

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**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**

ALEJANDRO CAMPOS CASTILLO

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental**

Porto Alegre, maio de 2016

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação dos professores José Antônio Saldanha Louzada e Ricardo Wanke de Melo, ambos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Estudantes-Convênio de Pós-Graduação – PEC-PG, da CAPES/CNPq- Brasil.

AGRADECIMENTOS

A minha família e amigos por toda sua energia positiva e seu amor.

Ao professor José Antônio Louzada por todo o apoio durante a realização deste trabalho.

A Jones da Silva e Erick Sebadelhe por me ajudar a conseguir os dados de entrada para realizar as simulações.

A Lina Bonilla por suas dicas sobre como administrar o tempo nas diferentes etapas do projeto.

A Juliana Lisboa, Carlos Fernández e a sua família por toda a ajuda e o carinho que me deram desde que cheguei no Brasil.

RESUMO

O impacto das mudanças climáticas sobre o rendimento e a demanda de água para irrigação das culturas dependerá da direção e magnitude das mudanças nos regimes de temperatura e precipitação, assim como da capacidade de cada cultura para assimilar o aumento da concentração atmosférica de CO₂.

Neste trabalho, o modelo agro-hidrológico AquaCrop Versão 4.0 foi calibrado satisfatoriamente para simular o rendimento de grãos de soja na bacia do rio Potiribu, Rio Grande do Sul. O modelo calibrado foi utilizado para avaliar os efeitos das mudanças de temperatura, precipitação e concentração de CO₂ sobre o rendimento de grãos e a demanda de água para irrigação dessa cultura.

O modelo foi calibrado a partir da comparação entre rendimentos simulados e observados em um histórico de dez safras do período 2003/2004 – 2012/2013. Posteriormente, o rendimento foi simulado para um conjunto de dez safras do período 2046/2047 – 2055/2056, assumindo quatro diferentes projeções climáticas. Duas projeções climáticas corresponderam às do modelo de circulação global CCCMA CGCM3.1 para os cenários de emissões A1B e B1. As outras duas projeções corresponderam às do modelo CNRM-CM3 para os mesmos dois cenários de emissões.

Para as quatro projeções climáticas assumidas, os resultados das simulações com o modelo AquaCrop Versão 4.0 revelaram que o rendimento médio de grãos de soja para o período 2046/2047 – 2055/2056 aumentará em comparação com a média do período 2003/2004 – 2012/2013. Além disso, os resultados indicaram que a demanda de água para irrigação diminuirá. Isso ocorreu devido a três razões. Primeiro, o incremento da concentração atmosférica de CO₂ aumentou a eficiência do uso da água por parte da cultura. Em segundo lugar, o incremento ou melhor distribuição temporal da precipitação durante o ciclo de crescimento diminuíram o estresse hídrico da cultura em comparação com o período de referência (2003/2004 – 2012/2013). Por último, as mudanças das temperaturas máximas e mínimas não causaram estresse térmico da cultura.

Finalmente, a contribuição do efeito estimulador do CO₂ sobre o incremento do rendimento médio foi estimada na faixa de 428 a 600 kg/ha.

ABSTRACT

The impact of climate change on crop yields, and on crop irrigation water demands will depend on the direction and magnitude of the changes. These changes include: variations in temperature and rainfall patterns, and higher concentrations of CO₂ in the atmosphere.

In this study, the agro-hydrological model AquaCrop Version 4.0 was successfully calibrated to simulate soybean yield in the Potiribu River watershed, located in the Rio Grande do Sul state. The calibrated model was used to assess the impact of changes in temperature, rainfall and CO₂ concentration on the crop yield and on the net irrigation water requirement.

The model was calibrated comparing simulated and observed yields, in a set of ten growing cycles during the period 2003/2004 – 2012/2013. Then, the crop yield was simulated for a new set of ten growing cycles for the period 2046/2047 – 2055/2056. For the latter period, four different climate projections were assumed. Two projections were based on the global circulation model CCCMA CGCM3.1, for the A1B and the B1 emission scenarios. The other two projections were based on the global circulation model CNRM-CM3, for the same two emission scenarios.

For all the assumed climate projections, the results of the agro-hydrological simulations disclosed an increase in the average crop yield for the period 2046/2047 – 2055/2056, compared to the average yield of the period 2003/2004 – 2012/2013. In addition, the results revealed a reduction in the net irrigation water requirement. These findings were due to three reasons. First, the increase in the atmospheric CO₂ concentration enhanced the crop water use efficiency. Second, the increase or better temporal distribution of rainfall during the growing cycle reduced the incidence of water stress. Last, the changes in maximum and minimum air temperatures did not cause thermal stress during the growing cycle.

Finally, the contribution of the stimulating effect of elevated CO₂ on the average crop yield increment was estimated in the range 428 – 600 kg/ha.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVO	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Modelos climáticos e mudanças climáticas projetadas para a região sul do Brasil .	14
3.2.	Simulação agro-hidrológica no Brasil	15
3.3.	Antecedentes sobre estimativa do rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul	17
3.4.	Efeitos do estresse hídrico sobre o rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul	18
3.5.	Efeitos do estresse térmico sobre o rendimento de grãos de soja	20
3.6.	Efeitos potenciais do aumento da concentração atmosférica de CO ₂ sobre o rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul.....	21
3.7.	Estimativas da demanda de água para irrigação da soja no Rio Grande do Sul	23
3.8.	Caracterização das cultivares da soja utilizadas no Rio Grande do Sul pelo índice de colheita	24
4.	METODOLOGIA	26
4.1.	Área de estudo.....	26
4.2.	Modelo AquaCrop Versão 4.0	29
4.2.1.	Expansão e declínio do dossel.....	29
4.2.2.	Transpiração da cultura.....	32
4.2.3.	Produção de biomassa e formação do rendimento	34
4.2.4.	Ajuste da eficiência do uso da água (WP) pela concentração atmosférica de CO ₂	36
4.2.5.	Ajuste do índice de colheita (HI) pelos estresses hídrico e térmico	37
4.2.6.	Expansão da zona de raízes.....	41
4.2.7.	Evaporação do solo.....	42
4.2.8.	Balanco hídrico no solo	43
4.2.9.	Determinação da demanda de água para irrigação	46
4.3.	Dados meteorológicos para a calibração do modelo	47
4.4.	Parametrização do solo	49
4.5.	Parametrização da cultura	50
4.6.	Calibração	51
4.7.	Projeções climáticas assumidas.....	53
4.8.	Efeito isolado do CO ₂ sobre o rendimento de grãos de soja	56
4.9.	Irrigação	57
4.10.	Testes de hipóteses para comparação de médias.....	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59

5.1.	Calibração do modelo	59
5.2.	Mudanças climáticas esperadas durante os ciclos da cultura da soja para o período 2046/2047 - 2055/2056, em comparação com o histórico 2003/2004 - 2012/2013	60
5.3.	Ajuste da eficiência do uso da água (WP) pela concentração atmosférica de CO ₂ ..	65
5.4.	Efeito das mudanças climáticas sobre o rendimento de grãos de soja	65
5.5.	Efeito das mudanças de temperatura e precipitação sobre a demanda de água para irrigação.....	67
5.6.	Efeito isolado do CO ₂ sobre o rendimento de grãos de soja.....	69
5.7.	Comparação de médias pelo teste de Mann - Whitney	70
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	72
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1.1. Localização da bacia do rio Potiribu	26
Figura 4.1.2. Valores médios, mínimos e máximos da precipitação mensal do posto pluviométrico de Cruz Alta - RS	27
Figura 4.1.3. Produção de soja em grão (média 2009 – 2011) no Rio Grande do Sul	28
Figura 4.2.1.1. Variação do coeficiente de estresse hídrico para expansão foliar ($K_{s_{exp,w}}$) em função do nível de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0	31
Figura 4.2.2.1. Variação do coeficiente de estresse hídrico para fechamento de estômatos ($K_{s_{sto}}$) em função do nível de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0.....	33
Figura 4.2.2.2. Variação do coeficiente de estresse hídrico por saturação do solo ($K_{s_{aer}}$) em função do conteúdo volumétrico de água no solo (θ), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0	33
Figura 4.2.3.1. Variação do coeficiente de estresse térmico (K_{s_b}) em função da soma térmica, dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0.....	35
Figura 4.2.3.2. Esquema de cálculo da formação do rendimento pelo modelo AquaCrop Versão 4.0.....	36
Figura 4.2.5.1. Variação do coeficiente de estresse hídrico para a polinização ($K_{s_{pol,w}}$) em função do nível de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0	39
Figura 4.2.5.2. Variação dos coeficientes de estresse térmico por frio ($K_{s_{pol,c}}$) e por calor ($K_{s_{pol,h}}$) para a polinização em função da temperatura, dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0.....	40
Figura 4.2.8.1. Esquema de cálculo do balanço hídrico no solo pelo modelo AquaCrop Versão 4.0.....	44
Figura 5.1.1. Relação entre rendimentos observados e simulados para dez safras da cultura da soja (2003/2004 - 2012/2013) na bacia do rio Potiribu, assumindo como data de semeadura o dia 15 de novembro.....	60

- Figura 5.2.1. Precipitação total média durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1 62
- Figura 5.2.2. Número médio de dias de precipitação durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1 63
- Figura 5.2.3. Temperatura máxima média durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1 64
- Figura 5.2.4. Temperatura mínima média durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1 64
- Figura 5.4.1. Rendimento médio de grãos de soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1 66
- Figura 5.5.1. Demanda de água para irrigação média da cultura da soja calculada para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1 68
- Figura 5.6.1. Rendimento médio de grãos de soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1, considerando e sem considerar aumento da concentração atmosférica de CO₂..... 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.2.1.1. Parâmetros que descrevem a expansão e declínio do dossel utilizados nas simulações	31
Tabela 4.2.2.1. Parâmetros que descrevem a transpiração da cultura utilizados nas simulações	34
Tabela 4.2.3.1. Parâmetros que descrevem a produção de biomassa e a formação do rendimento utilizados nas simulações.....	35
Tabela 4.2.5.1. Parâmetros que descrevem o ajuste do índice de colheita utilizados nas simulações	41
Tabela 4.2.6.1. Parâmetros que descrevem a expansão da zona de raízes utilizados nas simulações	42
Tabela 4.3.1. Resumo dos dados meteorológicos para cada ciclo da cultura utilizado na calibração do modelo	49
Tabela 4.4.1. Parâmetros da curva de retenção de água no solo utilizados como base nas simulações	50
Tabela 4.4.2. Características hidráulicas do solo utilizadas nas simulações	50
Tabela 4.5.1. Parâmetros que descrevem a fenologia da cultura utilizados nas simulações....	51
Tabela 4.6.1. Dados de rendimento de grãos de soja (kg/ha) utilizados para a construção do histórico de rendimentos da bacia do rio Potiribu	52
Tabela 4.7.1. Dados climáticos utilizados para simular cada ciclo da cultura da soja do período 2046/2047 – 2055/2056, de acordo com as projeções dos modelos de circulação global CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3, para o cenário de emissões A1B	55
Tabela 4.7.2. Dados climáticos utilizados para simular cada ciclo da cultura da soja do período 2046/2047 – 2055/2056, de acordo com as projeções dos modelos de circulação global CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3, para o cenário de emissões B1	56
Tabela 5.1.1. Resultado dos indicadores estatísticos e seu valor satisfatório para avaliar a calibração do modelo AquaCrop Versão 4.0 para simular a produtividade da soja na bacia do rio Potiribu em três diferentes datas de semeadura.....	59

Tabela 5.2.1. Variáveis climáticas médias e concentração média de CO ₂ durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1	61
Tabela 5.3.1. Variáveis para o cálculo da WP ajustada média para a cultura da soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para dois cenários de emissões do período 2046/2047 - 2055/2056.....	65
Tabela 5.5.1. Número médio de dias de precipitação e de eventos de irrigação durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para duas projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas no modelo de circulação global CNRM-CM3 para os cenários de emissões A1B e B1	68
Tabela 5.7.1. Resultado da estatística de Mann – Whitney (U) para comparar a média de rendimento de grãos de soja do histórico 2003/2004 – 2012/2013 com a média de rendimento de grãos de soja para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1	71
Tabela 5.7.2. Resultado da estatística de Mann – Whitney (U) para comparar a média de demanda de água para irrigação do histórico 2003/2004 – 2012/2013 com a média de demanda de água para irrigação para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS

BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CO ₂	Dióxido de carbono
ET	Evapotranspiração real
ET _o	Evapotranspiração de referência
ET _m	Evapotranspiração potencial máxima da cultura
ENOS	El Niño Oscilação Sul
WP	Eficiência do uso da água
EUR	Eficiência do uso da radiação
MCG	Modelo de Circulação Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
NSE	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
PBIAS	Desvio porcentual
PWP	Ponto de murcha permanente
RAW	Água facilmente disponível
RSR	Relação entre a raiz do erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados observados
TAW	Água total disponível
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Y	Rendimento real
Y _p	Rendimento potencial

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas já estão exercendo pressão sobre a produção agrícola e se espera que no futuro seus efeitos sejam ainda mais importantes. Apesar de o aumento projetado das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) ser uniformemente distribuído em todo o mundo, as mudanças esperadas dos padrões de temperatura e precipitação variam no nível regional. Assim, se espera que os efeitos das mudanças climáticas sobre o rendimento das culturas variem entre regiões também.

O rendimento das culturas mostra uma forte correlação com as mudanças de temperatura e precipitação, de tal forma que é afetado pela ocorrência de eventos climáticos extremos, como secas e tormentas, ocorridas durante estágios críticos de desenvolvimento das plantas. No entanto, a resposta de cada cultura frente às mudanças projetadas pode ser diferente. Apesar de na maioria dos casos seja esperado um impacto negativo sobre o rendimento, em algumas situações poderia ocorrer um aumento da produtividade (IGNACIUK; MASON-DCROZ, 2014).

Outro assunto atualmente em discussão é a magnitude do efeito que as concentrações atmosféricas de CO₂ mais elevadas possam causar sobre a taxa de crescimento das plantas, e em consequência sobre o rendimento das culturas, pois este é um substrato primário para a fotossíntese (STRECK; ALBERTO, 2006).

A análise de cenários climáticos a partir do uso de modelos agro-meteorológicos e agro-hidrológicos pode ajudar a esclarecer como as interações entre as mudanças de temperatura, precipitação e concentração atmosférica de CO₂ podem afetar o rendimento de uma cultura específica, sendo mais adequado que estes estudos sejam desenvolvidos na escala regional.

No caso da soja no Rio Grande do Sul, principal cultura do estado, a disponibilidade hídrica é o fator isolado que maior influência exerce na definição do rendimento (FONTANA et al., 2001), independentemente do ciclo da cultivar, da época de semeadura e do local (CUNHA et al., 1998). Em contraste, dentro da faixa recomendada para semeadura, a temperatura não é fator limitante do rendimento de grãos de soja nas principais regiões produtoras do estado (BERLATO; FONTANA; GONÇALVES, 1992). Assim, pode-se supor que ao estimar o efeito das mudanças climáticas sobre a cultura da soja nesse estado, especial atenção deve ser dada ao fator precipitação.

A bacia do rio Potiribu é uma das principais regiões produtoras de soja no Rio Grande do Sul. No período 2004 – 2013, os três municípios cobertos pela bacia (Cruz Alta, Ijuí e Pejuçara) produziram um total de 3.312.722 toneladas de grãos de soja em uma área colhida total de 1.580.080 ha, tendo portanto um rendimento médio nesse período de 2.097 kg/ha. Nesse contexto, se torna de grande importância realizar estudos sobre previsão do rendimento de grãos de soja como parte de estratégias de adaptação às mudanças climáticas para o setor agrícola dessa região.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi calibrar o modelo agro-hidrológico AquaCrop Versão 4.0 para simular o efeito das mudanças de temperatura, precipitação e concentração atmosférica de CO₂ sobre a demanda de água para irrigação e o rendimento de grãos da cultura da soja na bacia do rio Potiribu.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Modelos climáticos e mudanças climáticas projetadas para a região sul do Brasil

A concentração de CO₂ da atmosfera terrestre tem aumentado como resultado direto das atividades humanas a uma taxa de 1 – 1,8 ppm/ano. Conseqüentemente, a temperatura média do ar da Terra poderá também aumentar devido ao efeito estufa do CO₂. Estudos numéricos com modelos climáticos indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1 a 6 °C na temperatura média do ar até o final deste século (STRECK, 2005).

Na agricultura, o aumento da concentração atmosférica de CO₂ poderia contribuir para o crescimento das plantas, contudo as variações projetadas nos regimes de precipitação e temperatura poderiam implicar alterações nas práticas e nos sistemas atuais de irrigação, adubação, seleção de culturas e controle de pragas. A distribuição espacial das culturas poderia também ser afetada, tendo como consequência que o cultivo de algumas culturas talvez não seja mais viável em certas regiões (MENDONÇA, 2006).

