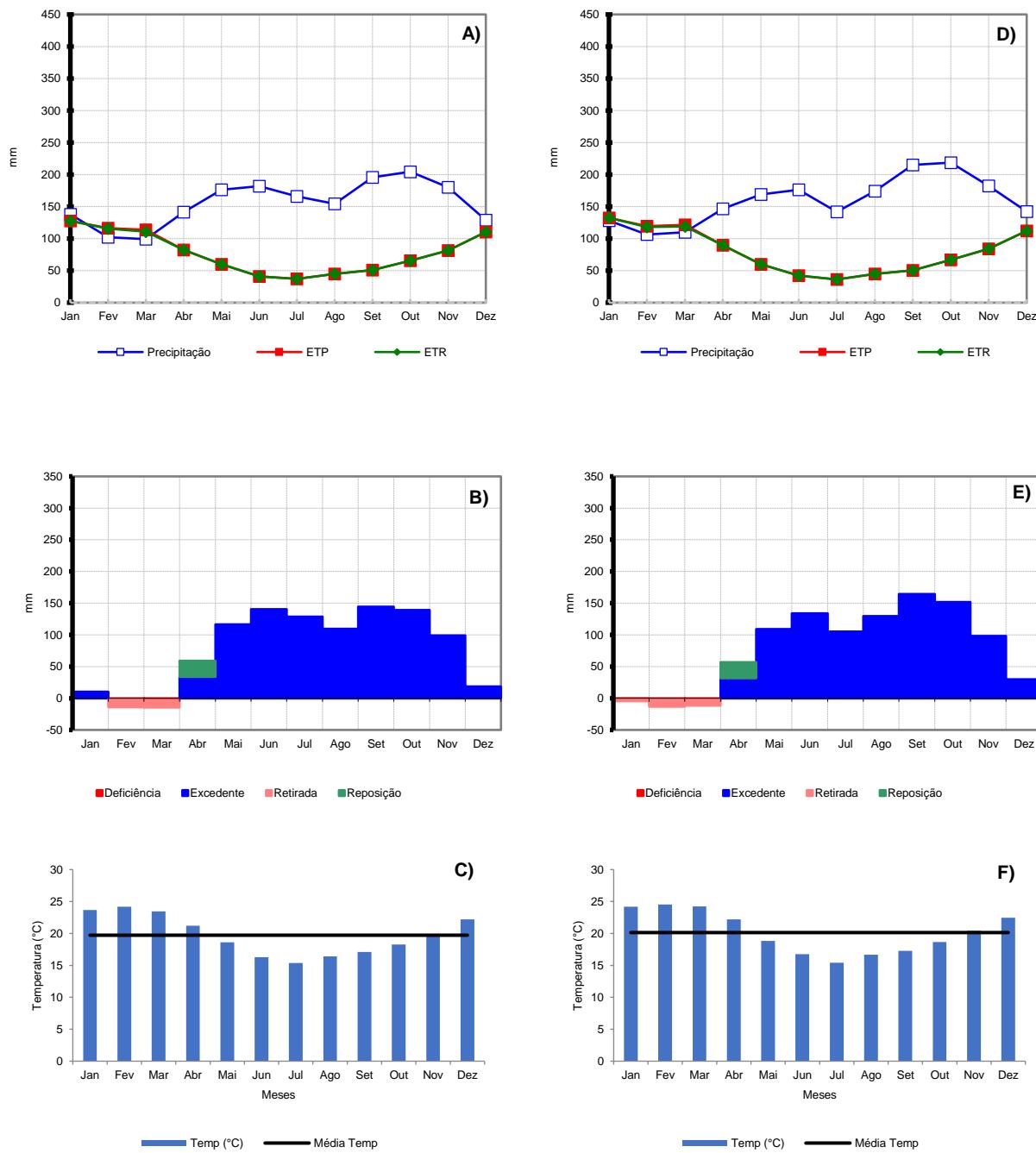


Figura 17 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Campo Bom – RS, com CAD de 100 mm.

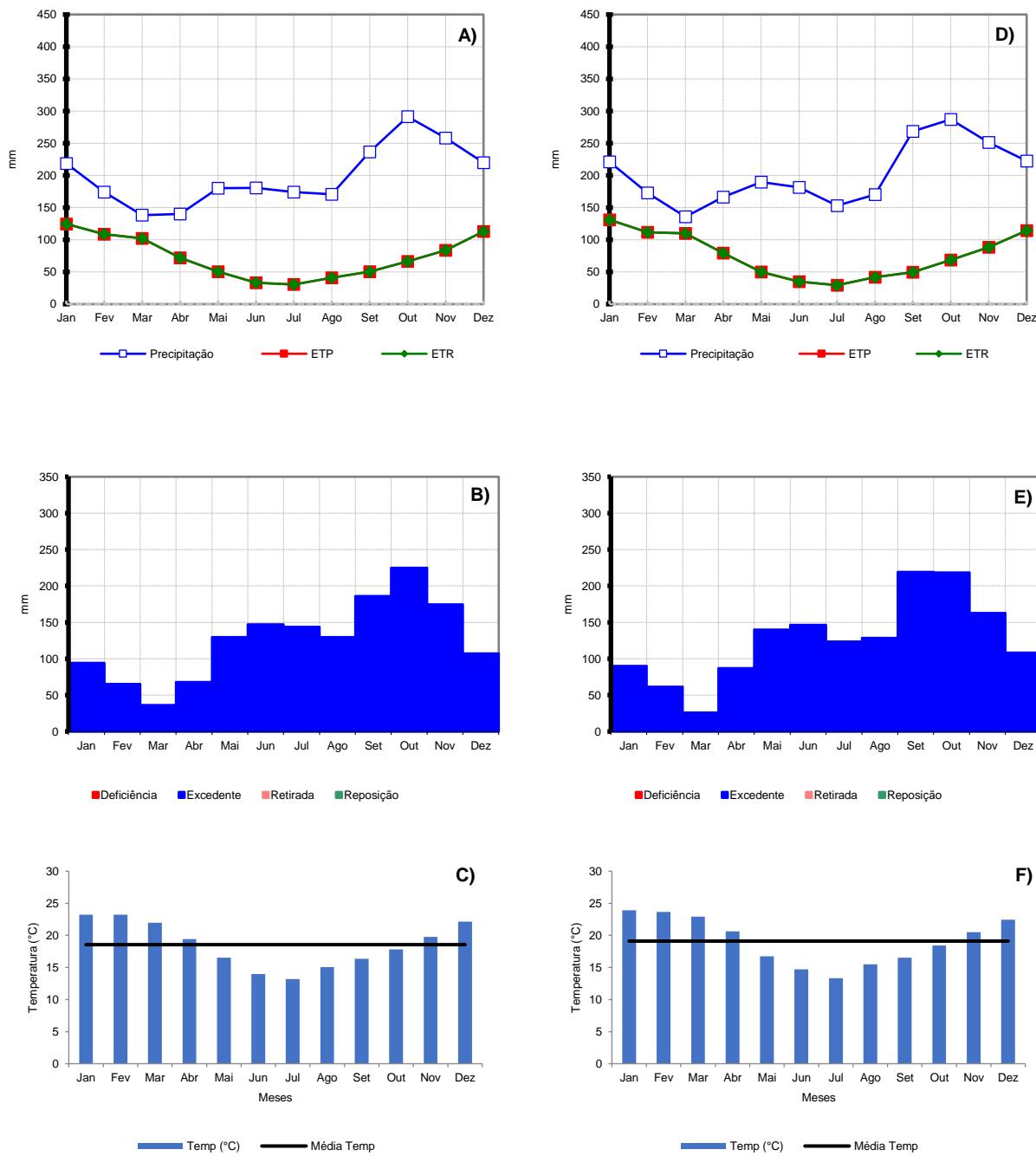


Figura 18 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (E, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Cambará do Sul – RS, com CAD de 100 mm.