A análise de séries históricas de variáveis meteorológicas permite detectar padrões de clima local ou regional e as suas tendências ao longo do tempo e espaço (MELO, 2015). Nesse sentido, Mendonça (2006) apresenta um estudo em que foram analisados estatisticamente dados meteorológicos de 38 localidades da região sul do Brasil (23 do Rio Grande do Sul, incluído o município de Cruz Alta), do período 1961 – 2004. Nesse estudo, foram identificadas alterações térmicas (aquecimento de mais de 0,7 °C com mudanças, sobretudo nas temperaturas mínimas) e elevação dos totais pluviométricos anuais (com tendência de concentração) nas últimas décadas.

Por outro lado, os modelos de circulação global (MCG) podem ser úteis para analisar as tendências futuras do clima. Estes modelos representam o comportamento tridimensional da atmosfera em todo o globo, e podem ser utilizados para analisar as mudanças climáticas causadas pelas interferências antrópicas, tais como o desmatamento e o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Neste último caso, o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera provoca uma mudança do balanço de energia calculado pelo modelo, com o conseqüente impacto nos elementos climáticos, tais como temperatura do ar e precipitação (COLLISCHONN, 2001).

Melo (2015) realizou uma investigação para detectar mudanças nos padrões de temperatura e precipitação na região noroeste do Rio Grande do Sul (dentro da qual se localiza a bacia do rio Potiribu) pelo uso de diferentes modelos de circulação global e regional. As projeções indicaram um aumento da média anual de temperatura de quase 3 °C até o final do século, bem como o aumento da precipitação anual. Também, foi realizada uma análise sazonal de temperatura e precipitação, a qual demonstrou que os maiores aumentos de temperatura são projetados para o inverno e início da primavera e, portanto, não coincidem com os meses de verão, quando a soja é cultivada.

Os resultados obtidos por Melo (2015) coincidem com as descobertas de Marengo et al. (2010), que projetaram a partir de três modelos de circulação regional um aquecimento de 3 a 4 °C para a região sul do Brasil, para o período 2071 – 2100. Nesse trabalho, eles também mencionam que o sul do Brasil é uma região para a qual a maioria dos modelos do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC prevê incremento da precipitação para o final do século.

Por último, uma alternativa já utilizada no Rio Grande do Sul para estudar o impacto de cenários de mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas são os geradores estocásticos de séries meteorológicas (STRECK; ALBERTO, 2006). Esses modelos podem gerar séries meteorológicas a partir de séries históricas de pelo menos 30 anos, através de distribuições de probabilidade e correlações entre elementos meteorológicos que mantêm as estatísticas da série original. Neste último tipo de modelo, as variações de temperatura e precipitação para a série gerada devem ser indicadas pelo usuário. Ou seja, o modelo por ele mesmo não prevê as mudanças nas variáveis meteorológicas.

3.2. Simulação agro-hidrológica no Brasil

Os modelos podem ser considerados como representações simplificadas da realidade, as quais utilizam equações matemáticas para simular processos físicos, químicos, biológicos, sociais ou conceituais. Especificamente, os modelos agro-hidrológicos agregam conhecimentos por meio de equações matemáticas para poder simular o crescimento e a produção das culturas.

Além de estimar rendimentos e eventuais quebras de safras, os modelos agro-hidrológicos podem auxiliar no gerenciamento da irrigação e da adubação, prever respostas da cultura a

diferentes espaçamentos, estimar efeitos de mudanças climáticas na cultura, e otimizar o planejamento do plantio e da colheita (VAN ITTERSUM et al., 2003).

Existe uma grande quantidade de modelos agro-hidrológicos de domínio público, cada um com suas vantagens e limitações (MARTINS; ALVALÁ; TOMASELLA, 2014), alguns dos quais tem sido utilizados no Brasil com diferentes objetivos de pesquisa.

Santos (2011) utilizou o modelo agro-hidrológico SWAP (KROES et al., 2008) para avaliar o desempenho de duas funções de redução na estimativa da extração de água por plantas de soja sob condições úmidas em Piracicaba, São Paulo. O desempenho de ambas as funções de redução foi analisado através do potencial matricial e do conteúdo de água no solo, ambos simulados pelo modelo SWAP. Essas duas variáveis foram monitoradas ao longo do ciclo da cultura nas profundidades de 0,05; 0,15 e 0,30 m. Comparando tanto os valores do potencial matricial como os do conteúdo de água no solo simulados pelo SWAP, para as três profundidades analisadas, com os dados experimentais foi possível determinar qual das duas funções de redução apresentou melhor desempenho.

Como outro exemplo, Gedanken et al. (2003) utilizaram o modelo Ceres-Maize (JONES; KINIRY, 1986) para avaliar o consumo de água e a rentabilidade da cultura do milho, em três épocas de plantio, para duas regiões do estado de Minas Gerais. Os tratamentos consistiam na condução da cultura irrigada e não irrigada para três épocas de plantio (15/05, 15/10 e 15/12) e dois níveis de frequência de aplicação de água (alta e média). Os resultados da simulação mostraram que apesar da irrigação permitir maiores produtividades, ela influencia consideravelmente os custos de produção, não tendo apresentado retorno econômico satisfatório para ambas as localidades estudadas. O sistema de irrigação por aspersão convencional, com irrigações de média frequência, apresentou maior relação custo/benefício quando comparado às irrigações de alta frequência, utilizando pivô central.

Finalmente, o modelo AQUACROP (STEDUTO et al., 2009), de especial interesse neste trabalho, foi ajustado por Anjos (2011) para prever a safra do milho para a região de Arapiraca, Alagoas. Foram utilizadas informações experimentais como dados de entrada para o modelo, para quatro épocas de semeadura. Os resultados de armazenamento de água no solo e de rendimento simulados pelo modelo apresentaram tendência de variação similar aos valores observados. Eles concluíram que o modelo conseguiu prever de forma aceitável a

produtividade do milho com 18 dias de antecedência à colheita, permitindo aos usuários finais do modelo programar o armazenamento, logística, e comercialização da safra a ser colhida.

3.3. Antecedentes sobre estimativa do rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul

O modelo mais amplamente utilizado para estimar o rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul é o modelo de Jensen de previsão de rendimento relativo, modificado, ajustado e validado por Berlato (1987). Segundo esse modelo o rendimento relativo da soja pode ser calculado a partir da Eq 3.1.1.

$$\frac{Y}{Y_m} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{ET_r}{ET_o} \right)^\lambda \quad (\text{Eq 3.1.1.})$$

Na Eq 3.1.1., Y é o rendimento obtido nas condições reais de disponibilidade hídrica, Y_m constitui o rendimento máximo possível na ausência de déficit hídrico, ET_r é a evapotranspiração real estimada através do cálculo do balanço hídrico no solo, ET_o é a evapotranspiração de referência calculada pelo método combinado de Penman e λ é o fator de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico em um dado subperíodo do seu desenvolvimento.

O modelo anterior tem sido utilizado por diversos autores para diferentes fins. Barni e Matzenauer (2000) o utilizaram com o objetivo de definir um novo ajuste de época de semeadura para a soja. Os autores levaram em consideração a fenologia de vários tipos de cultivar e encontraram que a soja pode ser semeada desde o final do mês de setembro até 25 de dezembro. Entretanto, os maiores rendimentos são alcançados com as semeaduras de novembro. Cunha et al. (2001) também utilizaram esse modelo na mesma linha de pesquisa. Eles buscaram indicar o período mais favorável para semeadura da soja em cada município do Rio Grande do Sul, com base em riscos de deficiência hídrica, considerando tipo de solo e ciclo das cultivares como principais variáveis de definição. Os resultados do estudo permitiram a definição de um calendário de semeadura entre 11 de outubro e 31 dezembro, conforme o tipo de solo, o ciclo da cultivar e a localização do município.

Mais tarde, Fontana et al. (2001) parametrizaram e validaram o mesmo modelo multiplicativo de Jensen para a estimativa do rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul, utilizando

um conjunto de dados de entrada para o modelo mais atualizado. Os autores usaram dados meteorológicos de seis estações localizadas na região de produção significativa dessa cultura (uma delas localizada no município de Cruz Alta), e dados de rendimento médio de todo o estado, oriundos de estatísticas oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no período 1974/75 a 1994/95. O modelo apresentou bom ajuste, com coeficientes de determinação de 0,86 para o modelo completo (novembro a abril) e 0,75 para o modelo reduzido (janeiro a março). A validação do modelo, feita com dados das safras 1995/96, 1996/97, 1997/98 e 1998/99, mostrou um bom desempenho, levando eles à conclusão de que o modelo podia ser incorporado a programas de previsão de safras.

Por outro lado, Cunha et al. (1998), e Matzenauer, Barni e Maluf (2003) utilizaram esse mesmo modelo ajustado por Bertlato (1987) para avaliar o efeito da deficiência hídrica sobre o rendimento da soja e para estimar seu consumo relativo de água. Os resultados dos seus trabalhos serão expostos na seção seguinte.

3.4. Efeitos do estresse hídrico sobre o rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul

Existem vários estudos que tem evidenciado a sensibilidade da cultura da soja frente ao estresse hídrico no Rio Grande do Sul. Bertlato, Fontana e Gonçalves (1992) buscaram relacionar o rendimento de grãos de soja com algumas variáveis meteorológicas. Para isto desenvolveram experimentos em cinco localidades do estado (incluído o município de Cruz Alta), no período 1971/72 – 1983/84, e estabeleceram correlações entre o rendimento e as seguintes variáveis: temperatura, precipitação, evapotranspiração relativa (ET/ET_o) e o quociente entre a precipitação e a evapotranspiração de referência (P/ET_o). As correlações confirmaram que o período fenológico da soja mais crítico em relação à água é o período reprodutivo, que no estado corresponde em média para os três grupos de maturação (precoce, médio e semitardio/tardio) ao período que vai de meados de janeiro a meados de março. Por outro lado, eles encontraram que dentro da faixa recomendada para semeadura, a temperatura não é fator limitante do rendimento de grãos de soja, nas principais regiões produtoras do estado.

Cunha et al. (1998) determinaram a perda de rendimento potencial por deficiência hídrica, considerando as interações entre local, época de semeadura e grupo de maturação das

diferentes cultivares. Utilizaram o modelo de previsão de rendimento relativo, calibrado e validado por Berlato (1987) e uma série de dados diários de aproximadamente 25 anos, do período 1945 – 1990, oriundos de 40 estações meteorológicas (entre elas Cruz Alta e Ijuí). Calcularam índices de perda de rendimento potencial ($1 - Y/Y_p$) considerando diferentes níveis de probabilidade de ocorrência, e determinaram que a disponibilidade hídrica é uma variável que limita a expressão do rendimento potencial da cultura da soja no Rio Grande do Sul, independentemente do ciclo da cultivar, da época de semeadura e do local.

Berlato e Fontana (1999) relacionaram a variabilidade interanual da precipitação pluvial com a variabilidade dos rendimentos da soja, considerando os eventos El Niño Oscilação Sul (ENOS). Os autores usaram dados de rendimento médio da soja de todo o estado para o período 1975/76 – 1994/95 e de precipitação pluvial média mensal de seis estações meteorológicas localizadas na região mais significativa de produção dessa oleaginosa (noroeste do estado). Foram também tomados dados de precipitação mensal do período 1913 – 1994 dessas seis estações meteorológicas e identificados os eventos ENOS nessas duas séries de dados meteorológicos. Como resultados obtiveram que a precipitação do período de dezembro a março explica cerca de 80% da variação interanual dos rendimentos e que o fenômeno El Niño favorece a cultura da soja, ocasionando na maioria das vezes rendimentos e produções recordes, pois este fenômeno se encontra associado a um aumento generalizado da precipitação no estado.

Outras pesquisas visaram determinar os requerimentos de suplementação hídrica para a cultura da soja. Por exemplo, Mota et al. (1996) estimaram as necessidades de água de irrigação para diferentes sub-períodos do ciclo vegetativo dos diversos grupos de maturação e épocas de semeadura recomendados para cada região. Utilizaram um método de balanço hídrico no solo e dados meteorológicos diários de oito localidades, e concluíram que todas as regiões estudadas do Rio Grande do Sul necessitam de irrigação para a cultura da soja, em qualquer época de semeadura entre as recomendadas, para todos os grupos de maturação e em todos os sub-períodos analisados.

Por último, Matzenauer, Barni e Maluf (2003) estimaram o consumo relativo de água (ET/ET_m) para o período crítico da cultura da soja em três épocas de semeadura, para dez localidades do estado. Eles alertaram que o Rio Grande do Sul continuaria perdendo quantidades significativas de grãos causadas por estiagens, com reflexos negativos na economia do estado, e ressaltaram a necessidade da elaboração de um programa de

desenvolvimento da irrigação, principalmente para as regiões que apresentam maior potencial de rendimento, mas que apesar disso necessitam com frequência de suplementação hídrica para proporcionar maior rendimento e maior estabilidade das safras.

3.5. Efeitos do estresse térmico sobre o rendimento de grãos de soja

Existem muitos pesquisadores que têm estudado os efeitos do estresse térmico sobre o rendimento de grãos de soja. Alguns autores se focaram na revisão da literatura, enquanto outros utilizaram abordagens experimentais e técnicas de simulação.

Thuzar et al. (2010) revisaram a literatura e encontraram que as altas temperaturas durante o ciclo reprodutivo podem reduzir o crescimento do tubo polínico, afetar a viabilidade do pólen e a fecundação das flores. Esses efeitos conduziriam à redução do rendimento de grãos de soja.

Outros estudos destacam os efeitos sobre a fenologia da cultura e a fotossíntese. Esse é o caso do trabalho de Zhang et al. (2016). Eles desenvolveram um experimento de campo no norte da China, no qual utilizaram radiadores de infravermelho para criar um ambiente de aquecimento sobre a cultura da soja. Os resultados mostraram que incrementos de 0,4 °C e 0,7 °C nas temperaturas do dossel e do solo fizeram progredir a floração em 3,8 dias e encurtaram o período vegetativo em 4,5 dias. Além disso, a taxa fotossintética das folhas nos estágios da floração e do enchimento de grãos diminuiu 6,6% e 10,3%, respectivamente. Como resultado, o rendimento de grãos de soja sofreu um decréscimo de 45%.

Puteh et al. (2013) também desenvolveram um estudo de campo, com sede na Malásia. Eles ressaltaram a importância do tempo de exposição às altas temperaturas. No seu experimento, três variedades da soja foram expostas a temperaturas de 30 °C e 35 °C, durante 5 e 14 dias do período reprodutivo. Os resultados mostraram que períodos mais longos de exposição às altas temperaturas tiveram um efeito mais negativo sobre o rendimento de grãos de soja do que períodos mais curtos de exposição. Houve uma tendência linear de declínio do rendimento com o incremento da temperatura em todas as variedades estudadas. À temperatura de 30 °C o rendimento não foi tão significativamente afetado como quando se utilizou a temperatura de 35 °C.

Mall et al. (2004) também analisaram o efeito do estresse térmico sobre o rendimento da soja, mas levaram em consideração a interação com outros fatores como precipitação, concentração de CO₂ e características do solo. Eles validaram o modelo de previsão de rendimento CROPGRO para diferentes localidades da Índia e utilizaram as projeções climáticas de três modelos de circulação global. Os resultados das simulações indicaram que o estresse térmico reduziria o rendimento de grãos de soja entre 10% e 20%.

No estado do Rio Grande do Sul, estudos de correlação entre séries históricas de variáveis meteorológicas e dados de rendimento da soja indicam que, dentro da faixa recomendada para semeadura, a temperatura não é fator limitante do rendimento de grãos de soja nas principais regiões produtoras do estado (BERLATO; FONTANA; GONÇALVES, 1992). No entanto, a situação futura deve ser analisada considerando as mudanças de temperatura projetadas pelos diferentes modelos de circulação global, para os diferentes cenários de emissões. Isso para verificar se esta situação se manterá no futuro ou se a temperatura poderia passar a ser um fator limitante do rendimento.

3.6. Efeitos potenciais do aumento da concentração atmosférica de CO₂ sobre o rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul

A fixação de carbono e o uso da água são duas funções metabólicas cruciais na determinação do crescimento das plantas. De acordo com o comportamento em relação a estas duas funções metabólicas, as plantas podem ser classificadas em três categorias: C3, C4 e CAM. A via metabólica das plantas C3 é menos eficiente do que as vias metabólicas das plantas C4 e CAM, devido a uma perda considerável de fotossintatos através da fotorrespiração (STRECK, 2005).

Streck (2005) revisou a literatura sobre os possíveis impactos do aumento da concentração atmosférica de CO₂ e da temperatura sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas agrícolas. Ele encontrou que em plantas do tipo C3, o incremento da concentração atmosférica de CO₂ suprime a fotorrespiração, incrementando assim a eficiência da fotossíntese. Por outro lado, ele encontrou que as plantas do tipo C4 possuem mecanismos de concentração de CO₂ nos espaços intercelulares das folhas, os quais lhes permitem manter altas taxas fotossintéticas a menores disponibilidades de CO₂. Em consequência, para esse último grupo de plantas não se esperaria um incremento significativo do desempenho da

fotossíntese em resposta a concentrações mais elevadas de CO₂ na atmosfera. Finalmente, Streck (2005) concluiu que se as concentrações de CO₂ atingirem o dobro do seu valor atual, sem ocorrer mudanças de temperatura, o rendimento se incrementaria em torno de 30% e 10% para culturas C3 e C4, respectivamente.

As hipóteses mencionadas anteriormente têm sido confirmadas por experimentos ao ar livre enriquecido com CO₂, cujos resultados revelam duas importantes respostas das culturas frente a concentrações elevadas de CO₂. A primeira resposta é a redução da condutância estomática, a qual conduz ao declínio da transpiração e, portanto ao aumento da eficiência do uso da água. A segunda resposta consiste na estimulação da fotossíntese, a qual leva ao aumento da produção de biomassa (AINSWORTH; ROGERS, 2007). O efeito estimulador da fotossíntese tem sido mais evidente nas culturas de metabolismo tipo C3, enquanto o declínio da condutância estomática tem sido observado para espécies tanto do tipo C3 como C4 (KIMBALL; KOBAYASHI; BINDI, 2002).

Dado que a soja é do tipo C3, o aumento da concentração atmosférica de CO₂ sugere efeitos positivos sobre o rendimento e a demanda de água para irrigação dessa cultura. No entanto, esses efeitos devem ser analisados levando em consideração as possíveis mudanças de temperatura e precipitação.

Siqueira, Farias e Sans (1994) estudaram os efeitos potenciais das mudanças climáticas sobre a produção brasileira de trigo, milho e soja. Para isso, utilizaram cenários climáticos gerados pelos modelos de circulação global GISS, GFDL e UKMO, e os modelos de previsão de rendimento CERES e SOYGRO. No caso da soja, eles projetaram um aumento de 2,8 milhões de toneladas na produção nacional, e destacaram a importância do efeito benéfico da maior concentração de CO₂.

Siqueira et al. (2000) avaliaram também o impacto das mudanças climáticas sobre a produção brasileira de trigo, milho e soja. Utilizaram cenários climáticos projetados através dos modelos GISS e GISSt, o sistema de suporte de decisão DSSAT, e os modelos de previsão de rendimento CERES e SOYGRO. No caso da cultura da soja, projetaram acréscimos médios na produção nacional em torno de 27%, como resultante de efeitos benéficos do aumento das concentrações de CO₂. Os maiores reflexos positivos na produção de soja foram projetados para a região sul do país.

Streck e Alberto (2006) visaram também avaliar o impacto das possíveis mudanças climáticas sobre o rendimento das culturas de trigo, soja e milho, mas eles se focaram na região de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Eles utilizaram o software LARS-WG para criar um total de 13 cenários com diferentes aumentos de temperatura (entre 2 e 6 °C) e precipitação (entre 7 e 25%, segundo a época do ano), assumindo-se um aumento linear de início a fim em um período de 100 anos. Consideraram também incremento da concentração de CO₂ de 350 ppm (situação atual) para 700 ppm (situação de mudança climática). O rendimento da cultura da soja foi simulado pelo modelo de Sinclair (1986). A resposta da cultura ao aumento de CO₂ atmosférico foi considerada modificando-se a eficiência do uso da radiação (EUR) e a eficiência do uso da água (WP). A modificação na WP foi realizada pela redução da transpiração da cultura em 38%. A EUR foi aumentada em 25%, sendo este aumento proporcional e linear do ano 1 ao ano 100. Para 12 dos 13 cenários analisados, foram encontrados incrementos no rendimento médio da cultura da soja. Somente foi observada diminuição do rendimento para o cenário que considerou incremento de 6 °C na temperatura, sem incremento da precipitação.

3.7. Estimativas da demanda de água para irrigação da soja no Rio Grande do Sul

Berlato et al. (1986) desenvolveram um estudo de exigência hídrica da soja, na região climática da Depressão Central do Estado, e mostraram que essa cultura necessita, em média, para todo o ciclo de crescimento (aproximadamente 4,5 meses), cerca de 827 mm de água. Por sua vez, Mota et al. (1996) concluíram que em todas as regiões do Rio Grande do Sul há, climaticamente, necessidade de irrigação em soja, considerando o período de semeadura recomendado (outubro a dezembro) e as cultivares de todos os ciclos. Esse fato demonstra, conforme salientado por Matzenauer et al. (1998) e Berlato (1999), que a precipitação pluvial no Rio Grande do Sul, embora seja equitativamente distribuída nas quatro estações do ano (24% no verão, 25% no outono, 25% no inverno e 26% na primavera), a chuva normal de verão, em geral, não é suficiente para atender às necessidades hídricas das culturas, em função da maior demanda evaporativa da atmosfera no verão (dezembro, janeiro e fevereiro). Nesse sentido, alguns trabalhos visaram estimar a demanda de água para irrigação da cultura da soja.

Franke e Dorfman (2000) estimaram as necessidades de irrigação suplementar para a cultura da soja na região agroecológica de Planalto Médio (dentro da qual se localiza a bacia do rio Potiribu). As necessidades foram simuladas em relação à combinação entre locais, épocas de

semeadura e entre níveis de ocorrência. Os dados meteorológicos básicos utilizados consistiram de registros diários de uma série histórica de 10 anos consecutivos, correspondentes ao período de 1981 – 1990, oriundos do posto meteorológico de Passo Fundo. Através do cálculo do balanço hídrico diário, determinou-se a evapotranspiração potencial e a necessidade de irrigação para a cultura da soja. Eles obtiveram necessidades de irrigação na faixa de 216 a 523 mm, considerando a profundidade máxima do sistema radicular igual a 0,50 m.

Vivan et al. (2013) determinaram também a lâmina de irrigação suplementar para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, no período entre as safras 1993/1994 – 2006/2007. Os dados de solo utilizados corresponderam às características do Latossolo Vermelho distrófico e os dados meteorológicos em base diária foram obtidos da estação da Embrapa de Passo Fundo. Observou-se que, em média, as necessidades de aplicação de lâmina suplementar encontraram-se entre 163 e 239 mm.

Mota et al. (1996) e Melo (2015) estimaram necessidades de água de irrigação para regiões do Planalto e noroeste do estado inferiores às mencionadas anteriormente. Eles encontraram necessidades de irrigação variando de 48 a 70 mm e de 10 a 160 mm, respectivamente. Melo (2015) considerou a profundidade máxima das raízes igual a 1,10 m.

Em outros trabalhos para a cultura da soja no Rio Grande do Sul, Cunha et al. (1998), Barni e Matzenauer (2000), e Jiménez, Melo e Louzada (2013) consideraram profundidades do sistema radicular de 0,80 m; 0,60 m e 1,22 m, respectivamente. Segundo Franke e Dorfman (2000), as diferenças em relação à magnitude e probabilidade de ocorrência dos déficits hídricos para os diferentes trabalhos podem ser atribuídas às diferentes metodologias de balanço hídrico adotadas, à base de dados que foi usada, e, principalmente, à profundidade da camada de solo explorada pelas raízes.

3.8. Caracterização das cultivares da soja utilizadas no Rio Grande do Sul pelo índice de colheita

O rendimento biológico é o peso da planta madura, excluindo-se as raízes, e representa a quantidade de matéria seca acumulada pela parte aérea da planta durante seu ciclo de desenvolvimento. O índice de colheita é a relação entre o rendimento de grãos e o rendimento

biológico, e expressa a eficiência da translocação dos produtos da fotossíntese para as partes economicamente importantes da planta (COLASANTE; COSTA, 1981).

O índice de colheita é sensível às influências do ambiente de modo semelhante ao rendimento de sementes. O seu valor é afetado principalmente pela densidade populacional, disponibilidade hídrica e suprimento de nitrogênio (BRAGA; COSTA, 1983).

Algumas pesquisas visaram caracterizar as cultivares da soja utilizadas no Rio Grande do Sul pelo índice de colheita. No ano agrícola 1978/1979, Colasante e Costa (1981) conduziram um experimento na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, localizada em Guaíba - RS, para investigar a existência de variabilidade para o índice de colheita e o rendimento biológico, e verificar as relações mútuas entre o rendimento de grãos e as outras características agronômicas, em vinte variedades de soja de diferentes grupos de maturação. O índice de colheita variou de 43,2% a 50,2%.

Na mesma estação experimental mencionada anteriormente, Braga e Costa (1983) avaliaram dez cultivares da soja em um experimento instalado num solo com alta disponibilidade de nutrientes e em época favorável ao máximo crescimento das plantas. Foram utilizadas práticas de irrigação suplementar e controle de ervas daninhas, insetos e doenças visando altos rendimentos de sementes. Eles obtiveram índices de colheita variando de 48% a 59%.

Mais recentemente, Zobot (2009) realizou experimentos durante a safra 2007/2008, em Santa Maria – RS, com o objetivo de caracterizar as principais cultivares transgênicas de soja utilizadas no Rio Grande do Sul. Nove cultivares foram submetidas às densidades de semeadura de 250, 400 e 550 mil sementes/ha e aos espaçamentos entre linhas de 0,30; 0,45 e 0,60 m. Ele encontrou índices de colheita variando de 31% a 53%.

e 170 mm, e a precipitação média anual é de 1700 mm (CHEVALLIER; CASTRO, 1991). No entanto, o estado do Rio Grande do Sul sofre influência dos fenômenos El Niño e La Niña, os quais modificam o regime pluviométrico.

A Figura 4.1.2. apresenta valores médios, mínimos e máximos da precipitação mensal (entre 1991 e 2010) do posto pluviométrico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizado no município de Cruz Alta, sendo esse posto representativo do regime de precipitação da região. Observa-se que as médias mensais de precipitação variam entre 128 e 254 mm, apresentando um regime regular de chuva o ano todo. Apesar dessa homogeneidade média mensal, as precipitações mínimas podem ser muito reduzidas devido ao fenômeno El Niño. Como exemplo se tem os meses de abril de 2009 e agosto de 2003, nos quais as precipitações mínimas foram de 10 mm e 16 mm, respectivamente (MATOS, 2012).

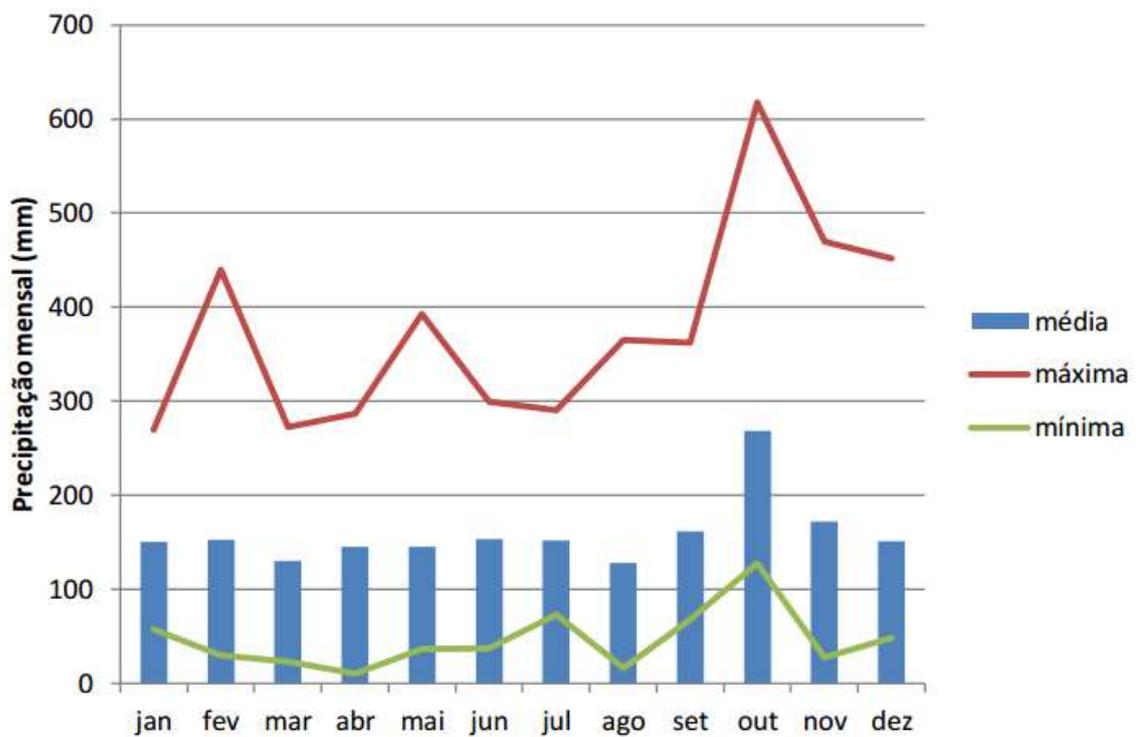


Figura 4.1.2. Valores médios, mínimos e máximos da precipitação mensal do posto pluviométrico de Cruz Alta - RS

(Fonte: Matos, 2012)

A maioria dos solos da região é classificada como Latossolo Vermelho Distroférico (LVdf). Caracterizam-se por ser argilosos e profundos, atingindo profundidades de mais de 15 m. Apesar de serem solos argilosos, são bem drenados graças aos microagregados formados em todo o perfil, o qual resulta em uma importante macroporosidade (VIERO, 2004).

As principais atividades econômicas da bacia do rio Potiribu estão ligadas ao setor primário da economia, destacando-se o plantio de soja e milho no verão, e o plantio de trigo e aveia no inverno. Quanto à cultura soja, a bacia do rio Potiribu se encontra inserida na principal região produtora de soja em grão do estado (noroeste do estado), o qual fica evidenciado na Figura 4.1.3.

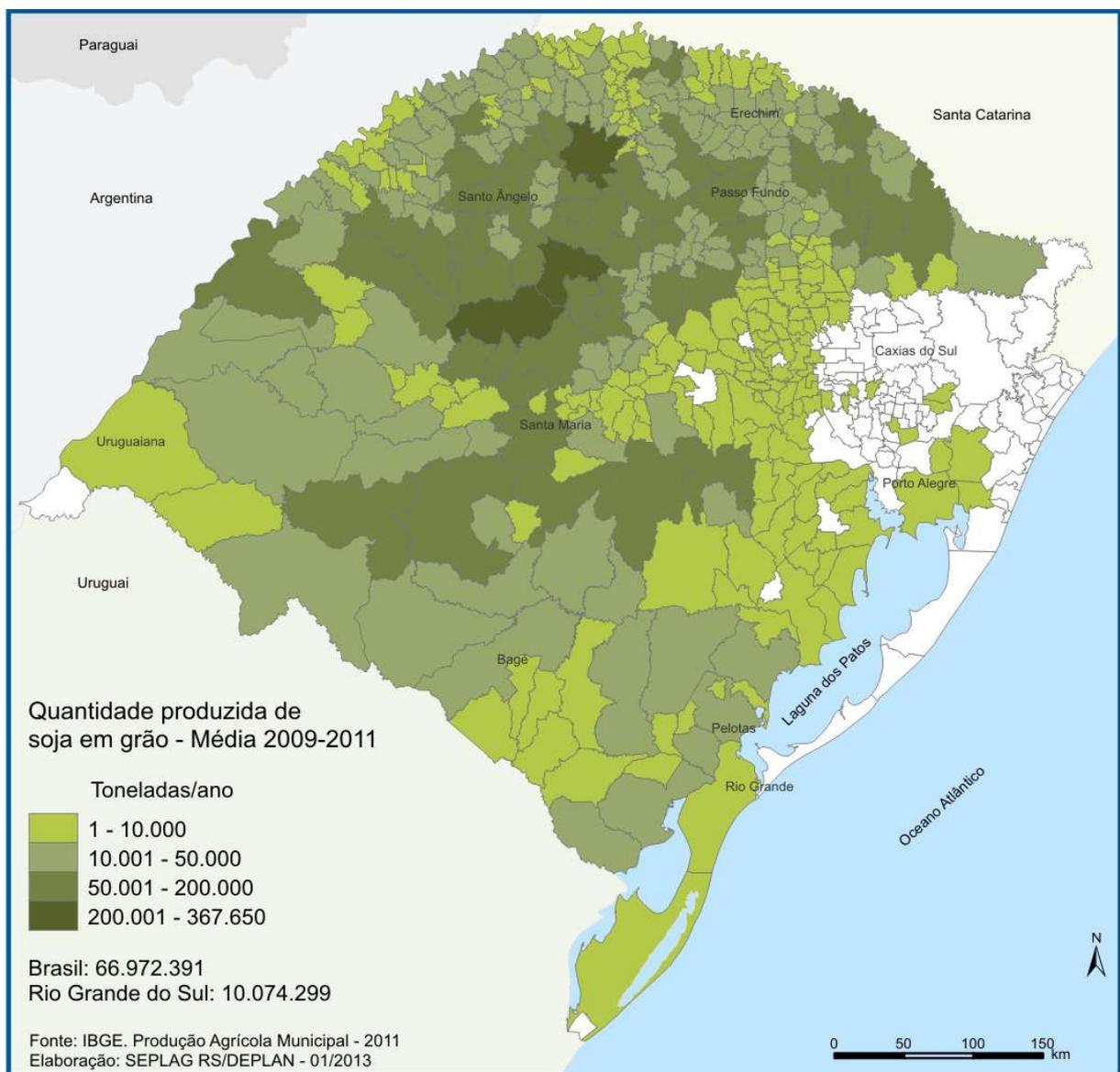


Figura 4.1.3. Produção de soja em grão (média 2009 – 2011) no Rio Grande do Sul

(Fonte: IBGE, 2011)

A partir de 1994, na bacia do rio Potiribu começou a se utilizar o método de plantio direto para o desenvolvimento das atividades agrícolas. O plantio direto consiste em estabelecer as culturas sem prévio preparo do solo (ao contrário do plantio convencional), mantendo os resíduos vegetais (cobertura vegetal ou palha) na superfície do solo. Os efeitos da palha na superfície do solo, aliados à eliminação do revolvimento do solo, podem afetar as características físicas do mesmo, que por sua vez podem causar alterações no balanço hídrico (OLIVEIRA, 2006).