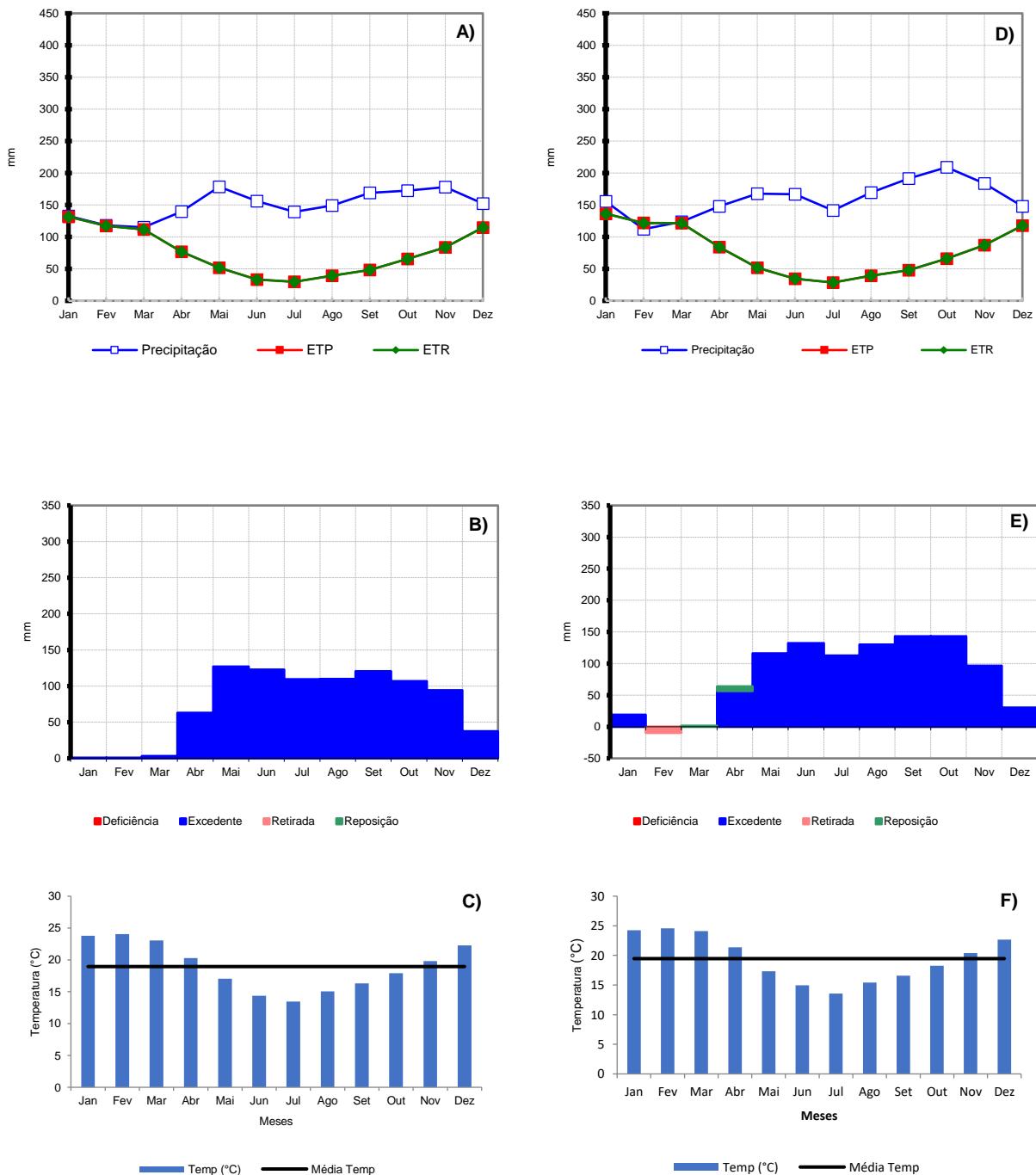


Figura 19 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (4.5), para Pelotas – RS, com CAD de 100 mm.

Para o balanço hídrico da cultura do milho, o cenário climático RCP 4.5 - PC1 mostrou que apenas Campo Bom indicou déficit hídrico no solo, com valor de 1,04 mm e no mês de março (Figura 20C). Essa quantia é inferior ao apresentado no período atual e em relação às projeções do BHC potencial exibido nesse mesmo cenário. Todas as demais localidades indicaram um excedente hídrico, até mesmo Pelotas (Figura 20E), que atualmente indica déficit hídrico. Mesmo assim, o município ainda apresenta excedente hídrico, porém com valores ainda muito baixos entre os meses de janeiro a março.

Para o cenário climático RCP 4.5 – PC2, o balanço hídrico da cultura apontou que apenas Campo Bom seguiu apresentando baixa disponibilidade de água no solo - 0,61 mm no mês de março (Figura 21C). Esse valor é aproximadamente sete vezes inferior ao apresentado no período atual. Percebe-se que em comparação ao período atual, os valores de déficit hídrico previstos pelo modelo de melhor desempenho, foram reduzidos e, neste mesmo mês de escassez de água presente no solo, o HadGEM-2-E tendeu a superestimar os valores de precipitação. Caso houvesse uma subestimativa dos valores de chuva, no respectivo período, os déficits hídricos tenderiam a ser intensificados.

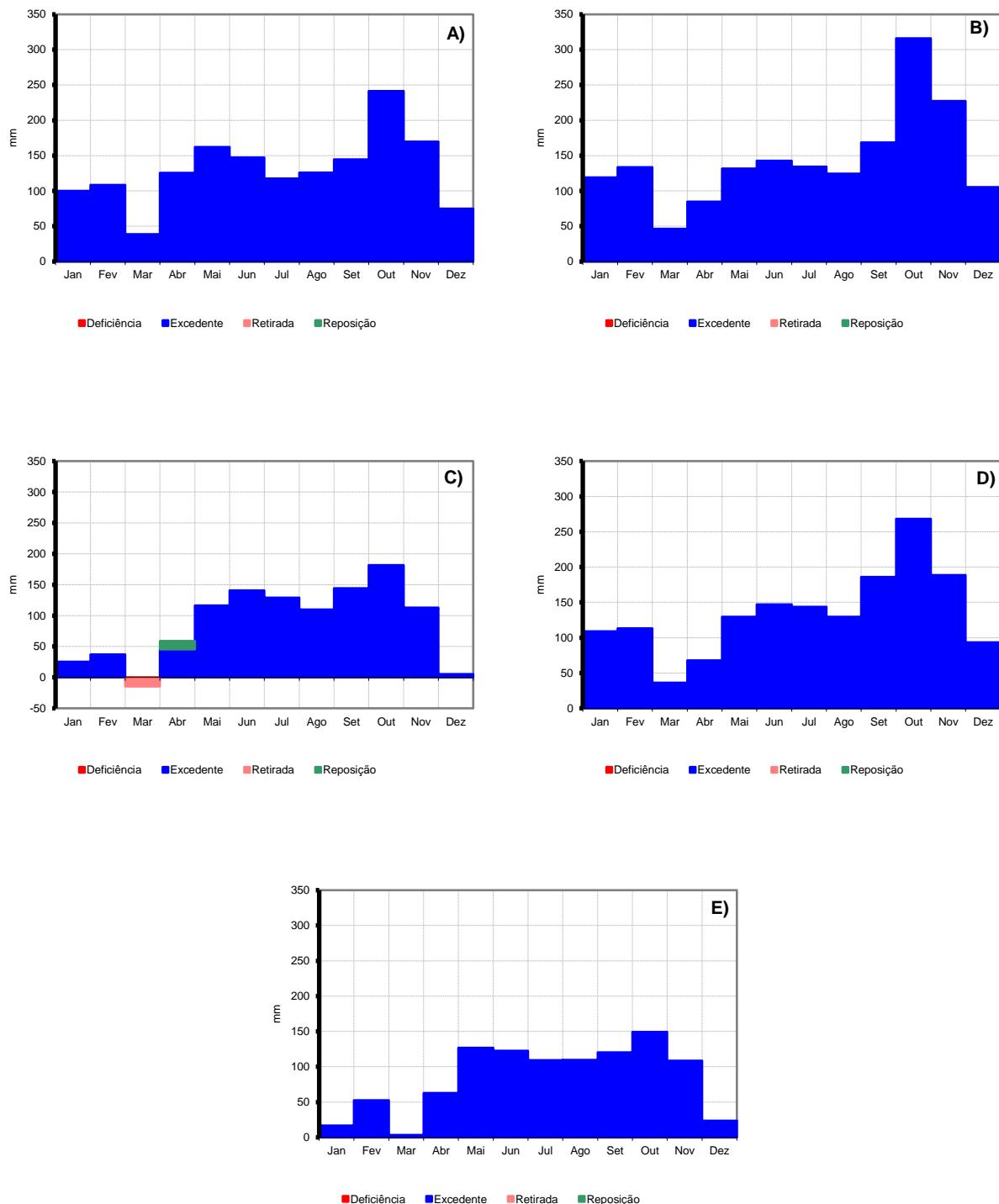


Figura 20 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2041-2070, do cenário futuro – o RCP (4.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).

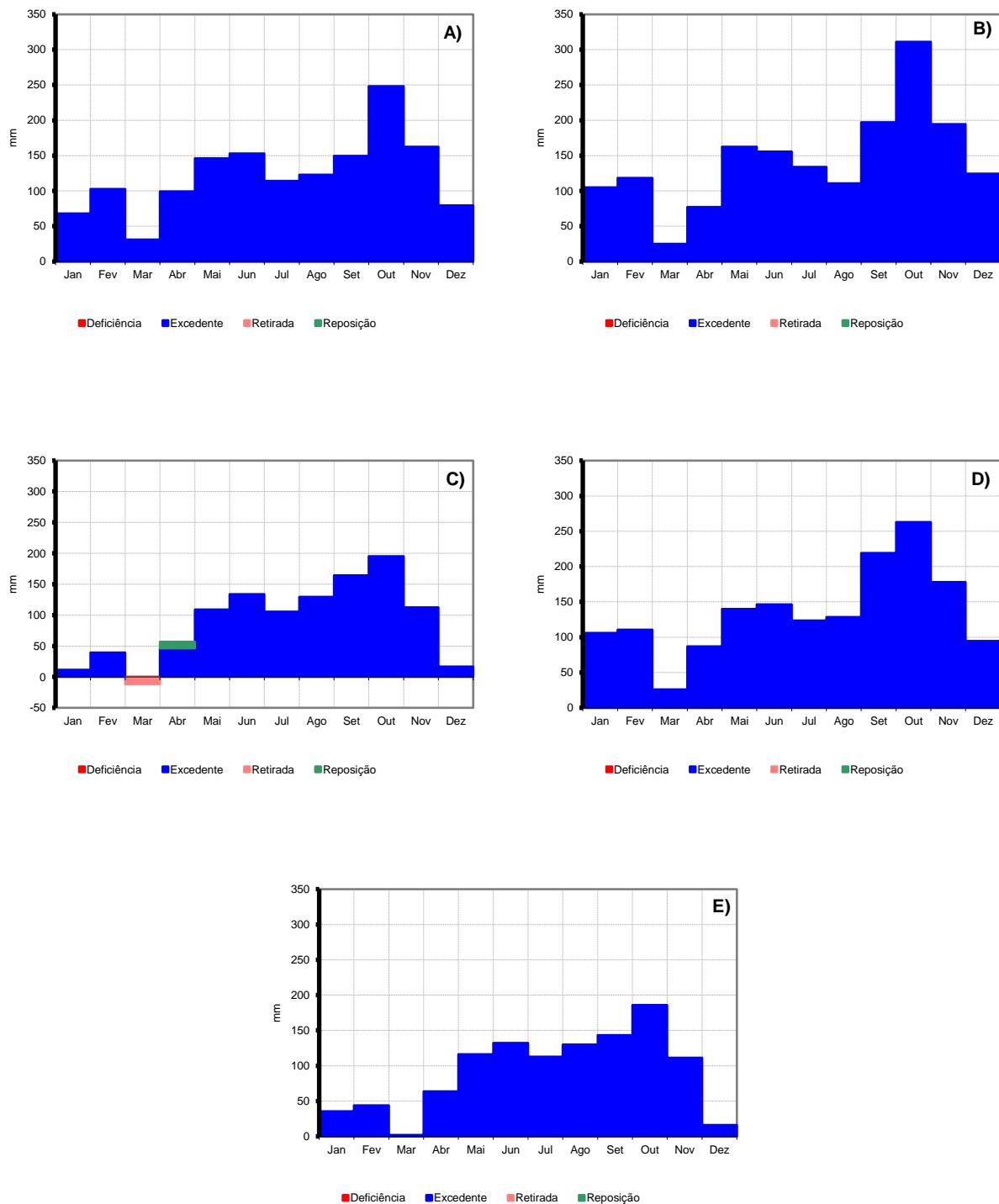


Figura 21 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2071-2100, do cenário futuro – o RCP (4.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).