4.2. Modelo AquaCrop Versão 4.0

AquaCrop Versão 4.0 (STEDUTO et al., 2009) é um modelo focado em simular a resposta do rendimento de uma cultura específica ao estresse hídrico, durante todo o período de crescimento. O processo de crescimento se dá a partir da simulação do desenvolvimento do dossel (para calcular a transpiração) e da expansão das raízes (para calcular a extração de água do solo) sob as condições ambientais (clima, solo e práticas agrícolas) especificadas durante o ciclo da cultura.

As principais equações que representam os diferentes processos envolvidos na produção de biomassa e no balanço hídrico no solo são apresentadas nas seções seguintes.

4.2.1. Expansão e declínio do dossel

O parâmetro CC representa a fração da superfície do solo coberta pelo dossel. O desenvolvimento do dossel é simulado a partir de duas equações. A equação de crescimento exponencial (Eq. 4.2.1.1.) é utilizada desde a emergência até alcançar a metade do desenvolvimento máximo do dossel ($CC \leq CC_x/2$). Depois de que a metade da cobertura máxima é atingida ($CC > CC_x/2$), a equação de decaimento exponencial (Eq. 4.2.1.2.) passa a ser utilizada, até alcançar a cobertura máxima ($CC = CC_x$).

$$CC = CC_0 \cdot e^{t \cdot CGC} \quad (\text{Eq. 4.2.1.1.})$$

$$CC = CC_x - 0,25 \frac{(CC_x)^2}{CC_0} e^{-t \cdot CGC} \quad (\text{Eq. 4.2.1.2.})$$

Nas equações 4.2.1.1. e 4.2.1.2., CC é a cobertura do dossel no tempo t (expressa como fração do solo), CC_0 é a cobertura inicial do dossel no tempo $t = 0$ (expressa como fração do solo), CC_x é a cobertura máxima dossel (expressa como fração do solo), CGC é o coeficiente de crescimento do dossel (expresso como incremento na fração coberta do solo em função da soma térmica), e t representa o tempo (expresso como soma térmica). Os parâmetros CC_0 , CC_x e CGC dependem das características da cultura e da densidade de sementeira.

Quando o ciclo da cultura atinge o início da senescência, o declínio do dossel é descrito pela Eq. 4.2.1.3.

$$CC = CC_x \left[1 - 0,05 \left(e^{\frac{CDC}{CC_x} t} - 1 \right) \right] \quad (\text{Eq. 4.2.1.3.})$$

Na Eq. 4.2.1.3., CC é a cobertura do dossel no tempo t (expressa como fração do solo), CC_x é a cobertura máxima dossel ao início da senescência ($t = 0$) (expressa como fração do solo), CDC é o coeficiente de declínio do dossel (expresso como diminuição na fração coberta do solo em função da soma térmica) e t representa o tempo (expresso como soma térmica). O parâmetro CDC é característico da cultura.

Para simular a redução do crescimento foliar como resultado do estresse hídrico, o parâmetro CGC é ajustado (CGC_{adj}) multiplicando-o pelo coeficiente de estresse hídrico para a expansão foliar $K_{S_{exp,w}}$ (Eq.4.2.1.4). O valor de $K_{S_{exp,w}}$ depende do conteúdo volumétrico de água no solo (θ), sendo igual a 1 quando o efeito do estresse hídrico é inexistente, e sendo igual a 0 quando o efeito do estresse é máximo. A relação $K_{S_{exp,w}}$ vs. θ é característica da cultura, e é descrita por uma curva convexa. A forma da curva é definida por um limiar superior ($p_{exp, upper}$) e um limiar inferior ($p_{exp, lower}$) de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), e por um fator de forma ($f_{shape, exp}$) (Figura 4.2.1.1). A água total disponível é o intervalo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. $K_{S_{exp,w}}$ é igual a 0 quando a depleção da água excede o limiar inferior.

$$CGC_{adj} = K_{S_{exp,w}} \cdot CGC \quad (\text{Eq. 4.2.1.4.})$$

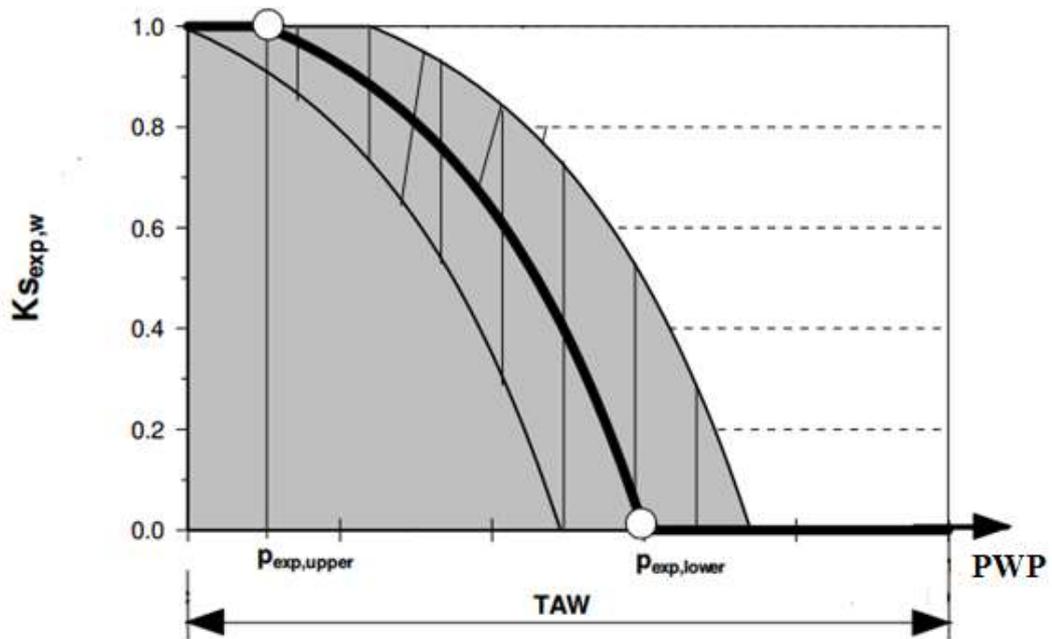


Figura 4.2.1.1. Variação do coeficiente de estresse hídrico para expansão foliar ($K_{s_{exp,w}}$) em função do nível de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0
(Fonte: Modificado de Steduto et al., 2009)

Os valores adotados para os parâmetros que descrevem a expansão e o declínio do dossel são apresentados na Tabela 4.2.1.1.

Tabela 4.2.1.1. Parâmetros que descrevem a expansão e declínio do dossel utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor*
CC_o (%)	1,65
CC_x (%)	98
CGC (%/GDD ^{**})	0,5
CDC (%/GDD ^{**})	0,15
$p_{exp, upper}$ (fração da TAW)	0,15
$p_{exp, lower}$ (fração da TAW)	0,65
$f_{shape, exp}$	3

* (RAES et al., 2012). ** Unidades de soma térmica. GGD é equivalente a °C – dia

4.2.2. Transpiração da cultura

A transpiração da cultura é calculada como uma fração da evapotranspiração de referência, utilizando a Eq. 4.2.2.1.

$$Tr = K_{S_{sto}} \cdot K_{S_{aer}} \cdot CC \cdot K_{C_{Tr,x}} \cdot ET_o \quad (\text{Eq. 4.2.2.1.})$$

Na Eq. 4.2.2.1., Tr é a transpiração da cultura (mm), $K_{S_{sto}}$ é o coeficiente de estresse hídrico para fechamento de estômatos, $K_{S_{aer}}$ é o coeficiente de estresse hídrico por saturação do solo, CC é a fração do solo coberta pelo dossel, $K_{C_{Tr,x}}$ é o coeficiente de transpiração máxima da cultura e ET_o é a evapotranspiração de referência (mm).

O coeficiente $K_{C_{Tr,x}}$ é característico da cultura. Os coeficientes $K_{S_{sto}}$ e $K_{S_{aer}}$ dependem do conteúdo volumétrico de água no solo (θ), sendo iguais a 1 quando o efeito do estresse hídrico é inexistente, e sendo iguais a 0 quando o efeito do estresse é máximo. A relação $K_{S_{sto}}$ vs. θ é característica da cultura, e é descrita por uma curva convexa. A forma da curva é definida por um limiar superior (p_{sto}) de depleção da TAW, pelo ponto de murcha permanente (PWP) e por um fator de forma ($f_{shape, sto}$) (Figura 4.2.2.1). $K_{S_{sto}}$ é igual a 0 quando o conteúdo volumétrico de água no solo atinge o ponto de murcha permanente. A relação $K_{S_{aer}}$ vs. θ é característica da cultura, e é descrita por uma reta. A reta é definida pelo ponto de anaerobioses (θ_{air}) e pelo conteúdo volumétrico de água no solo à saturação (θ_{SAT}) (Figura 4.2.2.2). $K_{S_{aer}}$ é igual a 0 quando o conteúdo volumétrico de água no solo atinge a saturação.

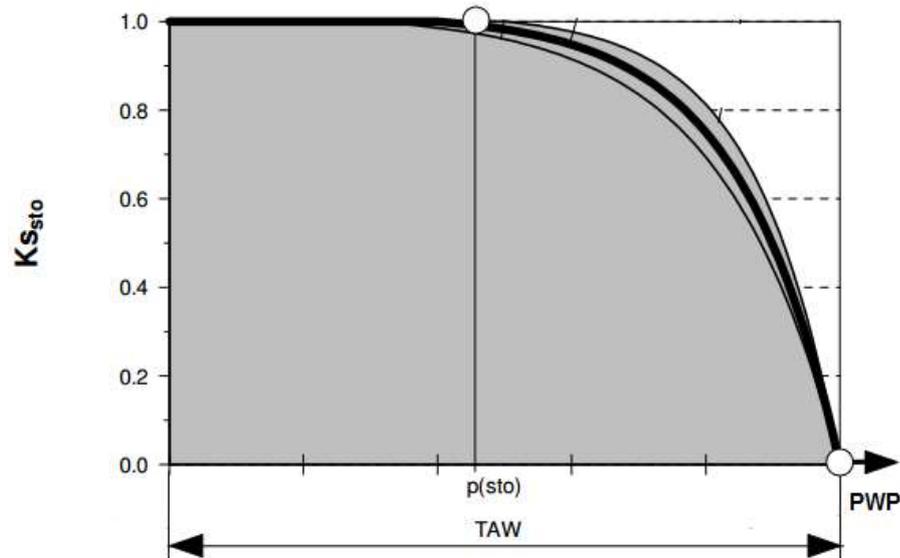


Figura 4.2.2.1. Variação do coeficiente de estresse hídrico para fechamento de estômatos (K_{ssto}) em função do nível de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0

(Fonte: Modificado de Steduto et al., 2009)

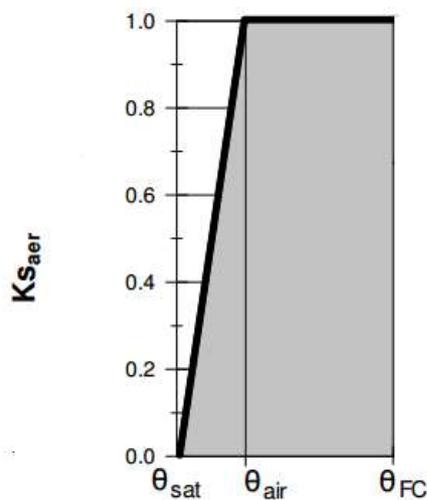


Figura 4.2.2.2. Variação do coeficiente de estresse hídrico por saturação do solo (K_{saer}) em função do conteúdo volumétrico de água no solo (θ), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0

(Fonte: Modificado de Steduto et al., 2009)

Os valores adotados para os parâmetros que descrevem a transpiração da cultura, com exceção de PWP e θ_{SAT} , são apresentados na Tabela 4.2.2.1. Os valores para PWP e θ_{SAT} serão apresentados na Seção 4.4.

Tabela 4.2.2.1. Parâmetros que descrevem a transpiração da cultura utilizados nas simulações

Parâmetro*	Valor*
$Kc_{Tr,x}$	1,10
p_{sto} (fração da TAW)	0,50
$f_{shape, sto}$	3
θ_{air} (%)	44,4

* (RAES et al., 2012)

4.2.3. Produção de biomassa e formação do rendimento

A produção acumulada de biomassa (B) é obtida pela soma da relação diária entre a transpiração (Tr) e a evapotranspiração de referência (ETo), durante todo o período de crescimento (Eq. 4.2.3.1.). O rendimento (Y) resulta da multiplicação da biomassa produzida e do índice de colheita (HI) (Eq. 4.2.3.2.).

$$B = K_{sb} \cdot WP \cdot \sum \left(\frac{Tr}{ETo} \right) \quad (\text{Eq. 4.2.3.1.})$$

$$Y = HI \cdot B \quad (\text{Eq. 4.2.3.2.})$$

Nas equações 4.2.3.1. e 4.2.3.2., B é a biomassa acumulada produzida (g/m^2), K_{sb} é o coeficiente de estresse térmico, WP é a eficiência do uso da água normalizada (g/m^2), Tr é a transpiração diária da cultura (mm), ETo é a evapotranspiração diária de referência (mm), Y é o rendimento final (g/m^2) e HI é o índice de colheita (expresso como fração de B).

A eficiência do uso da água (WP) é um parâmetro característico de cada cultura que é ajustado pela concentração atmosférica de CO_2 (Seção 4.2.4). O coeficiente de estresse térmico (K_{sb}) depende da soma térmica diária (GGD). A relação K_{sb} vs. GGD é característica da cultura, e é descrita por uma curva logística. A forma da curva é definida por um limiar superior (GD_{upper}) e um limiar inferior (igual a $0 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{dia}$) de soma térmica (Figura 4.2.3.1.). K_{sb} é igual a 0 quando a soma térmica é igual a $0 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{dia}$. O índice de colheita (HI) é característico de cada cultivar e é ajustado por uma série de procedimentos que levam em

consideração a presença dos estresses hídrico e térmico, durante estágios críticos do ciclo da cultura (Seção 4.2.5.).

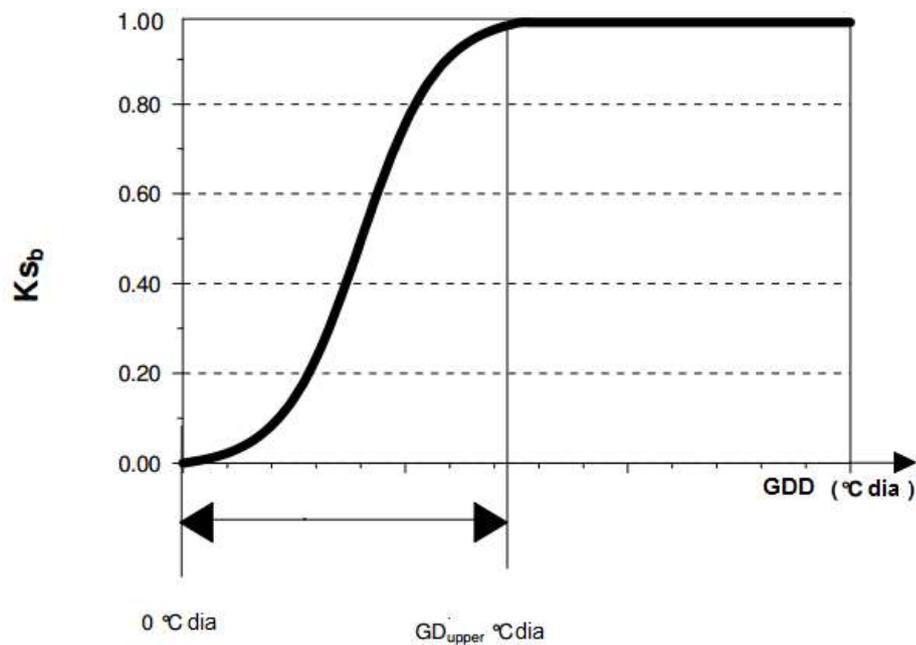


Figura 4.2.3.1. Variação do coeficiente de estresse térmico (K_{sb}) em função da soma térmica, dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0

(Fonte: Modificado de Steduto et al., 2009)

Os valores adotados para os parâmetros que descrevem a produção de biomassa são apresentados na Tabela 4.2.3.1. A forma em que o índice de colheita é calculado será apresentada na Seção 4.2.5.

Tabela 4.2.3.1. Parâmetros que descrevem a produção de biomassa e a formação do rendimento utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor*
WP (g/m^2)	15
GD _{upper} ($^{\circ}\text{C} - \text{dia}$)	10

* (RAES et al., 2012).

O esquema de cálculo da formação do rendimento é apresentado na Figura 4.2.3.2.

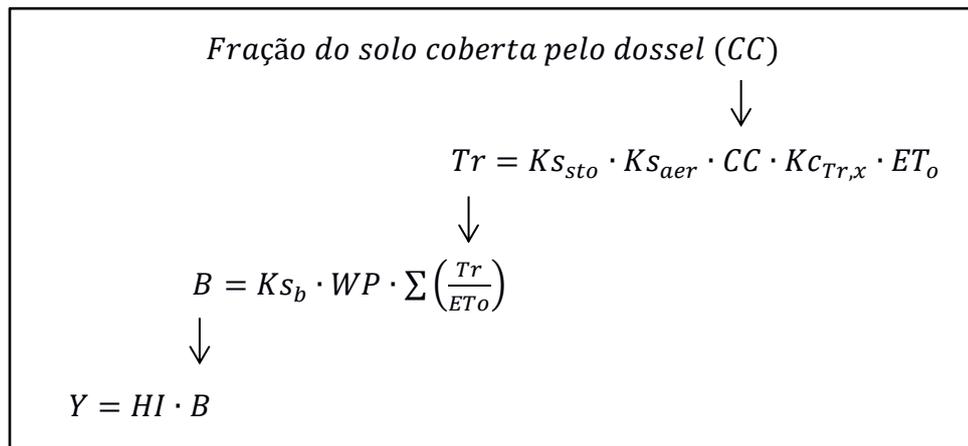


Figura 4.2.3.2. Esquema de cálculo da formação do rendimento pelo modelo AquaCrop Versão 4.0

4.2.4. Ajuste da eficiência do uso da água (WP) pela concentração atmosférica de CO₂

O parâmetro WP expressa a quantidade de matéria seca (g) produzida por unidade de área (m²) por unidade de água transpirada (mm). As unidades de WP, depois de passar por um processo de normalização ao dividir pela ET_o, são massa de matéria seca por unidade de área (g/m²).

WP é ajustado pelo coeficiente de correção f_{CO_2} (Eq. 4.2.4.1.), o qual considera a diferença entre um valor de concentração de CO₂ de referência e a concentração do ano de estudo (Eq. 4.2.4.2.).

$$WP_{adj} = f_{CO_2} \cdot WP \quad (\text{Eq. 4.2.4.1.})$$

$$f_{CO_2} = \frac{(C_{a,i}/C_{a,o})}{1+(C_{a,i}-C_{a,o})[(1-w)b_{Sted}+w(f_{sink}b_{Sted}+(1-f_{sink})b_{FACE})]} \quad (\text{Eq. 4.2.4.2.})$$

Na Eq. 4.2.4.2., $C_{a,o}$ é a concentração atmosférica de CO₂ de referência (369,41 ppm, valor médio para o ano 2000 medido no Observatório de Mauna Loa do Havaí), $C_{a,i}$ é a concentração atmosférica de CO₂ do ano i, b_{Sted} é igual a 0,000138 e decorre da abordagem teórica adotada por Vanuytrecht, Raes e Willems (2011), b_{FACE} é igual a 0,001165 e decorre

da meta-análise de respostas de campo utilizada por Vanuytrecht, Raes e Willems (2011), w é o fator de distribuição de peso entre a abordagem teórica e a experimental, e f_{sink} é o coeficiente de capacidade de assimilação de CO_2 da cultura. O modelo utiliza o Observatório de Mauna Loa para representar a concentração média de CO_2 devido a sua localização remota no Oceano Pacífico, o qual evita a interferência de fontes importantes de poluição do ar.

Anos anteriores a 2000 possuem uma concentração de CO_2 inferior ao valor de referência, portanto f_{CO_2} será menor a 1, enquanto anos posteriores a 2000 terão valores de f_{CO_2} superiores a 1.

O fator de peso w faz que na Eq. 4.2.4.2. b_{FACE} gradualmente substitua a b_{Sted} , começando desde $C_{a,o}$ até se tornar completamente aplicável para uma $C_{a,i}$ igual ou superior a 550 ppm. O valor anterior corresponde à concentração de CO_2 mantida nos experimentos ao ar livre realizados por Vanuytrecht, Raes e Willems (2011). Assim, para $C_{a,i}$ igual ou inferior a $C_{a,o}$, o valor de w é igual a 0, enquanto para $C_{a,i}$ igual ou maior a 550 ppm, w se torna 1 (Eq. 4.2.4.3.). Esta forma em que b_{FACE} substitui a b_{Sted} surgiu das observações de Vanuytrecht, Raes e Willems (2011). Eles testaram tanto a abordagem teórica como a experimental em exercícios de simulação, considerando cenários de concentração elevada de CO_2 , e compararam os resultados com observações de campo, obtendo um melhor ajuste para a segunda abordagem.

$$0 \leq w = \left(1 - \frac{(550 - C_{a,i})}{(550 - C_{o,i})} \right) \leq 1 \quad (\text{Eq. 4.2.4.3.})$$

Finalmente, o coeficiente de capacidade de assimilação de CO_2 (f_{sink}) depende das características da cultura e das práticas de manejo. Vanuytrecht, Raes e Willems (2011) propõem valores de f_{sink} para uma lista de culturas, sendo 0,2 a 0,4 a faixa recomendada para a soja. Neste trabalho, foi utilizado um valor de f_{sink} igual a 0,3.

4.2.5. Ajuste do índice de colheita (HI) pelos estresses hídrico e térmico

Uma vez iniciadas a floração e a formação do rendimento (enchimento dos grãos no caso da soja), o índice de colheita começa a se incrementar desde um valor inicial (HI_{ini}) até atingir seu valor máximo de referência (HI_o). O índice de colheita para qualquer dia (HI_i) após o início da floração é determinado por uma função logística (Eq. 4.2.5.1.).

$$HI_i = \frac{HI_{ini}HI_o}{HI_{ini} + (HI_o - HI_{ini})e^{-(HIGC)t}} \quad (\text{Eq. 4.2.5.1.})$$

Na Eq. 4.2.5.1, HI_i é o índice de colheita no dia i (expresso como fração da biomassa produzida), HI_o é o índice de colheita de referência (expresso como fração da biomassa produzida), HI_{ini} é o índice de colheita inicial (igual a 0,01), $HIGC$ é o coeficiente de crescimento do índice de colheita (dia^{-1}) e t é o tempo (dia).

Para este trabalho, HI_o foi obtido por calibração (Seção 4.6.). O parâmetro $HIGC$ é derivado da mesma Eq. 4.2.5.1. com ajuda do tempo especificado para o enchimento dos grãos (tempo requerido para atingir HI_o), o qual é um parâmetro específico da cultura que será apresentado na Seção 4.5.

Durante a floração, os estresses hídrico e térmico podem inibir a polinização de maneira significativa. Isso é simulado pela introdução de coeficientes de estresse, os quais ajustam o valor de HI_o .

O valor do coeficiente de estresse hídrico para a polinização ($K_{S_{pol, w}}$) depende do conteúdo volumétrico de água no solo (θ), sendo igual a 1 quando o efeito do estresse hídrico é inexistente, e sendo igual a 0 quando o efeito do estresse é máximo. A relação $K_{S_{pol, w}}$ vs. θ é característica da cultura, e é descrita por uma reta. A reta é definida por um limiar superior (p_{pol}) de depleção da TAW e pelo ponto de murcha permanente (PWP) (Figura 4.2.5.1.). $K_{S_{pol, w}}$ é igual a 0 quando a conteúdo volumétrico de água no solo atinge o ponto de murcha permanente.

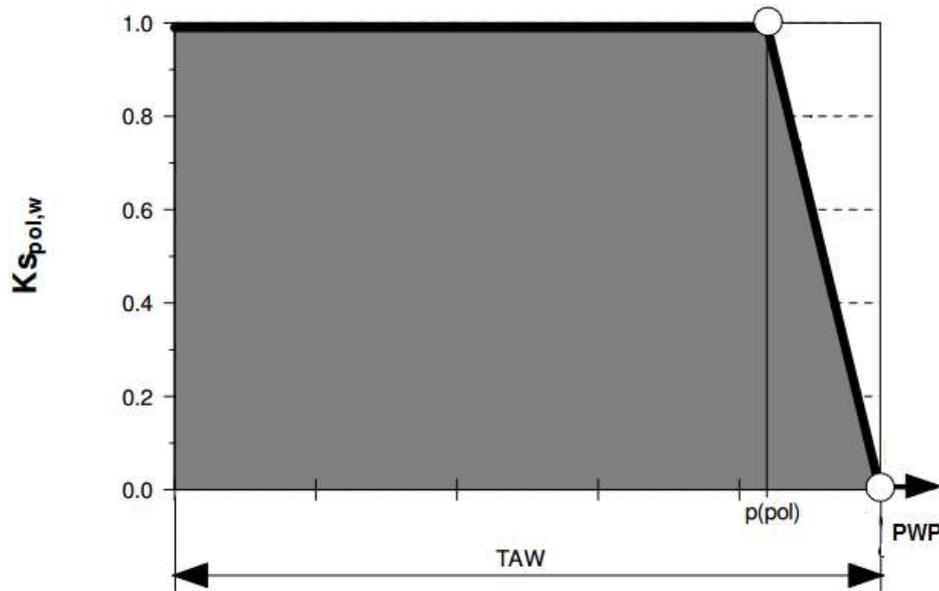


Figura 4.2.5.1. Variação do coeficiente de estresse hídrico para a polinização ($K_{Spol,w}$) em função do nível de depleção da água total disponível na zona de raízes (TAW), dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0 (Fonte: Modificado de Steduto et al., 2009)

Os coeficientes de estresse térmico por frio ($K_{Spol,c}$) e por calor ($K_{Spol,h}$) para a polinização dependem da temperatura ($^{\circ}C$). A relação $K_{Spol,c}$ vs. $^{\circ}C$ é característica da cultura, e é descrita por uma curva logística. A forma da curva é definida por um limiar superior ($T_{n,cold}$) e um limiar inferior ($T_{n,cold} - 5^{\circ}C$) de temperatura. $K_{Spol,c}$ é igual a 0 quando a temperatura atinge o limiar inferior. De maneira similar, a relação $K_{Spol,h}$ vs. $^{\circ}C$ é característica da cultura, e é descrita uma curva logística. A forma da curva é definida por um limiar inferior ($T_{x,heat}$) e um limiar superior ($T_{x,heat} + 5^{\circ}C$) de temperatura (Figura 4.2.5.2). $K_{Spol,h}$ é igual a 0 quando a temperatura atinge o limiar superior.

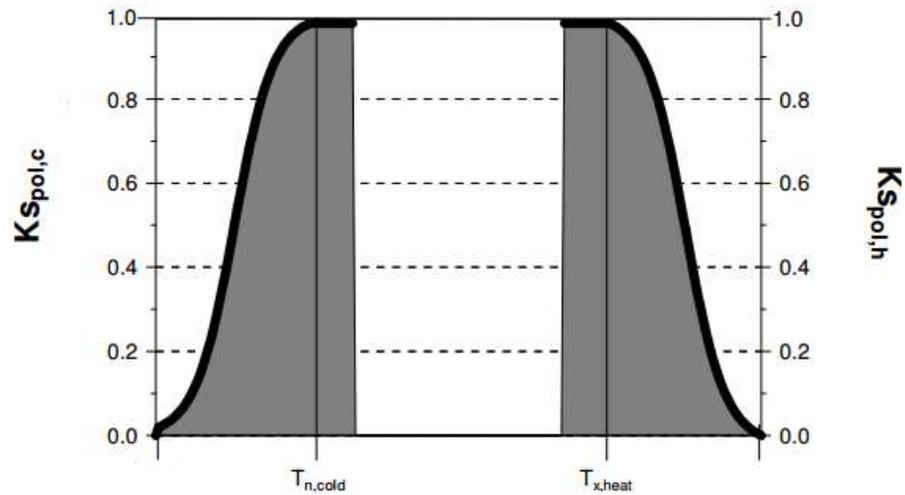


Figura 4.2.5.2. Variação dos coeficientes de estresse térmico por frio ($K_{Spol,c}$) e por calor ($K_{Spol,h}$) para a polinização em função da temperatura, dentro do modelo AquaCrop Versão 4.0

(Fonte: Modificado de Steduto et al., 2009)

Durante todo o período de enchimento dos grãos, o coeficiente de crescimento do índice de colheita (HIGC) pode também ser ajustado, se o estresse hídrico afetar a transpiração da cultura. Isso resulta no decréscimo de HIGC, dado pela Eq. 4.2.5.2.

$$HIGC_{adj} = \sqrt[10]{Ks_i} \left(1 - \frac{1-Ks_i}{b} \right) HIGC \quad (\text{Eq. 4.2.5.2.})$$

Na Eq. 4.2.5.2. $HIGC_{adj}$ é o coeficiente de crescimento do índice de colheita ajustado, Ks_i é o coeficiente de estresse hídrico no dia i (igual a Ks_{sto} ou Ks_{aer} , dependendo de se o estresse é por déficit ou por saturação), b é um parâmetro da cultura que varia entre 1 (efeito forte) e 20 (efeito leve), e HIGC é o coeficiente de crescimento do índice de colheita de referência.

Os valores adotados para os parâmetros que descrevem o ajuste do índice de colheita, com exceção do PWP, são apresentados na Tabela 4.2.5.1. O valor para PWP será apresentado na Seção 4.4.

Tabela 4.2.5.1. Parâmetros que descrevem o ajuste do índice de colheita utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor
HI _o (%) **	31
p _{pol} (fração da TAW) *	0,85
T _{n, cold} (°C) *	8
T _{x, heat} (°C) *	40
b *	3

* (RAES et al., 2012). ** Ajustado por calibração.

4.2.6. Expansão da zona de raízes

A taxa de aprofundamento das raízes é uma função das características da cultura e do tempo. O desenvolvimento da zona de raízes é simulado considerando a enésima raiz do tempo. Uma vez que a metade do tempo requerido para a emergência da cultura é excedida ($t_o/2$), a profundidade das raízes começa a se incrementar desde uma profundidade inicial Z_o até atingir a profundidade máxima efetiva Z_x (Eq. 4.2.6.1.).

$$Z = Z_o + (Z_x - Z_o) \sqrt[n]{\frac{(t - \frac{t_o}{2})}{(t_x - \frac{t_o}{2})}} \quad (\text{Eq. 4.2.6.1.})$$

Na Eq. 4.2.6.1., Z é a profundidade efetiva das raízes no tempo t (m), Z_o é a profundidade de início da curva de expansão das raízes (m), Z_x é a profundidade máxima efetiva (m), t_o é o tempo para atingir 90% da emergência da cultura (expresso como soma térmica), t_x é o tempo para atingir Z_x (expresso como soma térmica), t é o tempo após a semeadura (expresso como soma térmica) e n é o fator de forma (característico da cultura) que determina a diminuição da velocidade de expansão da zona de raízes. Os parâmetros Z_o , Z_x e t_x dependem das características da cultura e das práticas agrícolas.