Para o cenário climático RCP 8.5 - PC1, o déficit hídrico foi apenas para Campo Bom (5,5 mm - fevereiro e março) (Figura 24B) e, em quantidade menor, para Pelotas (0,3mm - março) (Figura 26B) comparado ao período atual. Contudo, mesmo que o déficit seja pequeno, pode acabar coincidindo com períodos de maior demanda hídrica da cultura, afetando assim, a fase de desenvolvimento do milho (FANCELLI, 2001). Nesse caso, tenderia a ser mais prejudicial para o milho de segunda safra, que tem sua produção de janeiro a abril, e nos meses do déficit hídrico encontra-se na sua fase de estabelecimento e vegetativa.

Nos demais municípios a precipitação manteve-se acima da quantidade de água evapotranspirada, indicando assim, um excedente hídrico (Figuras 22A, 23A e 25A). No entanto essas condições sofreram mudanças no cenário climático RCP 8.5 – PC2, a qual, com exceção de Cambará do Sul que indicou um aumento no total precipitado e na temperatura média anual com maior intensidade (Figuras 25D e 25F), todos os outros municípios revelaram déficit hídrico entre os meses de janeiro a março. Cruz Alta e Iraí que expunham conteúdo de água positivo presente no solo para utilização da cultura, passam a ter déficit hídrico de 5,7 e 0,4 mm, respectivamente (Figuras 22E e 23E). Campo Bom e Pelotas, que desde o período atual e em grande parte das projeções futuras apontavam déficit hídrico, para este cenário tiveram os maiores valores desse déficit – 33,9 e 28,8 mm, respectivamente (Figuras 24E e 26E). Mesmo que tenha ocorrido um aumento considerável de temperatura desde o período atual, tais valores encontram-se dentro da faixa de desenvolvimento ótimo da cultura, sem que haja danos a estruturas reprodutivas das plantas e queda da qualidade final do grão (FANCELLI e DOURADO NETO 2000).

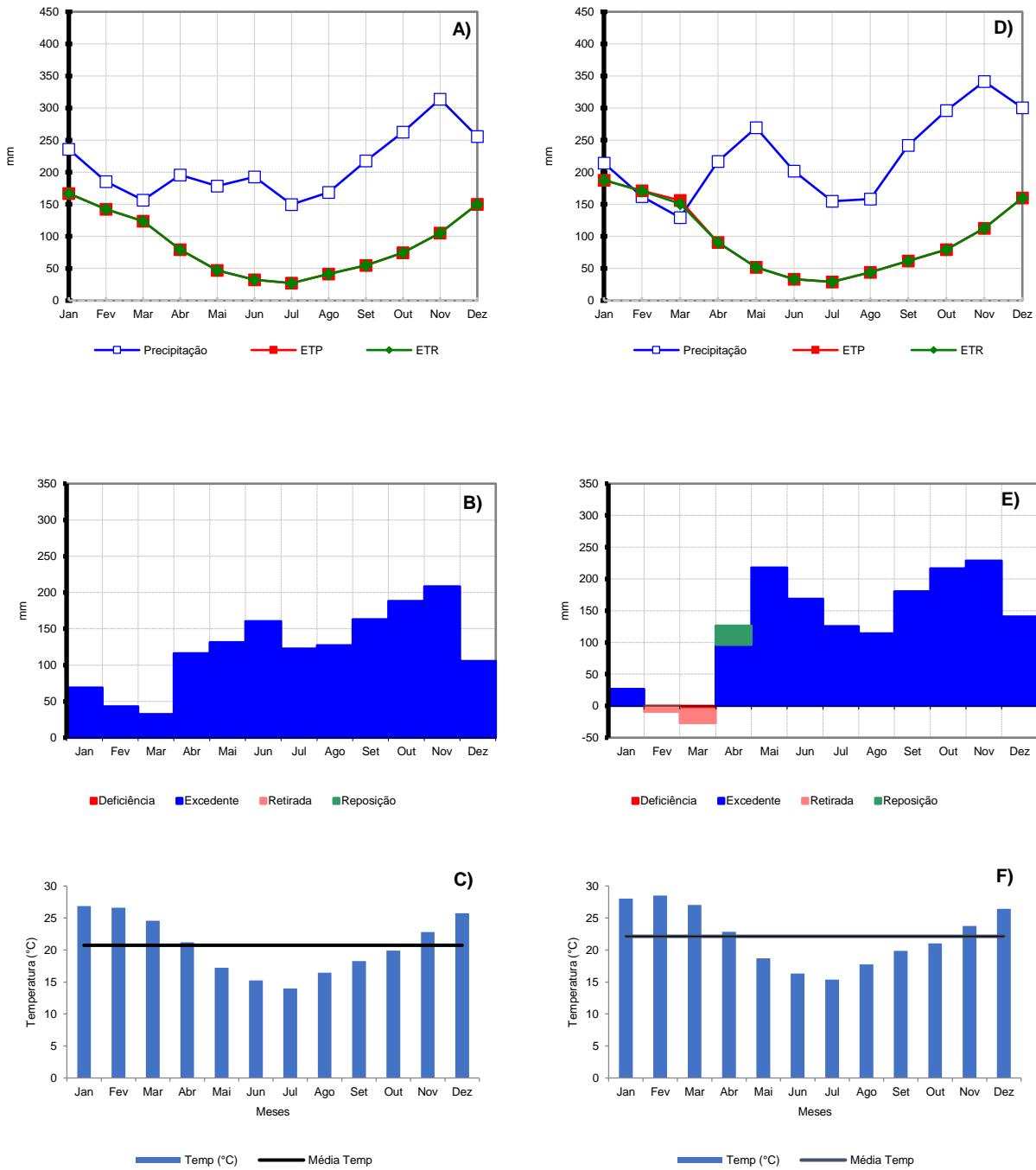


Figura 22 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Cruz Alta – RS, com CAD de 100 mm.

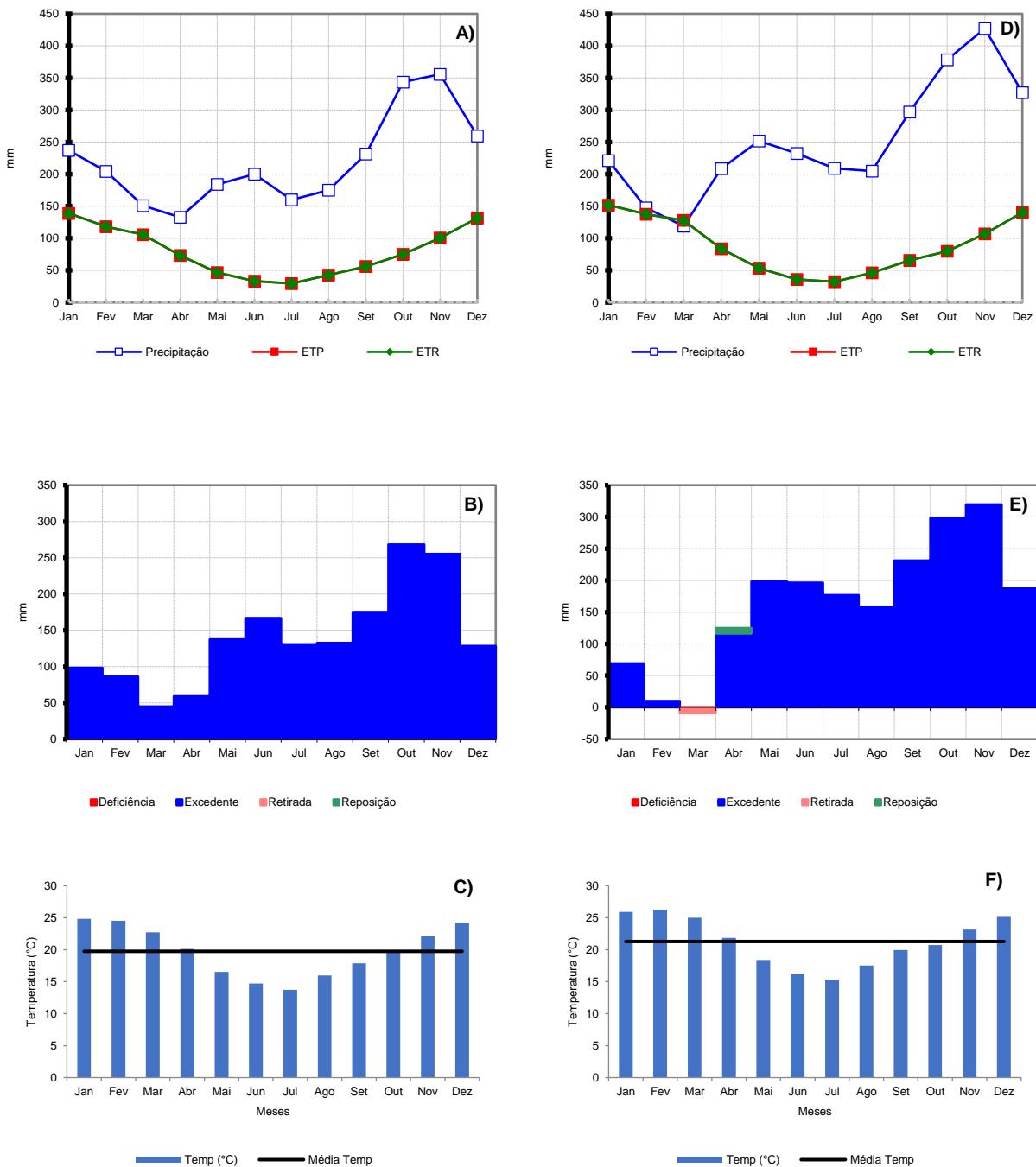


Figura 23 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Iraí – RS, com CAD de 100 mm.