A redução da expansão efetiva das raízes por estresse hídrico é determinada pela magnitude do coeficiente $K_{s_{sto}}$ (mesmo utilizado no cálculo da transpiração da cultura) e do fator de

forma f_{shape} (Eq. 4.2.6.2.). O valor de f_{shape} varia entre -1 e -8; quanto mais negativo seu valor, menor será o efeito do estresse hídrico sobre o desenvolvimento da zona de raízes.

$$dZ_{adj} = dZ \frac{e^{K_{sto} \cdot f_{shape} - 1}}{e^{f_{shape} - 1}} \quad (\text{Eq. 4.2.6.2.})$$

Os valores adotados para os parâmetros que descrevem a expansão da zona de raízes são apresentados na Tabela 4.2.6.1.

Tabela 4.2.6.1. Parâmetros que descrevem a expansão da zona de raízes utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor
Z_o (m) *	0,21
Z_x (m) **	0,50
t_x (°C – dia) *	1934
n *	1,5
f_{shape} *	-6

* (RAES et al., 2012). ** (FRANKE; DORFMAN, 2000).

4.2.7. Evaporação do solo

A evaporação do solo é calculada como uma fração da evapotranspiração de referência utilizando a Eq. 4.2.7.1.

$$E = Kr \cdot (1 - CC) \cdot Ke_x \cdot ET_o \quad (\text{Eq. 4.2.7.1.})$$

Na Eq. 4.2.7.1., E é a evaporação do solo (mm), Kr é o coeficiente de redução da evaporação, CC é a fração do solo coberta pelo dossel, Ke_x é o coeficiente de evaporação máxima do solo e ET_o é a evapotranspiração de referência (mm).

O valor predeterminado para Ke_x é 1,10, o qual foi mantido neste trabalho. O coeficiente Kr varia de acordo com a quantidade de água disponível na camada superficial do solo (primeiros

40 mm). K_r é igual a 1 quando o conteúdo volumétrico de água na camada superficial do solo é igual à capacidade de campo (θ_{FC}) e é igual a 0 quando o conteúdo volumétrico de água na camada superficial do solo é igual à metade do ponto de murcha permanente ($0,5 \cdot \theta_{PWP}$). Os valores adotados para θ_{FC} e θ_{PWP} serão apresentados na Seção 4.4.

Quando há presença de materiais de cobertura do solo, como no caso do sistema de plantio direto, K_{e_x} é ajustado por dois fatores: a porcentagem da superfície do solo coberta (de 0 a 100%) e o coeficiente de ajuste pelo tipo de material de cobertura (f_m). O coeficiente de ajuste f_m varia de 0,50 (materiais orgânicos) a 1 (materiais plásticos). Esse ajuste de K_{e_x} é descrito pela Eq. 4.2.7.2. Neste trabalho, foi assumido um valor de f_m igual a 0,50 (correspondente a palha como material de cobertura) e uma porcentagem de cobertura da superfície do solo igual a 100%.

$$K_{e_{adj}} = \left(1 - f_m \frac{\text{porcentagem da superfície do solo coberta}}{100} \right) K_{e_x} \quad (\text{Eq. 4.2.7.2.})$$

4.2.8. Balanço hídrico no solo

Para resolver o balanço hídrico no solo, o modelo AquaCrop Versão 4.0 utiliza um conjunto de equações de diferenças finitas (sub-rotinas) escritas em termos da variável independente θ , a qual representa o conteúdo volumétrico de água no solo. A simulação começa com a drenagem do perfil do solo. Subsequentemente, a água infiltra no perfil (após subtração do escoamento superficial), e finalmente a quantidade de água perdida por evaporação do solo e transpiração da cultura é calculada (Figura 4.2.8.1.).

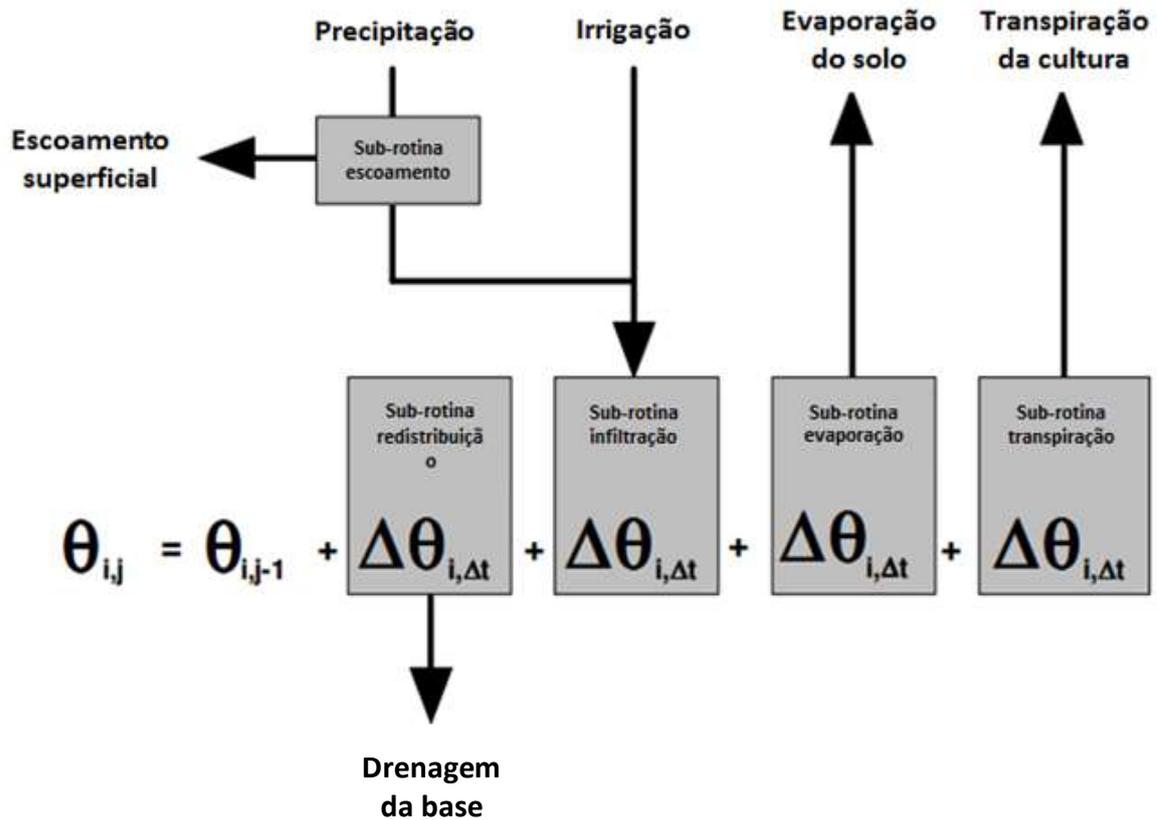


Figura 4.2.8.1. Esquema de cálculo do balanço hídrico no solo pelo modelo AquaCrop Versão 4.0

(Fonte: Adaptado de Raes et al., 2012)

A Eq. 4.2.8.1. de fluxo vertical é utilizada para simular a redistribuição da água em uma camada de solo e a drenagem da base do perfil do solo.

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau(\theta_{SAT} - \theta_{FC}) \frac{e^{\theta_i - \theta_{FC} - 1}}{e^{\theta_{sat} - \theta_{FC} - 1}} \quad (\text{Eq. 4.2.8.1.})$$

Na Eq. 4.2.8.1., $\Delta\theta_i/\Delta t$ é a variação do conteúdo de água no solo à profundidade i durante o incremento de tempo Δt ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$), τ é um parâmetro adimensional que descreve as características da drenagem, θ_i é o conteúdo volumétrico real de água no solo à profundidade i (m^3/m^3), θ_{SAT} é o conteúdo volumétrico de água no solo à saturação (m^3/m^3), θ_{FC} é o conteúdo volumétrico de água no solo à capacidade de campo (m^3/m^3) e Δt é o incremento de tempo (dia). A equação de fluxo vertical descreve a quantidade de água perdida por drenagem livre ao longo do tempo entre a saturação e a capacidade de campo. Quando a capacidade de campo é atingida, a drenagem cessa. O parâmetro τ expressa a diminuição do conteúdo de

água em uma camada de solo, originalmente à saturação, ao final do primeiro dia de drenagem livre. O valor de τ pode variar entre 1 (drenagem total após um dia) e 0 (presença de camada impermeável), e é calculado a partir da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) (Eq. 4.2.8.2.)

$$\tau = 0,0866 \cdot K_{sat}^{0,35} \quad (\text{Eq. 4.2.8.2.})$$

Na Eq. 4.2.8.2., K_{sat} é dada em mm/dia. Quanto maior o valor de τ , mais rápido a camada de solo atingirá a capacidade de campo. Os valores adotados para θ_{FC} , θ_{PWP} e K_{sat} serão apresentados na Seção 4.4.

A estimativa da quantidade de chuva perdida por escoamento superficial está baseada no método do número de escoamento, desenvolvido pelo US Soil Conservation Service (Eq. 4.2.8.3. e Eq. 4.2.8.4.)

$$RO = \frac{[P - (0,2)S]^2}{P + S - (0,2)S} \quad (\text{Eq. 4.2.8.3.})$$

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (\text{Eq. 4.2.8.4.})$$

Nas equações 4.2.8.3. e 4.2.8.4., RO é a quantidade de água perdida por escoamento superficial (mm), P é a quantidade de chuva (mm), $(0,2)S$ é a quantidade de água que pode infiltrar antes de ocorrer escoamento superficial (mm), S é o armazenamento máximo potencial (mm) e CN é o número de escoamento.

Um solo com alto CN terá um armazenamento potencial reduzido e poderá perder grandes quantidades de chuva por escoamento. O CN é função do tipo de solo, da declividade, do uso do solo, da presença de materiais de cobertura do solo e da umidade relativa da superfície do solo. Tendo em vista a condutividade hidráulica saturada adotada neste estudo (Seção 4.4) e as recomendações de Raes et al. (2012), foi adotado um valor para CN igual a 65.

A equação de extração de água pelas raízes considera a taxa máxima de extração $S_{x,i}$ e o coeficientes de estresse hídrico $K_{S_{sto}}$ e $K_{S_{aer}}$ (mesmos utilizados no cálculo da transpiração da cultura) (Eq. 4.2.8.5.).

$$S_i = K_{S_{sto}} \cdot K_{S_{aer}} \cdot S_{x,i} \quad (\text{Eq. 4.2.8.5.})$$

Na Eq. 4.2.8.5., S_i representa a taxa de extração à profundidade do solo i ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$), $K_{S_{sto}}$ e $K_{S_{aer}}$ são os coeficientes de estresse hídrico para um conteúdo de água no solo θ_i à profundidade i , e $S_{x,i}$ é a taxa máxima de extração à profundidade i ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$). S_i expressa a quantidade de água que pode ser extraída pelas raízes a uma profundidade específica por unidade de volume de solo por unidade de tempo. $S_{x,i}$ depende das características da cultura, e neste trabalho foi adotado um valor de $0,0315 \text{ m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{dia}$ (RAES et al., 2012).

A quantidade exata de água que pode ser extraída pela transpiração é obtida pela integração da Eq. 4.2.8.5. sobre os diferentes compartimentos da zona de raízes. A integração começa na superfície do solo e para quando a soma é igual à demanda da transpiração (Eq. 4.2.2.1.) ou quando a base da zona de raízes é atingida. Quando a taxa de extração (S_x) é muito pequena (como resultado de um volume limitado de raízes), a quantidade de água que pode ser extraída será menor que a demanda (Eq. 4.2.2.1.). Quando a taxa de extração (S_x) é grande, a zona de raízes conta com suficiente umidade ($K_s = 1$), e a demanda da transpiração (Eq. 4.2.2.1.) é pequena, a água será extraída somente da parte mais superficial da zona de raízes.

4.2.9. Determinação da demanda de água para irrigação

Durante o avanço da simulação, AquaCrop Versão 4.0 calcula a quantidade de água requerida para evitar o estresse hídrico da cultura. Quando a depleção da água na zona de raízes supera um limiar dado pelo usuário, uma pequena quantidade de água de irrigação será armazenada no perfil do solo para manter a depleção da água acima do limiar especificado (Eq. 4.2.9.1.). A quantidade total de água requerida será a demanda líquida para irrigação (sem considerar a eficiência do método de irrigação selecionado), para esse período de simulação.

$$Irr = 1000 (\theta_{Dx} - \theta) Z \quad (\text{Eq. 4.2.9.1.})$$

Na Eq. 4.2.9.1., Irr é a quantidade de água requerida para levar a depleção de água na zona de raízes de volta ao limiar estabelecido pelo usuário (mm), θ_{Dx} é o conteúdo volumétrico de água no solo correspondente ao limiar de depleção estabelecido pelo usuário (m^3/m^3), θ é o conteúdo volumétrico médio de água na zona de raízes (m^3/m^3) e Z é a profundidade efetiva das raízes (m). O valor adotado para θ_{Dx} será apresentado na Seção 4.9.

4.3. Dados meteorológicos para a calibração do modelo

Para a calibração do modelo foi utilizada uma série de 11 anos de dados (2003 – 2013) obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação Cruz Alta – RS (OMM: 83912), localizada a $-28,63^\circ$ latitude, $-53,6^\circ$ longitude e 472,5 m de altitude. Os dados diários foram: precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima do ar.

A evapotranspiração diária de referência foi calculada com o software ETo Calculator (RAES, 2012), o qual usa a equação de Penman – Monteith. A velocidade média do vento foi assumida em 2 m/s para toda a série de dados. Esse valor de velocidade do vento corresponde à média da série (2003 – 2013). A radiação solar foi estimada por meio da fórmula de ajuste de Hargreaves (Eq. 4.3.1.). A umidade do ar foi estimada como uma função da temperatura mínima (Eq. 4.3.6) e as concentrações anuais de CO_2 foram obtidas da base de dados do AquaCrop Versão 4.0. Apesar de os dados de radiação, velocidade do vento e umidade do ar estar disponíveis no BDMEP, seus valores foram estimados devido à dificuldade para obter projeções dessas variáveis para cenários futuros de mudanças climáticas, os quais seriam assumidos em etapas posteriores deste trabalho descritas na Seção 4.7. Assim, escolheu-se o mesmo procedimento para o cálculo da evapotranspiração de referência tanto para a calibração do modelo como para o período futuro de análise mencionado na Seção 4.7.

$$R_z = k_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (\text{Eq. 4.3.1.})$$

Na Eq. 4.3.1., R_s é a radiação solar ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), k_{RS} é o coeficiente de ajuste ($^{\circ}C^{-0.5}$) o qual tem valor de 0,16 para localidades do interior e de 0,19 para localidades costeiras, T_{max} é a temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$), T_{min} é a temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$) e R_a é a radiação extraterrestre ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) calculada pela Eq. 4.3.2.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (\text{Eq. 4.3.2.})$$

Na Eq. 4.3.2., R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), G_{SC} é a constante solar ($0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$), d_r é a distância relativa inversa entre o Sol e a Terra calculada pela Eq. 4.3.3., ω_s é o ângulo do horário do por do sol (radianos) calculado pela Eq. 4.3.4., φ é a latitude (radianos) e δ é a declinação solar (radianos) calculada pela Eq. 4.3.5.

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (\text{Eq. 4.3.3.})$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (\text{Eq. 4.3.4.})$$

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (\text{Eq. 4.3.5.})$$

Nas equações 4.3.3. e 4.3.5., J é a data juliana, sendo igual a 1 para o dia 1 de janeiro e igual a 365 ou 366 para o dia 31 de dezembro.

$$e_a = 0,6108 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_{\min}}{T_{\min} + 237,3}\right]} \quad (\text{Eq. 4.3.6.})$$

Na Eq. 4.3.6., e_a é a umidade do ar (kPa) e T_{\min} é a temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Na Tabela 4.3.1. se apresenta um resumo dos dados meteorológicos para cada ciclo da cultura utilizado na calibração do modelo.

Tabela 4.3.1. Resumo dos dados meteorológicos para cada ciclo da cultura utilizado na calibração do modelo

Ciclo da cultura	CO₂ (ppm)	Temp. Máx. (°C)*	Temp. Mín. (°C)*	ETo (mm)***	Precipitação (mm)**
2003/2004	377	29,2	17,0	728	771
2004/2005	379	29,8	17,5	739	483
2005/2006	381	29,8	17,6	733	664
2006/2007	383	29,9	18,6	700	746
2007/2008	385	29,6	17,0	750	396
2008/2009	386	29,9	17,3	746	431
2009/2010	389	29,6	18,8	676	1023
2010/2011	391	28,9	17,8	691	1104
2011/2012	393	30,6	17,5	769	307
2012/2013	395	28,1	16,8	707	1087
Média	386	29,5	17,6	724	701

*Valor médio. **Valor acumulado. ***Valor acumulado calculado com o software ETo Calculator (RAES, 2012).

4.4. Parametrização do solo

A parametrização do solo foi baseada na caracterização física do Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) e no ajuste dos parâmetros da curva de retenção de água no solo realizado por Melo (2015) (Tabela 4.4.1). Os parâmetros da Tabela 4.4.1 correspondem a valores médios para um conjunto de 55 curvas de retenção para pontos localizados na bacia do arroio Donato, a qual é uma sub-bacia do rio Potiribu (Figura 4.1.1.). Assim, o solo da bacia do arroio Donato foi considerado como representativo da bacia do rio Potiribu. O modelo requer a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), assim como os valores do conteúdo volumétrico de água no solo para o ponto de murcha permanente (θ_{PWP}), a capacidade de campo (θ_{FC}) e a saturação (θ_{SAT}). Esses valores foram calculados a partir da curva de retenção ajustada por Melo (2015) e são apresentados na Tabela 4.4.2. A espessura do perfil do solo adotada foi 0,50 m, sendo esse valor igual à profundidade máxima das raízes adotada (Tabela 4.2.6.1). Da mesma forma que Jiménez, Melo e Louzada (2013), tendo em vista as características do perfil foi desconsiderada a presença de lençol freático e de camadas de impedimento no solo.

Tabela 4.4.1. Parâmetros da curva de retenção de água no solo utilizados como base nas simulações

Característica	Valor*
Condutividade hidráulica saturada, K_{sat} (cm/d)	25,4549
Parâmetro α (cm^{-1})	0,1276
Umidade residual, θ_{res} ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	0,0000
Umidade de saturação, θ_{sat} ($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	0,4940
Parâmetro n (-)	1,0652

*(MELO, 2015)

Tabela 4.4.2. Características hidráulicas do solo utilizadas nas simulações

Característica	Valor
θ_{PWP}^* (m^3/m^3)	0,301
θ_{FC}^{**} (m^3/m^3)	0,429
θ_{SAT}^{***} (m^3/m^3)	0,494
K_{sat}^{***} (mm/dia)	254,5

* Valor da curva de retenção de água no solo correspondente a um potencial matricial de 1500 kPa.

** Valor da curva de retenção de água no solo correspondente a um potencial matricial de 6 kPa.

*** (MELO, 2015)

4.5. Parametrização da cultura

Os dados da cultura foram tomados do banco de dados de características de cultura disponível no software AquaCrop Versão 4.0, calibrados e validados para a soja. Na Tabela 4.5.1., são apresentados os parâmetros que descrevem a fenologia da cultura.

Tabela 4.5.1. Parâmetros que descrevem a fenologia da cultura utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor (°C – dia) *
Soma térmica desde a semeadura até a emergência	200
Soma térmica desde a semeadura até o início da senescência	2200
Soma térmica desde a semeadura até a maturação	2700
Soma térmica desde a semeadura até o início da floração	1500
Duração da floração expressa como soma térmica	600
Soma térmica desde a semeadura até o início do enchimento dos grãos	1500
Duração do enchimento de grãos expresso como soma térmica	1180

* (RAES et al., 2012). Para o cálculo da soma térmica foi utilizada uma temperatura base igual a 5 °C.

4.6. Calibração

O modelo AquaCrop Versão 4.0 foi calibrado para simular o rendimento de grãos de soja na bacia do rio Potiribu. Para isso, o rendimento de grãos em condições de sequeiro foi simulado para um conjunto de dez safras do período 2003/2004 – 2012/2013.

Para simular o crescimento em cada safra foram admitidas três diferentes datas de semeadura no 15º dia dos meses de outubro, novembro e dezembro, de acordo com as recomendações de Cunha et al. (2001). Essa etapa permitiu avaliar qual das três datas de semeadura resultou na melhor qualidade da calibração do modelo. Desta forma, foram concluídas trinta simulações no total para a etapa de calibração.

As simulações foram inicializadas um mês antes da data de semeadura, de modo que a condição inicial de umidade adotada perdesse influência sobre os resultados da simulação e o solo pudesse se ambientar às condições reais de umidade produzidas pelas chuvas prévias à semeadura. Isso foi verificado variando a condição inicial de umidade de uma condição úmida (na capacidade de campo) a uma condição seca (no ponto de murcha permanente), não havendo diferenças no rendimento final da cultura.

Para avaliar a qualidade da calibração, os rendimentos simulados foram comparados com rendimentos históricos do mesmo período, disponíveis na ferramenta “Cidades” do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O histórico foi construído a partir da média dos rendimentos dos municípios cobertos pela bacia do rio Potiribu: Ijuí, Cruz Alta e Pejuçara (Tabela 4.6.1). Os resultados foram agrupados por data de semeadura, de modo que três diferentes comparações foram feitas, uma para cada conjunto de dez pares de rendimentos históricos e simulados.

Tabela 4.6.1. Dados de rendimento de grãos de soja (kg/ha) utilizados para a construção do histórico de rendimentos da bacia do rio Potiribu

Safr	Municípios			Rendimento histórico médio
	Cruz Alta	Ijuí	Pejuçara	
2003/2004	1.980	1.560	1.860	1.800
2004/2005	787	780	500	689
2005/2006	2.280	1.600	2.880	2.253
2006/2007	2.500	2.400	3.180	2.693
2007/2008	2.100	2.100	2.400	2.200
2008/2009	2.220	1.920	3.000	2.380
2009/2010	2.400	2.700	3.180	2.760
2010/2011	3.000	2.880	3.300	3.060
2011/2012	960	960	1.132	1.017
2012/2013	2.720	2.700	3.071	2.830

Com base nas recomendações de Moriasi et al. (2007) para quantificação sistemática da qualidade da simulação em bacias hidrográficas, três indicadores estatísticos foram escolhidos para fazer a comparação entre rendimentos históricos e simulados: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Eq. 4.6.1.), o desvio porcentual (Eq. 4.6.2) e a relação entre a raiz do erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados observados (Eq. 4.6.3.).

$$NSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right] \quad (\text{Eq. 4.6.1.})$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (\text{Eq. 4.6.2.})$$

$$RSR = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \right]} \quad (\text{Eq. 4.6.3.})$$

Nas equações 4.6.1., 4.6.2. e 4.6.3., Y_i^{obs} representa o rendimento observado do ciclo da cultura i , Y_i^{sim} representa o rendimento simulado para o ciclo da cultura i , Y^{mean} representa a média dos rendimentos observados e n é o número total de observações.

Para melhorar a qualidade da calibração, o índice de colheita de referência (HI_o) foi ajustado manualmente desde um valor inicial de 40% até um valor de 31%, o qual corresponde ao menor valor encontrado por Zabot (2009) para a soja no Rio Grande do Sul.

4.7. Projeções climáticas assumidas

Uma vez o modelo calibrado, o rendimento de grãos de soja foi estimado para um novo conjunto de dez safras do período 2046/2047 – 2055/2056, isto é 43 anos para frente do período utilizado para a calibração.

Como data de semeadura foi adotada a que produziu a melhor qualidade da calibração do modelo. Da mesma forma que na calibração, as simulações foram inicializadas um mês antes da data de semeadura.

A ocorrência de mudanças climáticas foi considerada utilizando novas séries de dados meteorológicos, enquanto todos os parâmetros do solo e da cultura foram mantidos iguais aos utilizados na calibração do modelo.

Foram utilizados como base dois cenários de emissões do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC, o A1B, conhecido como cenário econômico global com uso equilibrado dos recursos, e o B1, conhecido como cenário ambiental global com tecnologias limpas e eficientes no uso dos recursos. A partir destes dois cenários foram definidas as concentrações futuras de CO_2 .

Para definir as temperaturas e a precipitação futuras, foram tomados como base dois modelos de circulação global, o CCCMA CGCM3.1 (FLATO; BOER, 2001) e o CNRM-CM3 (SALAS-MÉLIA et al., 2005). Foram utilizadas as projeções desses dois modelos para cada um dos cenários de emissões mencionados anteriormente (A1B e B1), e desta forma quatro diferentes projeções climáticas foram assumidas para serem analisadas neste trabalho.

As concentrações anuais de CO₂ para o período de estudo, baseadas nos cenários A1B e B1, foram obtidas da base de dados do AquaCrop Versão 4.0. As séries diárias de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação, baseadas nos modelos CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3, foram tomadas da Base de Dados de Mudanças Climáticas para o Modelo SWAT (GIRVETZ et al., 2013). Esta base de dados de domínio público conta com 53 projeções futuras para nove diferentes modelos de circulação global (MCG), baseadas em três diferentes cenários de emissões do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (SRES A2, A1B e B1). As projeções se estendem por todo o globo terrestre e foram regionalizadas através de um processo de “downscaling” espacial e temporal para uma resolução de 0,5° (aproximadamente 50 km), para os períodos 1961-1999, 2046-2064 e 2071-2100. Neste trabalho, foram utilizadas as projeções para um ponto localizado a -28,75° latitude e -53,75° longitude, isto é a 19,2 m da estação Cruz Alta – RS (OMM: 83912), da qual foram tomados os dados para a calibração do modelo. A evapotranspiração diária de referência foi calculada com o software ETo Calculator, da mesma forma que foi feito com a série de dados utilizada na calibração do modelo.

Nas tabelas 4.7.1. e 4.7.2. são apresentadas as projeções climáticas utilizadas para cada ciclo da cultura do período 2046/2047 – 2055/2056.

Tabela 4.7.1. Dados climáticos utilizados para simular cada ciclo da cultura da soja do período 2046/2047 – 2055/2056, de acordo com as projeções dos modelos de circulação global CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3, para o cenário de emissões A1B

Ciclo cultura	CO ₂ (ppm)	CCCMA CGCM3.1				CNRM-CM3			
		T _{máx} (°C)*	T _{mín} (°C)*	ET _o (mm)***	Precip. (mm)**	T _{máx} (°C)*	T _{mín} (°C)*	ET _o (mm)***	Precip. (mm)**
2046/47	517,6	29,8	18,7	696	779	32,1	19,9	724	561
2047/48	521,7	27,7	17,7	665	1096	31,4	20,2	681	594
2048/49	525,8	29,2	18,8	665	808	30,3	20,5	630	833
2049/50	529,9	28,8	18,2	673	667	30,0	19,4	653	655
2050/51	534,0	27,4	16,7	688	1096	31,3	19,8	686	667
2051/52	538,0	28,9	18,5	665	903	31,6	20,6	673	681
2052/53	542,0	28,2	17,7	681	1408	31,4	21,2	646	738
2053/54	546,0	28,2	18,3	652	1175	30,3	20,6	632	904
2054/55	550,0	28,1	18,1	649	960	31,0	19,4	701	528
2055/56	554,0	27,7	17,4	673	135	32,9	20,3	734	509
Média	535,9	28,4	18,0	671	903	31,2	20,2	676	667

*Valor médio. **Valor acumulado. ***Valor acumulado calculado com o software ETo Calculator (RAES, 2012).

Tabela 4.7.2. Dados climáticos utilizados para simular cada ciclo da cultura da soja do período 2046/2047 – 2055/2056, de acordo com as projeções dos modelos de circulação global CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3, para o cenário de emissões B1

Ciclo cultura	CO ₂ (ppm)	CCCMA CGCM3.1				CNRM-CM3			
		T _{máx} (°C)*	T _{mín} (°C)*	ET _o (mm)***	Precip. (mm)**	T _{máx} (°C)*	T _{mín} (°C)*	ET _o (mm)***	Precip. (mm)**
2046/47	479,2	27,6	17,1	680	661	29,6	19,1	661	747
2047/48	481,7	27,4	17,2	669	951	31,7	19,5	719	448
2048/49	484,2	28,1	17,9	677	869	29,9	19,7	647	766
2049/50	486,7	27,5	15,5	763	784	29,6	19,0	663	802
2050/51	489,0	28,7	18,5	649	862	31,1	19,2	717	488
2051/52	491,1	28,3	17,5	683	935	29,9	19,6	649	938
2052/53	493,2	27,5	16,2	717	815	31,1	19,1	720	616
2053/54	495,3	29,5	19,0	669	730	29,8	19,5	651	840
2054/55	497,4	27,5	17,1	675	962	32,0	19,7	729	470
2055/56	499,5	27,9	17,8	711	914	31,7	20,0	700	508
Média	489,8	28,0	17,4	689	848	30,6	19,4	686	662

*Valor médio. **Valor acumulado. ***Valor acumulado calculado com o software ET_o Calculator (RAES, 2012).

4.8. Efeito isolado do CO₂ sobre o rendimento de grãos de soja

Para conseguir diferenciar entre o efeito do aumento da concentração atmosférica de CO₂ sobre o rendimento de grãos de soja e os efeitos das mudanças de temperatura e precipitação, todas as simulações foram repetidas considerando unicamente as mudanças de temperatura e precipitação, enquanto as concentrações de CO₂ do período 2003/2004 – 2012/2013 foram mantidas para simular o período 2046/2047 – 2055/2056. Assim, ambas as situações foram comparadas.

O efeito do aumento da concentração de CO₂ sobre a demanda de água para irrigação não pôde ser avaliado, porque como observado na Figura 4.2.3.2 o parâmetro WP (único parâmetro do modelo modificado pela concentração de CO₂) atua diretamente sobre a produção de biomassa e não sobre a transpiração da cultura. Desta maneira, somente os

efeitos das mudanças de temperatura e precipitação afetariam o balanço hídrico no solo, e em consequência a demanda de água para irrigação.

4.9. Irrigação

Para cada ciclo da cultura simulado, foi calculada a demanda líquida para irrigação. A demanda líquida representa o requerimento de água para irrigar a cultura sem considerar a eficiência do método de irrigação utilizado. Foi admitida uma depleção máxima de 50% na água facilmente disponível (intervalo entre a capacidade de campo e o limite hídrico inferior da cultura), correspondente a um conteúdo volumétrico de água no solo de $0,397 \text{ m}^3/\text{m}^3$. O limite hídrico inferior da cultura foi fixado em um conteúdo volumétrico de água no solo de $0,365 \text{ m}^3/\text{m}^3$, correspondente à metade da água total disponível (TAW).

4.10. Testes de hipóteses para comparação de médias

Para comparar as médias de rendimento de grãos de soja e de demanda de água para irrigação, entre o histórico 2003/2004 – 2012/2013 e as quatro projeções climáticas do período 2046/2047 – 2055/2056, foi utilizado o teste não paramétrico de Mann – Whitney.

O teste de Mann – Whitney é usado para testar se duas amostras independentes foram retiradas de populações com médias iguais. Esse teste é, portanto, uma alternativa para o teste “t” para amostras independentes quando a amostra for pequena e/ou as pressuposições, exigidas pelo teste “t”, estiverem seriamente comprometidas. A única exigência do teste de Mann-Whitney é a de que as observações sejam medidas em escala ordinal ou numérica.

A hipótese em teste (H_0) é a de que as médias dos dois grupos de dados a ser comparados são iguais. Os valores dos dois grupos devem ser ordenados em um único grupo de forma crescente para atribuir-lhes uma numeração que vai de 1 até o número total de dados. Esse número indicará a posição de cada valor dentro do grupo de dados.

Posteriormente, a estatística de Mann – Whitney (U) é calculada a partir das equações 4.10.1 e 4.10.2, nas quais n_1 e n_2 representam o número de dados dos grupos 1 e 2, respectivamente. A variável R_1 corresponderá à soma das posições para os dados oriundos do grupo 1, enquanto a variável R_2 corresponderá à soma das posições para os dados oriundos do grupo 2.

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \quad \text{(Eq. 4.10.1)}$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2 \quad \text{(Eq. 4.10.2)}$$

O resultado do menor valor dentre U_1 e U_2 é comparado com o valor crítico tabelado de U , o qual depende dos valores de n_1 e n_2 , e do nível de significância (α) escolhido para fazer a comparação. Se o menor valor dentre U_1 e U_2 resultar menor ou igual ao valor crítico de U , rejeita-se a hipótese nula de igualdade entre as médias populacionais. Neste trabalho, foi escolhido um nível de significância de 5%. Assim, o valor crítico tabelado de U , para comparar dois conjuntos de 10 dados (resultados para 10 ciclos da cultura) é igual a 23.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Calibração do modelo

A melhor qualidade da calibração, para os três indicadores estatísticos selecionados, foi obtida ao escolher como data de semeadura o dia 15 de novembro. A data de semeadura de 15 de outubro também gerou valores satisfatórios para os três indicadores estatísticos, porém em menor medida. Por último, a data de semeadura de 15 de dezembro apresentou valor satisfatório unicamente para o indicador PBIAS, enquanto para os outros dois indicadores a qualidade da calibração foi insatisfatória (Tabela 5.1.1.).