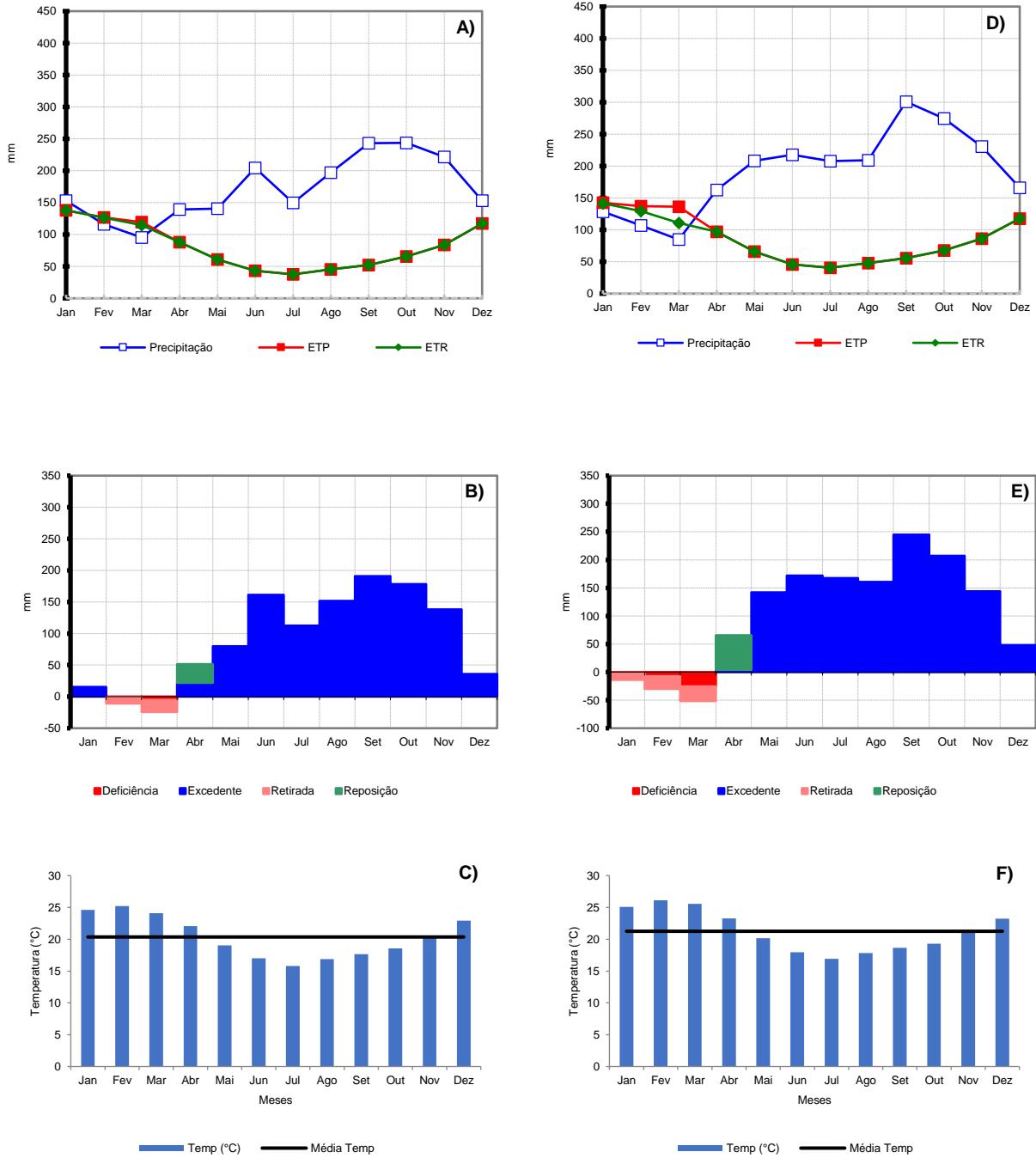


Figura 24 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Campo Bom – RS, com CAD de 100 mm.

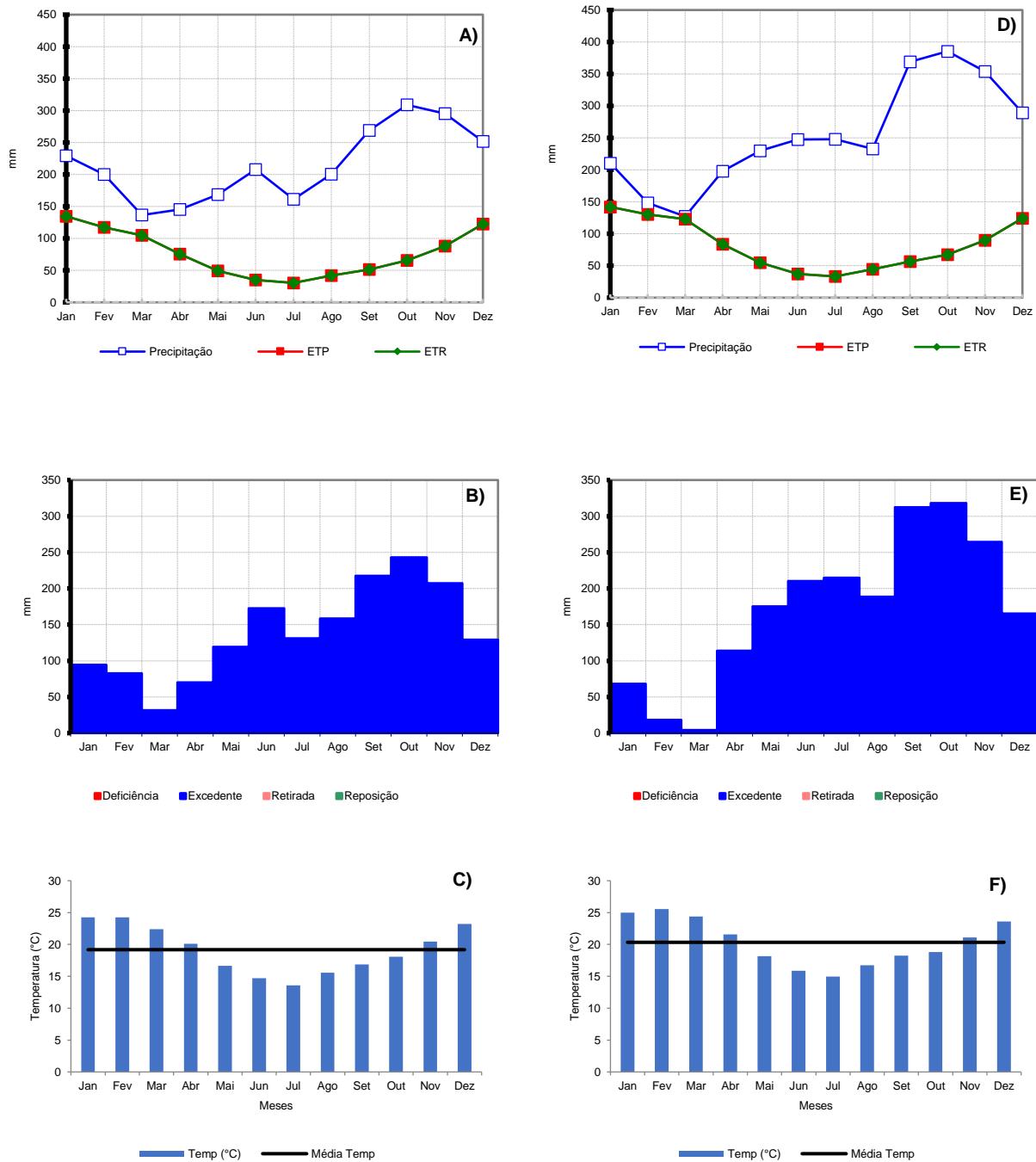


Figura 25 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (barra azul) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Cambará do Sul – RS, com CAD de 100 mm.

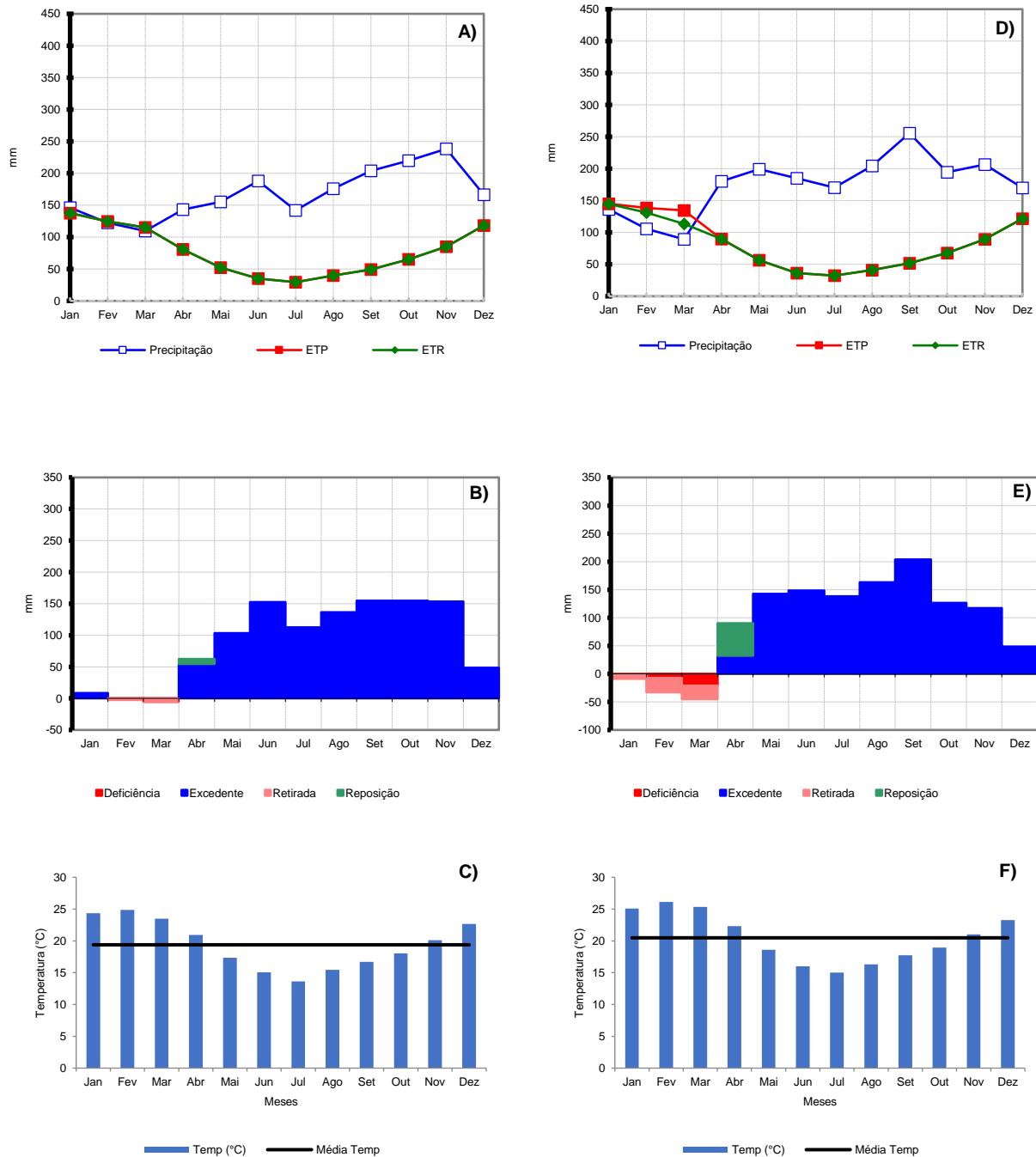


Figura 26 - Balanço Hídrico Climatológico Normal mensal – precipitação (linha azul), ETP (linha vermelha) e ETR (linha verde) (A, D), da Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde) Hídrica (B, E) e do comportamento de Temperatura (°C) (C, F) no período de 2041-2070 (A, B, C) e 2071-2100 (D, E, F), do cenário futuro – RCP (8.5), para Pelotas – RS, com CAD de 100 mm.

O cenário climático RCP 8.5 - PC1 mostrou que o balanço hídrico da cultura do milho continuou indicando déficit hídrico para Campo Bom (2,66 mm) em março (Figura 27C). Esse valor foi inferior ao período inicial, porém já sofreu um significativo aumento em relação ao cenário anterior. Neste caso, Pelotas voltou a apresentar valores negativos de água no solo, cerca de 0,2 mm e, também em março (Figura 27E).

Já o cenário climático RCP 8.5 – PC2 foi o mais crítico, pois com exceção de Cambará do Sul (Figura 28D), todas as demais localidades passam apresentar déficit hídrico no mês de março. Cruz Alta indicou déficit de 3,26 mm (Figura 28A), Iraí de 0,42 mm (Figura 28B), Campo Bom de 11,21 mm (Figura 28C) e Pelotas de 8,84 mm (Figura 28E).

Analizando-se o desempenho dos modelos, observou-se que no geral, que o HadGEM-2-ES produziu previsões de precipitação de não tão boa qualidade, podendo indicar erroneamente os valores de BHC futuro, subestimando ou superestimando a sua intensidade nas regiões em estudo, enquanto que, para os dados de temperatura, o modelo indicou bons resultados.

A variedade física dos processos de precipitação e as escalas de tempo e espaço, vinculadas a eles, não são resolvidas satisfatoriamente pelos modelos numéricos e, mesmos aqueles com boa resolução não conseguem estimar satisfatoriamente os campos de precipitação por meio de suas parametrizações (OLSON et al., 1995).

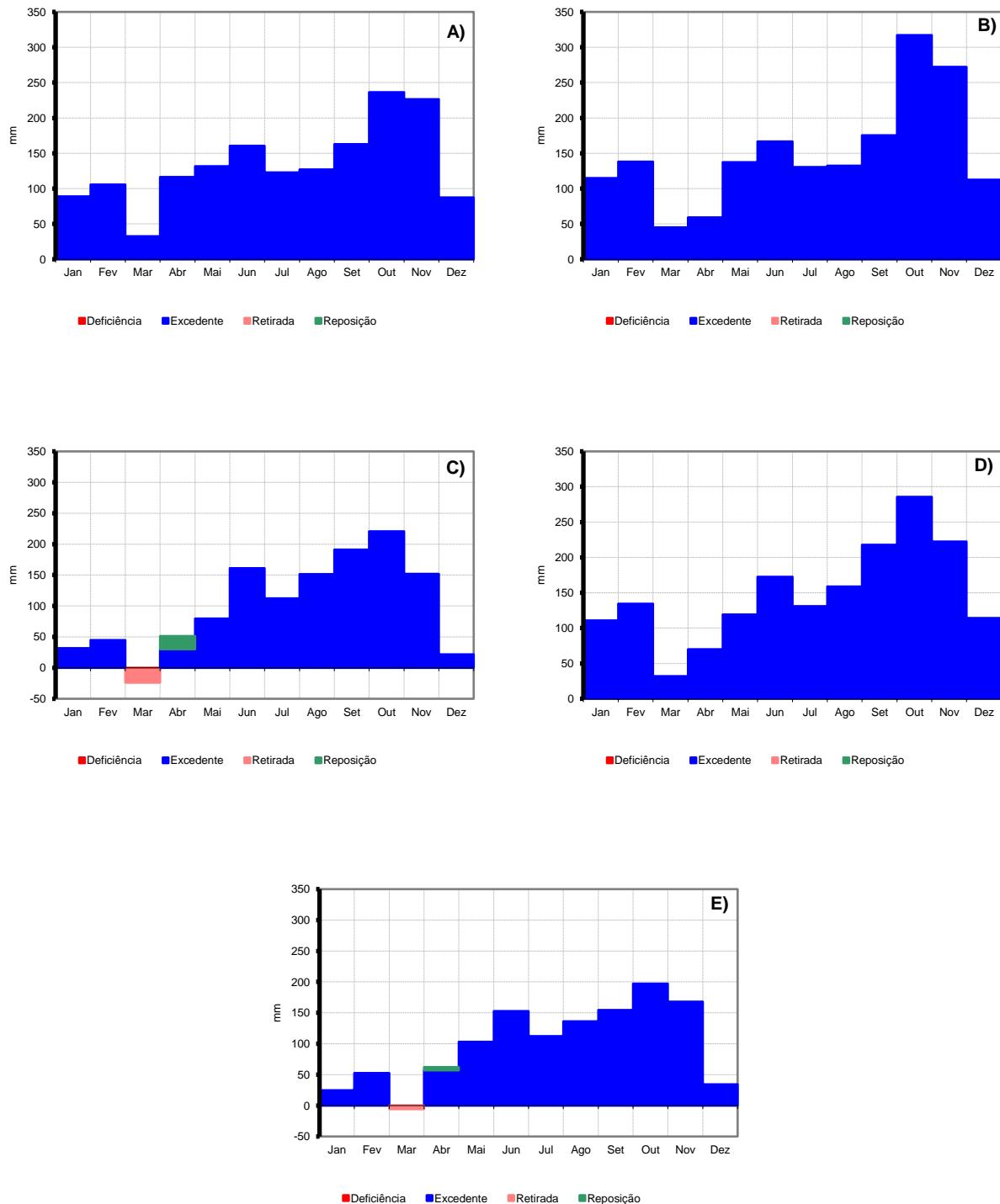


Figura 27 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2041-2070, do cenário futuro – o RCP (8.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).

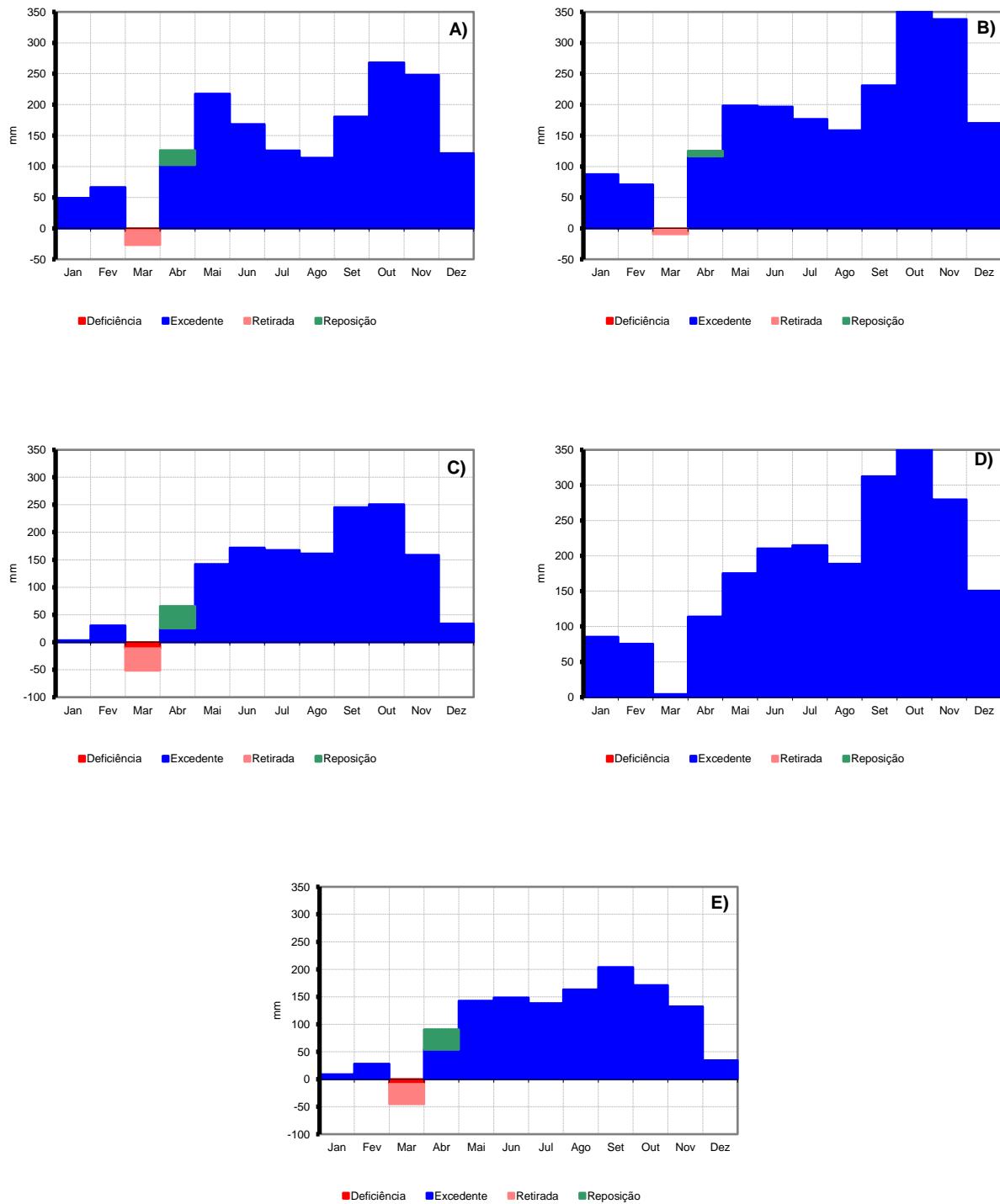


Figura 28 - Balanço Hídrico Climatológico da cultura do milho, no período de 2071-2100, do cenário futuro – o RCP (8.5), para Cruz Alta (A), Iraí (B), Campo Bom (C), Cambará do Sul (D) e Pelotas (E), respectivamente – RS, com CAD de 100 mm. Deficiência (barra vermelha), Excedente (barra azul), Retirada (barra laranja) e Reposição (barra verde).

5 Conclusões

Pode-se concluir, com base nos resultados encontrados, que:

- Dentre os produtores de milho localizados em regiões distintas do Estado no Rio Grande do Sul no período de 1981-2018, destacam-se os municípios de Cruz Alta, Iraí, Campo Bom, Cambará do Sul e Pelotas.
- A análise da distribuição da produção e do rendimento médio do milho no RS para o período de 1981-2018 apontou que a quebra de safra nos anos de 2005, 2009 e 2012, pode estar associado a eventos de estiagem que acometeram o Estado, devido à atuação intensa dos ENOS.
- Dentre os cinco municípios analisados, nota-se que Cruz Alta deteve a maior quantidade produzida e rendimento de produção, ao passo que Pelotas passou a assumir o pior rendimento nesse período, mesmo ocupando a segunda posição de produção. Campo Bom e Cambará do Sul que indicavam quantidades muito pequenas de produção em quase todo o período analisado, asseguraram uma significativa produtividade. Iraí, que detinha uma produção intermediária, revelou-se com potencial para alcançar a segunda maior produtividade. Porém, com as possíveis modificações futuras do comportamento médio do regime edafoclimático nessas regiões, poderá haver ainda uma variação quantitativa e qualitativa da cultura do milho.
- O estudo do balanço hídrico climatológico mostrou que no cenário atual já existem limitações quanto ao uso dos recursos hídricos nos municípios de Campo Bom e Pelotas, nos meses de dezembro e janeiro, quando a maioria das lavouras de milho do Estado encontra-se no período crítico, ou seja, do pendoamento ao início de enchimento de grãos para as safras de verão. Uma curta estiagem, acompanhada de uma alta demanda evaporativa atmosférica, pode causar prejuízos às lavouras e, por isso, é importante que o período de maior sensibilidade da cultura seja bem caracterizado para que se possa dimensionar esses impactos de estiagem no rendimento e para adoção de práticas de manejo

adequadas. Cruz Alta, Iraí e Cambará do Sul não apresentaram déficit hídrico e, então, são mais indicados para o cultivo do milho. Quanto ao balanço hídrico da cultura, os déficits hídricos foram indicados também apenas para Campo Bom e Pelotas.

- Dentre os modelos de circulação global analisados do CMIP5, o HadGEM-2-ES apresentou o melhor desempenho, sendo então utilizado para fornecer os dados mensais necessários de temperatura média do ar e precipitação total para o cálculo do balanço hídrico climatológico futuro. Os menores erros da temperatura média mensal foram de aproximadamente 1°C para Cruz Alta e Pelotas, e 2°C para Cambará do Sul, estando assim dentro da margem de erro prevista para essa variável. Quanto à precipitação média mensal, o mesmo mostrou o menor EMA para Cruz Alta, Iraí e Campo Bom. No entanto, chegou a indicar acumulados mensais de até 70 mm, valor este bastante elevado, capaz de representar mais de 50% da chuva esperada em determinados meses. Como o cálculo do BHC futuro é feito a partir dos dados de precipitação fornecidos pelo modelo, este tende a reproduzir erroneamente informações importantes para a previsão de disponibilidade hídrica futura, indicando então a necessidade de aprimoramentos do modelo para melhor representação dessa variável.
- Na análise do clima futuro, verificou-se que até o final do século haverá um aumento de precipitação pluvial e da temperatura do ar, com menor intensidade no cenário 4.5, e maior intensidade no cenário 8.5, a qual Cambará do Sul apresentará os maiores valores dessas variáveis. Para este município, no cenário 4.5, em ambos os períodos (2041-2070 e 2071-2100), a precipitação total anual estimada deve ser de aproximadamente 2400 mm, e a temperatura média anual por volta de 19°C. Já para o cenário 8.5, até o final do século, os valores anuais de precipitação estimada será de 3040 mm, e temperatura média do ar de 20.3°C. Mesmo com esse aumento, o município ainda estará dentro dos padrões ideais de temperatura e precipitação para o cultivo do milho.

- O cálculo do balanço hídrico climatológico futuro mostra que Campo Bom deverá indicar déficit hídrico de aproximadamente 4 mm para o cenário 4.5, em ambos os períodos (2041-2070 e 2071-2100), e Pelotas de 0,5 mm apenas em 2071-2100. Como os déficits hídricos passam a ocorrer principalmente entre os meses de janeiro a março, estes tendem a ser mais prejudiciais para a segunda safra, pois a cultura se encontra na sua fase de estabelecimento e vegetativa, necessitando de condições ideais de disponibilidade de água no solo. Para a primeira safra, neste período, a cultura está na sua fase de maturação fisiológica, e pela necessidade de reduzir a umidade dos grãos, o déficit hídrico não traria danos ou perdas na colheita.
- No cenário 8.5, apenas Campo Bom e Pelotas devem exibir déficit hídrico no período de 2041-2070, aproximadamente 5 e 0,5 mm, respectivamente. Com exceção de Cambará do Sul, em 2071-2100, todas as outras localidades apresentam esse problema entre os meses de fevereiro e março, havendo risco apenas para as segundas safras, que neste período encontram-se nos seus primeiros estádios de desenvolvimento. O déficit hídrico é intensificado principalmente para Campo Bom e Pelotas, que passam indicar valores de 33,9 mm e 28,8 mm, respectivamente. O cálculo do balanço hídrico da cultura confirma o déficit hídrico para o milho assim como o cálculo do BHC potencial nas projeções futuras, porém em proporções menores e, com exceção de Pelotas, que no cenário 4,5 (2071-2100), neste caso, passa a não indicar déficit hídrico.
- Embora a aplicabilidade do HadGEM-2-ES apresente um potencial de uso relevante para fornecer informações representativas das projeções futuras do BHC, algumas incertezas foram percebidas levando em consideração as informações de precipitação como variável de entrada do modelo. Para melhores resultados, seria pertinente aplicar medidas de correção dos erros sistemáticos, que seriam melhor identificados caso abrangesse outros pontos de grade no Rio Grande do Sul, com uma suficiência amostral maior do que a apresentada nesse estudo. Isso provocaria um aumento na quantidade de simulações e facilitaria na identificação de tais erros. Outro ponto essencial seria na utilização de dados de

precipitação provenientes de estações automáticas, pois para o cálculo do BHC, que contempla longos períodos de observações, o uso das Normais Climatológicas pode não ser satisfatório.

6 Referências

AGRIANUAL 2009: Anuário da agricultura brasileira. **São Paulo**: FNP Consultoria e comércio. 2009. p.384.

AGRIANUAL 2009: Anuário da agricultura brasileira. **São Paulo**: FNP Consultoria e comércio. 2009. p.384.

ALBUQUERQUE. P.E.P. de. **Requerimento de água das culturas para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação localizada**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2000. 54p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, I).

ALBUQUERQUE. P.E.P. de. **Requerimento de água das culturas para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação localizada**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2000. 54p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, I).

ALLEN, Richard G. et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 1-2, p. 1-22, 2006.

ALLEN, Richard G. et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 1-2, p. 1-22, 2006.

ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2005. 185f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos.

ANDRÉA, M. C. da S. **Model-based approach for maize yield gap analysis related to climate variability and nitrogen management**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ANDRÉA, M. C. da S. **Model-based approach for maize yield gap analysis related to climate variability and nitrogen management.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ANJOS, Ritielle Rodrigues et al. Análise de tendência de temperatura e precipitação e cenários de mudanças climáticas para Pelotas (RS). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 8, p. 93-108, 2018.

ASSAD, Eduardo Delgado et al. Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica, pesquisa e desenvolvimento. **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2008.

ASSAD, Eduardo Delgado et al. Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica, pesquisa e desenvolvimento. **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2008.

ÁVILA, AMH de et al. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha, Porto Alegre**, v. 2, n. 2, p. 149-154, 1996.

ÁVILA, AMH de et al. Probabilidade de ocorrência de precipitação pluvial mensal igual ou maior que a evapotranspiração potencial para a estação de crescimento das culturas de primavera-verão no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha, Porto Alegre**, v. 2, n. 2, p. 149-154, 1996.

BARROS, Vinicius R. et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BARROS, Vinicius R. et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**, v. 2, p. 25-32, 1992.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**, v. 2, p. 25-32, 1992.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima.** Porto Alegre: Emater/RS, 2014. 84 p.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima.** Porto Alegre: Emater/RS, 2014. 84 p.

BERGAMASCHI, Homero et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 1, p. 23-7, 2001.

BERGAMASCHI, Homero et al. Estimating maize water requirements using agrometeorological data. **Revista Argentina de Agrometeorología**, v. 1, n. 1, p. 23-7, 2001.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, p. 11-23, 1992.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, p. 11-23, 1992.

BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. p. 95.

BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. p. 95.

BLANC, E. The Impact of Climate Change on Crop Yields in Sub-Saharan Africa. **American Journal of Climate Change**, v.1, p.1-13, 2012.

BLANC, E. The Impact of Climate Change on Crop Yields in Sub-Saharan Africa. **American Journal of Climate Change**, v.1, p.1-13, 2012.

BRAZ, Dejanira Ferreira. **Impacto de eventos severos na agricultura do Rio Grande do Sul**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

BRAZ, Dejanira Ferreira. **Impacto de eventos severos na agricultura do Rio Grande do Sul**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

BRESOLIN, Miguel; VIOLA, Eniltur Anes. milho no contexto mundial, nacional e do Rio Grande do Sul; [maizen el contexto mundial, Nacional y delsur del Rio Grande], [maize in the world context, national and of South of Rio Grande]. **Série realidade rural**, v. 18, 1995.

BRESOLIN, Miguel; VIOLA, Eniltur Anes. milho no contexto mundial, nacional e do Rio Grande do Sul; [maizen el contexto mundial, Nacional y delsur del Rio Grande], [maize in the world context, national and of South of Rio Grande]. **Série realidade rural**, v. 18, 1995.

BRITO, F. P., BARLETTA, R., MENDONÇA, M. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno el niño oscilação sul. **Revista Brasileira de Climatologia**. p. 37- 48. Ago. 2008.

BRITO, F. P., BARLETTA, R., MENDONÇA, M. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno el niño oscilação sul. **Revista Brasileira de Climatologia**. p. 37- 48. Ago. 2008.

BRITTO, F.; BARLETTA, R.; MENDOÇA M. Regionalização Sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatología**, ISSN 1980-0055X, Associação Brasileira de Climatologia, Presidente Prudente, SP. v. 2, n 2, p. 35-51, 2006.

BRITTO, F.; BARLETTA, R.; MENDOÇA M. Regionalização Sazonal e mensal da precipitação pluvial máxima no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Climatología**, ISSN 1980-0055X, Associação Brasileira de Climatologia, Presidente Prudente, SP. v. 2, n 2, p. 35-51, 2006.

BROWN, L.; FLAVIN, C.; FRENCH, H. **Estado mundo 2000**. Tradução. H. Mallett. Salvador: UMA Editora, 2000. p. 288.

BROWN, L.; FLAVIN, C.; FRENCH, H. **Estado mundo 2000**. Tradução. H. Mallett. Salvador: UMA Editora, 2000. p. 288.

CAMARGO, A.P. Balanço hídrico do Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto Agronômico de Campinas**, 116: 1-24, 1971.

CAMARGO, A.P. Balanço hídrico do Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto Agronômico de Campinas**, 116: 1-24, 1971.

CARLESSO, R.; PETRY, M. T. ROSA, GM da & ALMEIDA, MZ Controle total: o manejo da irrigação usando estações meteorológicas automáticas, computadores e comunicação via internet garante precisão e menos despesas. **Cultivar Máquinas, Pelotas**, v. 16, n. 3, p. 20-23, 2003.

CARLESSO, R.; PETRY, M. T. ROSA, GM da & ALMEIDA, MZ Controle total: o manejo da irrigação usando estações meteorológicas automáticas, computadores e comunicação via internet garante precisão e menos despesas. **Cultivar Máquinas, Pelotas**, v. 16, n. 3, p. 20-23, 2003.

CARVALHO, C.; VENCATO, A.Z.; KIST, B.B.; SANTOS, C.; REETZ, E.R.; POLL, H.; BELING, R.R. **Anuário Brasileiro do Milho 2011**. Santa Cruz do Sul, Ed. Gazeta Santa Cruz, 2011. p. 128.

CARVALHO, C.; VENCATO, A.Z.; KIST, B.B.; SANTOS, C.; REETZ, E.R.; POLL, H.; BELING, R.R. **Anuário Brasileiro do Milho 2011**. Santa Cruz do Sul, Ed. Gazeta Santa Cruz, 2011. p. 128.

CARVALHO, DF de et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 108-116, 2006.

CARVALHO, DF de et al. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 108-116, 2006.

CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: uma proposta de classificação qualitativa. **Geografia**, Londrina, v.13, n.1, p.57-71. 2004.

CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. **Contribuição ao estudo do balanço hídrico no Estado do Paraná: Uma proposta de classificação qualitativa**. Geografia, Londrina, v.13, n.1, p.57-71, 2004.

CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná: uma proposta de classificação qualitativa. **Geografia**, Londrina, v.13, n.1, p.57-71. 2004.

CARVALHO, S. M.; STIPP, N. A. F. **Contribuição ao estudo do balanço hídrico no Estado do Paraná: Uma proposta de classificação qualitativa**. Geografia, Londrina, v.13, n.1, p.57-71, 2004.

CASTILLO, Alejandro Campos. **Efeito das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento de grãos da cultura da soja na bacia do rio Potiribu**, Rio Grande do Sul. 2016.

CASTILLO, Alejandro Campos. **Efeito das mudanças climáticas sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento de grãos da cultura da soja na bacia do rio Potiribu**, Rio Grande do Sul. 2016.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – ESALQ/USP. **PIB do agronegócio brasileiro**. Piracicaba: CEPEA/ESALQ/USP, 2019. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br>. Acesso em: 10 out. 2020.

CLIMANÁLISE. **Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, Cachoeira Paulista, SP, INPE/CPTEC, v. 16, n. 10, p. 3-27, 2001.

CMIP: Coupled Model Intercomparison Project. Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip>. Acesso em: 20 out. 2019.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011.

COLLISCHONN, B.; Louzada, José A. S..**Impacto potencial de mudanças climáticas sobre as necessidades de irrigação da cultura do milho no RS**. REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina, v. 8, p. 19-30, 2011.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: V6 – Safra 2018/2019. Quarto levantamento, janeiro de 2019 – safra 2018/2019. **Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento.** 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 05 ago. 2019.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Safra Brasileira de Grãos. Abril de 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 30 de mai. 2018.

COSTA, M. H. **Balanço hídrico segundo Thornthwaite e Mather (1955).** Viçosa: UFV, 1994. 20p.

COUTINHO, M. D. L; MORAIS, M. D. C. Balanço Hídrico da Climatologia Média e de Cenários Climáticos em São José de Mipibu – RN. Revista **Brasileira de Geografia Física**, n. 3, p. 694-707. 2012.

CRUZ, J.C.; FILHO, I.A.P; GARCIA, J.C.; DUARTE, J. DE.O. Cultivo do milho: cultivares. **Embrapa Milho e Sorgo.** Sistema de Produção, 1 - Versão Eletrônica - 4.ed. 2008.

CUADRA, S. V. et al. Impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico climático no estado do Rio Grande do Sul. **Embrapa Clima Temperado-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E),** 2017.

DE SOUZA, CARLOS HENRIQUE EITERER et al. Extratores para fósforo disponível em Latossolos e eficiência de fontes fosfatadas para milho cultivado em vaso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 1, p. 38-46, 2011.

DJAMAN, K.; IRMAK, S. Actual crop evapotranspiration and alfalfa – and grass-reference crop coefficients of maize under full and limited irrigation and rainfed conditions. Estimation of FAO evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 139, p. 433- 446, 2013.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas.** Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Irrigação e drenagem, 33). Tradução de H.R. Gheyi, A.A. de Souza, F.A.V. Damasco, J.F. de Medeiros.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements, Rev. edn. **Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome**, 1977.

DOURADO N. D.; LIER, Q. J. V. **Programa para elaboração do balanço hídrico para culturas anuais e perenes.** Piracicaba : Departamento de Agricultura da ESALQ/USP, 1991. 58 p. (Apostila).

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Melhor época para o milho no RS e SC**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/38316857/melhor-epoca-para-o-milho-no-rs-e-sc>. Acesso em: 10 jun. 2019.

EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A. da; TEIXEIRA, M. C. C. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul**: Safras 2013/2014 e 2014/2015. Brasília, DF: Embrapa, 2013. p. 124.

EYRING, Veronika et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 8, n. 12, 2015.

FANCELLI, A. L. Fisiologia das plantas de milho em condições de segunda safra. In: SHIOGA, P.; BARROS, A. S. do R. (coord.). **A cultura do milho segunda safra**. Londrina: IAPAR, 2001, pp. 11 – 31.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. **Produção de milho. Guaíba: Agropecuária**, p. 21-54, 2000.

FAOSTAT. **Séries temporais e dados transversais relativas à alimentação e à agricultura para cerca de 200 países**.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, Pakistan, v. 29, n. 1, p. 185-212, 2009.

FIGUEREDO JÚNIOR, Luis Gonzaga Medeiros de. **Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho no estado de São Paulo**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FISRWG (FEDERAL INTERAGENCY STREAM RESTORATION WORKING GROUP). **Stream corridor restoration: principles, processes, and practices**. FISRWG: Natural Resources Conservations Service (USDA), 1998. p. 637.

FLATO, Gregory et al. Evaluation of climate models. In: **Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2014. p. 741-866.

FOCCHEZZATO, A.; GRANDO, M. Z. Efeitos da estiagem na economia do Rio Grande do Sul: uma abordagem multisectorial. Textos para Discussão FEE nº 62. Secretaria do Planejamento e Gestão Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Porto Alegre, p.21, 2009.

- FONTANA, D. C.; ALMEIDA, TS de. Climatologia do número de dias com precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 10, n. 1, p. 135-145, 2002.
- FORNASIERI, F. D. Manual da cultura do milho. **Funep, Jaboticabal-SP cap**, v. 7, p. 457, 2007.
- FREVERT, Donald K.; HILL, Robert W.; BRAATEN, Bruce C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.
- GALON, Leandro et al. Influência dos fatores abióticos na produtividade da cultura do milho. **Revista Tropica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 4, n. 3, 2011.
- GRIFFIES, Stephen M. et al. The GFDL CM3 coupled climate model: characteristics of the ocean and sea ice simulations. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3520-3544, 2011.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El-Niño and La-Niña events. **Journal of Climate**, v.13, p.35-58, 2000.
- HAMADA, Emilia et al. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do século XXI. **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna**, p. 41-74, 2011.
- HAYES, G. I.; BUELL, Jesse H. Water and our forests: trees also need water at the right time and place. **Hater Yearbook, USDA**, v. 1955, p. 219-228, 1955.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: **Climate Change 2007: The physical science basis**. Cambridge, v. 18 p. 2007.
- IPCC, Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 2014. Geneva, Switzerland, 2014. 104 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>. Acesso em: 20 de jan. 2020.
- JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture & Biology**. [S.L], v. 11, n. 1, p. 100-105, 2009.
- JONES, H.G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 428p.
- KUNZ, R. P. **Produtividade do milho em função do arranjo e da população de plantas no sistema de plantio direto na palha. 2005, 115p.** 2005. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.

- LEITE, J. G. D. B.; FEDERIZZI, L. C.; BERGAMASCHI, H. Mudanças climáticas e seus possíveis impactos aos sistemas agrícolas no Sul do Brasil. **Ciências Agrárias**, v. 7, n. 2, p. 337-343, 2012.
- LIBERATO, A. M.; BRITO, J. I. B. Influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, n.3, p.170-180, 2010.
- LIMA, José R. de S. et al. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, n. 1, p. 89-95, 2006.
- Lorensi, R. P., Zardo K., Mattar D. M. P. & Nishijima T. A utilização dos recursos hídricos no sistema de irrigação por superfície (inundação) na cultura do arroz mediante as normatizações. **Ambiência, Guarapuava**, v.6, n.2, p.355 – 364, Maio./Ago. 2010.
- MANFRON, P.A. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, p. 333-342, 2003.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos avançados**, v. 22, n.63, p.83-96. 2008.
- MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H. S.; ZEE, D. M. W. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. 76 p.
- MATOS, M. J. L. F. et al. Milho verde. **Brasília: Embrapa Hortaliças**, 2007.
- MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002.
- MATZENAUER, R.; SUTILI, V. R. A água na cultura do milho. **IPAGRO Informa, Porto Alegre**, n. 26, p. 17-32, 1983.
- MATZENAUER, Ronaldo et al. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 85-92, 1995.
- MEDEIROS, Almíro Tavares. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas. **Paraipaba, Ce**, v. 103, 2002.
- MELO, Tirzah Moreira de. Simulação estocástica dos impactos das mudanças climáticas sobre as demandas de água para irrigação na região noroeste do Rio Grande do Sul. 2015.
- MELO, Tirzah Moreira. **Avaliação estocástica dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura na região noroeste do Estado Rio Grande do Sul**. 2013. 94f. Exame de Qualificação (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

- MIRANDA, R. A. de. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v. 74, n. 829, p. 24-27, jan. 2018.
- MONTEIRO, José Eduardo et al. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. 2009.
- MORAES, A. R. A. de; Instituto Agronômico de Campinas-Centro Avança do de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Grãos e Fibras, 2009.
- NASCIMENTO, Flávia Meinicke et al. Produtividade de genótipos de milho em resposta à época de semeadura. **Ceres**, v. 58, n. 2, 2015.
- NEDEL, A.; SAUSEN, T.; SAITO, S. Zoneamento dos desastres naturais ocorridos no estado do Rio Grande do Sul no período 2003-2009 – Parte I: Seca. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, PA. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém. PA: SBMET. p. 1-5, 2010.
- NOBRE, Paulo et al. Climate simulation and change in the Brazilian Climate Model. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6716-6732, 2013.
- NOGUEIRA, D.B. **Aptidão Edafoclimática do Milho de Sequeiro em Diferentes Cenários de Pluviometria no Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.
- OLIVEIRA, AD de. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência utilizando dados de uma estação meteorológica convencional e automática. 2003**. 2003. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária. Universidade de São Paulo, Jaboticabal.
- OLSON, David A.; JUNKER, Norman W.; KORTY, Brian. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC. **Weather and Forecasting**, v. 10, n. 3, p. 498-511, 1995.
- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. p. 440.
- ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, MBP de. Influência dos fatores climáticos na produção. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Potafos, v. 249, 1987.
- PEREIRA, A.P; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Lavras: Agropecuária, 2002. 478p.
- PEREIRA, Antonio Roberto et al. Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 51-56, 2002.
- PEREIRA, Antonio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. Meteorologia agrícola. **Departamento de Ciências Exatas**, p. 173, 2007.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo César. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. 2002". Guaíba: Agropecuária, 478p.

PEREIRA, Antonio Roberto; PRUITT, William Oregon. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 66, n. 3, p. 251-257, 2004.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola**, v. 16, n. 4, p. 118-143, 1997.

RAO, V. B.; HADA, K. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with southern oscillation. **Theoretical and Applied Climatology**, v.42, p.81-91, 1990.

RASERA, G.; CAMPOS, R.J. Análise Sazonal das Regiões do Rio Grande do Sul Atingidas por Eventos Severos Gerados por CCM no Período de 2004 a 2008. **Anuário do Instituto de Geociências– UFRJ**, v. 36, n.2, p. 61-69, 2013.

RAY, Jeffery D.; SINCLAIR, Thomas R. Stomatal closure of maize hybrids in response to drying soil. **Crop Science**, v. 37, n. 3, p. 803-807, 1997.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria**, v. 1, p. 114-133, 2001.

RITCHIE, S. W. et al. Howacorn plant develops. **Ames: Iowa State University of Science and Technology**, 1993.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI V. Planilhas no ambiente excel™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, seqüencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

ROSA, LUIS M.; DILLENBURG, LUCIA R.; FORSETH, IRWIN N. Responses of soybean leaf angle, photosynthesis and stomatal conductance to leaf and soil water potential. **Annals of Botany**, v. 67, n. 1, p. 51-58, 1991.

SANS.A.M.L; SANTANA.P.D..Sistemas de produção. Embrapa milho e sorgo, 2001. Disponível em: <http://www.embrapa.br>. Acesso em: 05 set. 2019.

SANTOS, D. L.; SENTELHAS, P. C. Climate Change Scenarios and Their Impact on the Water Balance of Sugarcane Production Areas in the State of São Paulo, Brazil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 7-17. 2012.

SANTOS, Reginaldo Ferreir; CARLESSO, Reimar. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SENTELHAS, Paulo Cesar et al. BHBRAZIL: balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. **Piracicaba: Esalq/USP**, 1999.

SIDRA: (Sistema IBGE de Recuperação Automática). Disponível em:<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. Acessado em: 06 nov. 2019

TAYLOR, Karl E.; STOUFFER, Ronald J.; MEEHL, Gerald A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485-498, 2012.

TESTEZLAF, R. **Irrigação**: métodos, sistemas e aplicações. Campinas: UNICAMP, 2011. 204 p.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Laboratory of Climatology, Publ. No. 8. 1955.

THORNTHWAITE, Charles W. et al. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TOLEDO, L. B. et al. Balanço hídrico de Altamira-PA. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. 2002.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia Descritiva. Fundamentos e Aplicações Brasileiras**. 1° ed. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 1983. 374p.

TUNDISI, José Galizia. Água no século XXI: enfrentando a escassez. In: **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2003.

UNITED NATIONS. World Population Prospects 2019 - **Highlights**. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acessado em: 10 out. 2020.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, Klaus. Evaporação e evapotranspiração. **Engenharia Hidrológica**, 1989.

VILLELA, H. A. S.; MATOS, A. **Hidrologia Aplicada-SM**; MATOS, A. Editora McGraw-Hill. **São Paulo**, 1975.

WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Science**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2006. 648p. ISBN 978-0-12-751966-1.

WILLMOTT, C. J.; ROWE C.M.; MINTZ Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, 1985. v. 5, p. 589-606.

WOLFE, D. W. et al. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. **Agronomy Journal**, v. 80, n. 6, p. 865-870, 1988.

ŽALUD, Zdeněk et al. Impacts of water availability and drought on maize yield—A comparison of 16 indicators. **Agricultural water management**, v. 188, p. 126-135, 2017.