Tabela 5.1.1. Resultado dos indicadores estatísticos e seu valor satisfatório para avaliar a calibração do modelo AquaCrop Versão 4.0 para simular a produtividade da soja na bacia do rio Potiribu em três diferentes datas de semeadura

Indicador	Data de semeadura			Valor satisfatório *
	15 de Outubro	15 de Novembro	15 de Dezembro	
NSE	0,78	0,91	-0,50	> 0,50
PBIAS (%)	-3,92	2,69	3,42	± 25%
RSR	0,46	0,30	1,23	≤ 0,70

*(MORIASI et al., 2007)

O fato de ter conseguido a melhor qualidade da calibração para a data de semeadura de novembro faz sentido, pois esse é o mês que concentra a semeadura da soja no Rio Grande do Sul (BONATO, 1998; BARNI; MATZENAUER, 2000). A relação entre rendimentos observados e simulados, assumindo como data de semeadura o dia 15 de novembro, é apresentada na Figura 5.1.1.

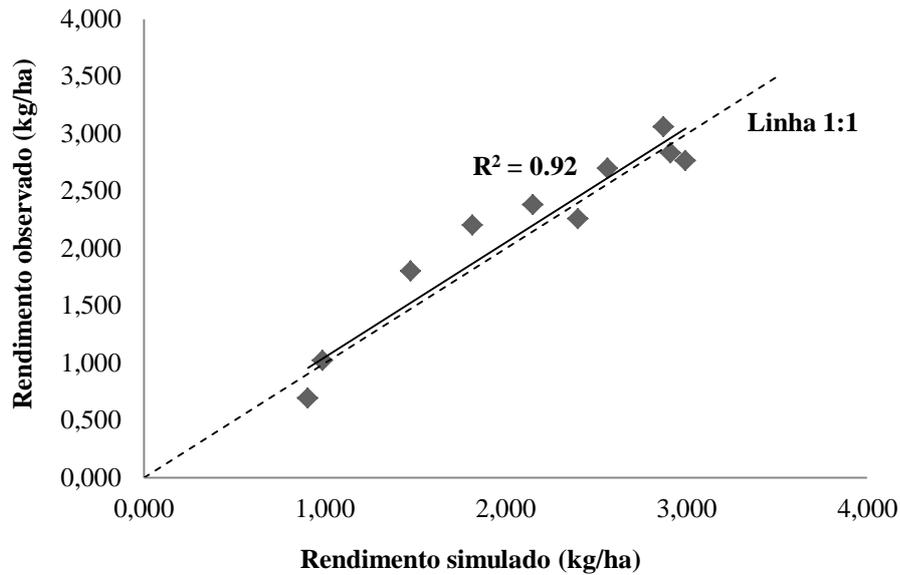


Figura 5.1.1. Relação entre rendimentos observados e simulados para dez safras da cultura da soja (2003/2004 - 2012/2013) na bacia do rio Potiribu, assumindo como data de semeadura o dia 15 de novembro

5.2. Mudanças climáticas esperadas durante os ciclos da cultura da soja para o período 2046/2047 - 2055/2056, em comparação com o histórico 2003/2004 - 2012/2013

As projeções baseadas no cenário de emissões A1B projetam o maior incremento da concentração atmosférica de CO₂. Segundo essas projeções, a concentração média histórica 2003/2004 – 2012/2013 passará de 386 ppm a 536 ppm no período 2046/2047 – 2055/2056. Por outro lado, as projeções baseadas no cenário de emissões B1 projetam um valor médio de 490 ppm para o período 2046/2047 – 2055/2056 (Tabela 5.2.1.).

Tabela 5.2.1. Variáveis climáticas médias e concentração média de CO₂ durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

Variáveis médias	Histórico (2003/2004 - 2012/2013)	Cenário A1B (2046/2047 - 2055/2056)		Cenário B1 (2046/2047 - 2055/2056)	
		CCCMA	CNRM-	CCCMA	CNRM-
		CGCM3.1	CM3	CGCM3.1	CM3
CO ₂ (ppm)	386	536	536	490	490
Precipitação* (mm)	701	903	667	848	662
Temp. Máx.** (°C)	29,5	28,4	31,2	28,0	30,6
Temp. Mín.** (°C)	17,6	18,0	20,2	17,4	19,4

*Média calculada a partir da precipitação acumulada dos dez ciclos da cultura. **Média calculada a partir das temperaturas diárias dos dez ciclos da cultura.

De acordo com as projeções do modelo CCCMA CGCM3.1, a precipitação total média para os ciclos da cultura do período 2046/2047 – 2055/2056 aumentará em comparação com a média histórica 2003/2004 – 2012/2013 (Figura 5.2.1.). Esse modelo prevê incrementos de 202 mm e 147 mm para os cenários de emissões A1B e B1, respectivamente (Tabela 5.2.1.). Esse incremento da precipitação coincide com o encontrado por Melo (2015). Segundo essa autora, a precipitação para a região noroeste do estado do Rio Grande do Sul se incrementaria até o final do século.

De forma contrária, as projeções do modelo CNRM-CM3 indicam que haverá uma leve diminuição da precipitação (Figura 5.2.1.). Esse modelo prevê diminuições de 34 mm e 39 mm para os cenários de emissões A1B e B1, respectivamente (Tabela 5.2.1.). Apesar de a maioria das pesquisas ter previsto um aumento da precipitação para a região de estudo, tem também evidência de estudos que indicam que a precipitação diminuiria até o final de século (MARENGO et al., 2010). Essa variabilidade nas projeções é decorrente do uso de diferentes modelos de circulação global e regional, e de diferentes cenários de emissões.

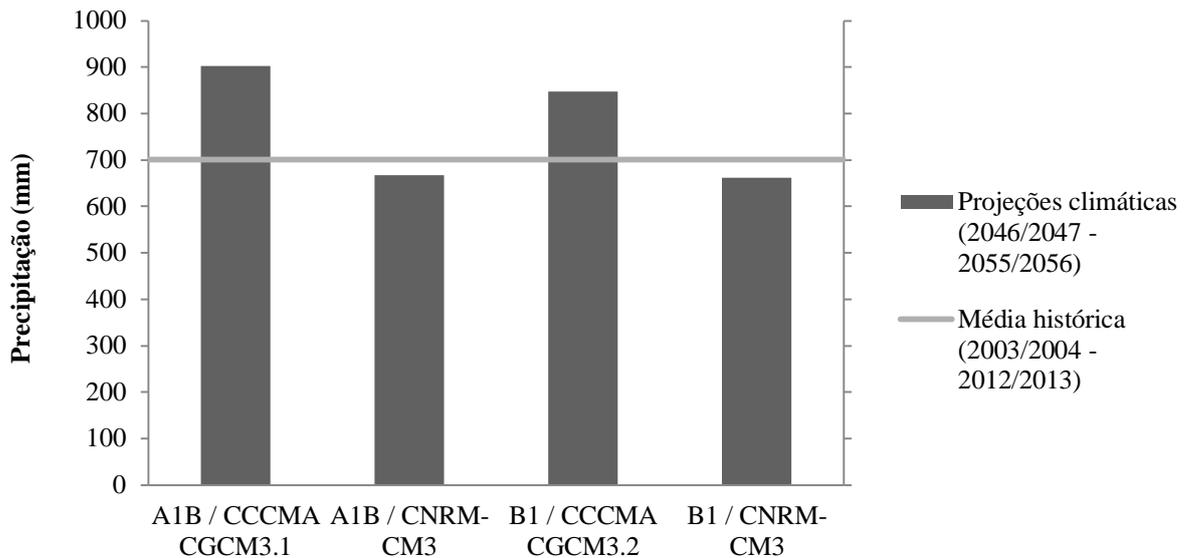


Figura 5.2.1. Precipitação total média durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

Apesar dos dois modelos climáticos utilizados neste trabalho indicarem duas condições opostas para as mudanças de precipitação, ambos coincidem em que essa precipitação terá uma melhor distribuição temporal. Enquanto para o histórico 2003/2004 – 2012/2013 o número médio de dias de precipitação durante o ciclo da cultura foi de 49, as projeções dos quatro modelos utilizados indicam que esse número médio de dias passará a se encontrar na faixa de 80 a 93 dias (Figura 5.2.2.). A melhor distribuição temporal da precipitação encontrada neste estudo discorda das observações de Mendonça (2006), que identificaram uma tendência de concentração dos eventos de precipitação nas últimas décadas.

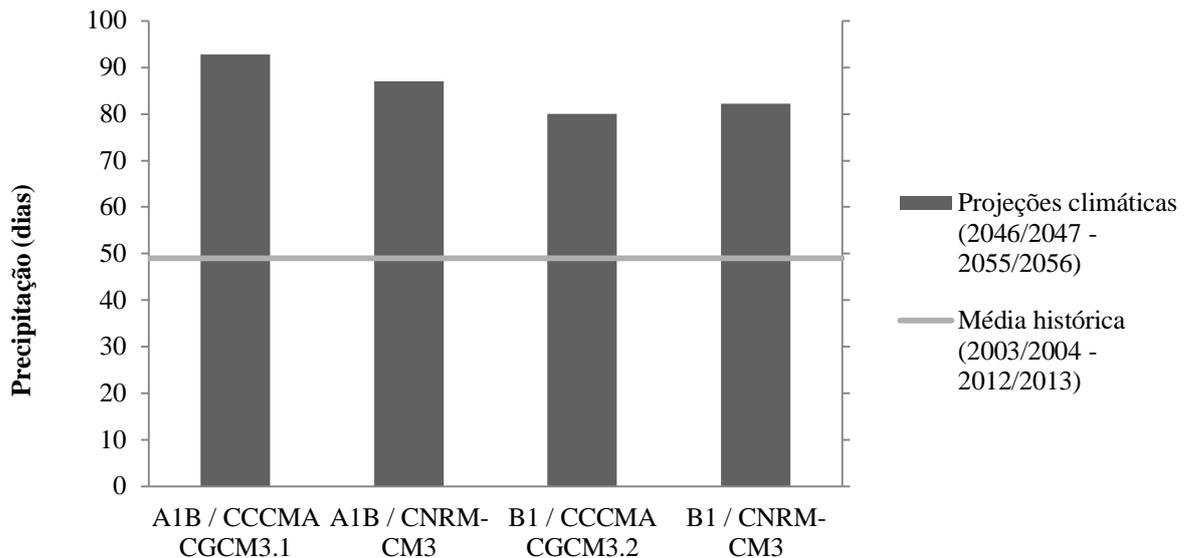


Figura 5.2.2. Número médio de dias de precipitação durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

Quanto à temperatura máxima média, o modelo CCCMA CGCM3.1 indica que haverá diminuição em comparação com a média histórica 2003/2004 – 2012/2013 (Figura 5.2.3.). Esse modelo prevê diminuições de 1,1 °C e 1,5 °C para os cenários de emissões A1B e B1, respectivamente (Tabela 5.2.1.). Em contraste, o modelo CNRM-CM3 indica que haverá aumento (Figura 5.2.3.), concordando assim do que indicam as pesquisas de Marengo et al. (2010) e Melo (2015), segundo as quais a temperatura para a região de estudo se incrementaria até o final do século. Os incrementos previstos pelo modelo CNRM-CM3 são de 1,7 °C e 1,1 °C para os cenários de emissões A1B e B1, respectivamente (Tabela 5.2.1.).

Quanto à temperatura mínima média, três das quatro projeções climáticas assumidas indicam que haverá incremento em comparação com a média histórica 2003/2004 – 2012/2013 (Figura 5.2.4.). Os incrementos previstos se encontram na faixa de 0,4 a 2,6 °C (Tabela 5.2.1.). Esse aumento das temperaturas mínimas, em maior medida do que as temperaturas máximas, concorda com a tendência identificada por Mendonça (2006). Somente as projeções do modelo CCCMA CGCM3.1 para o cenário de emissões B1 indicaram que haverá diminuição da temperatura mínima média, especificamente de 0,2 °C (Tabela 5.2.1.).

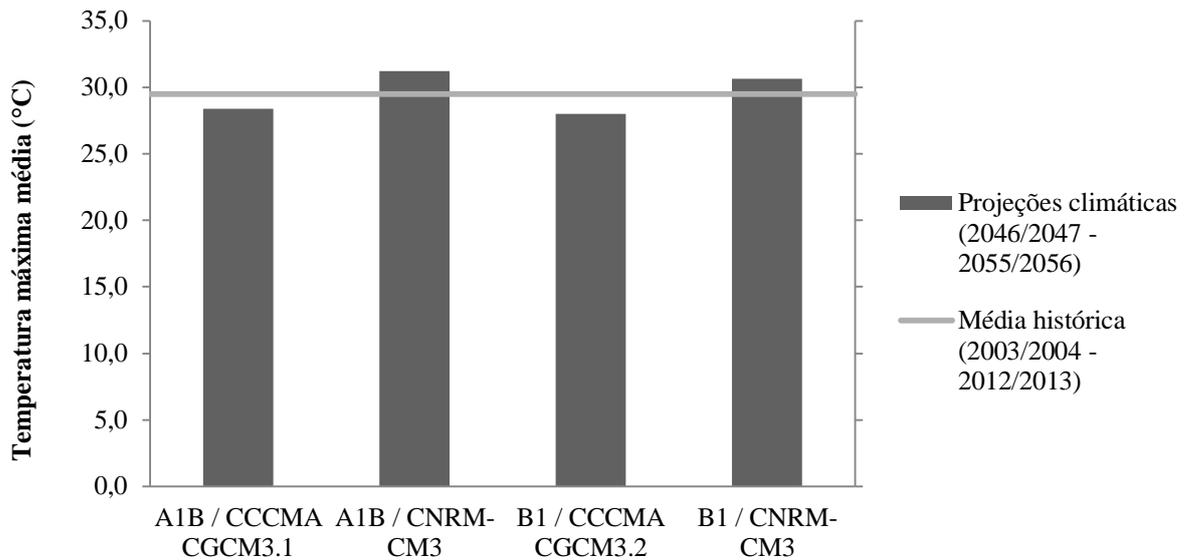


Figura 5.2.3. Temperatura máxima média durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

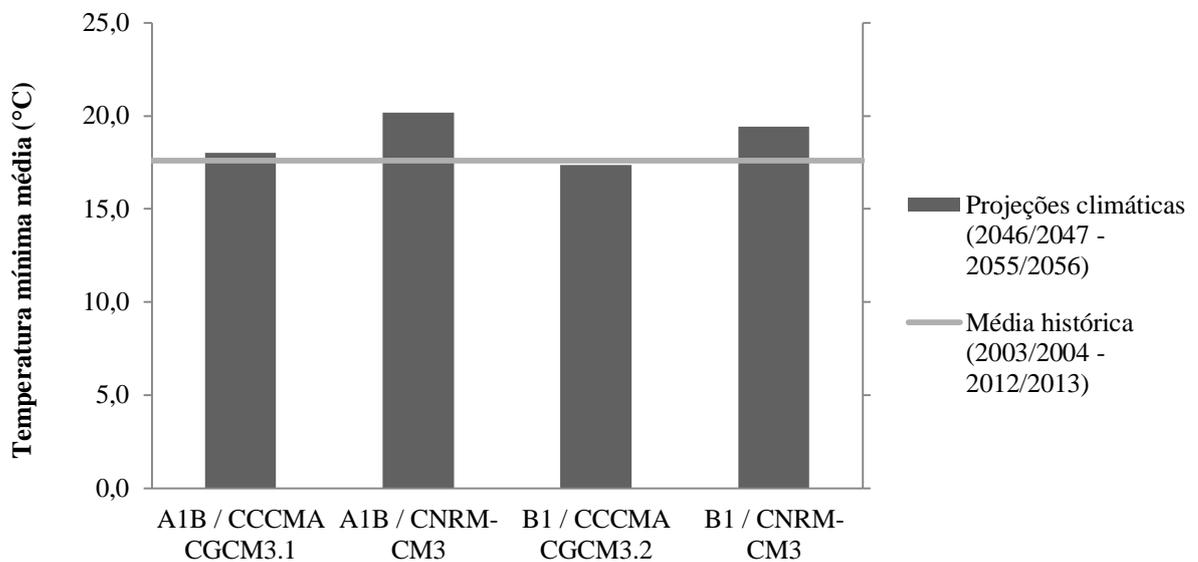


Figura 5.2.4. Temperatura mínima média durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

5.3. Ajuste da eficiência do uso da água (WP) pela concentração atmosférica de CO₂

A partir das concentrações atmosféricas de CO₂ da Tabela 5.2.1. e usando as equações 4.2.4.1., 4.2.4.2. e 4.2.4.3., foi calculada a WP ajustada. Assim, multiplicando a WP de referência para a soja (15 g/m²) pelo coeficiente de correção f_{CO_2} se obteve a WP_{adj} média para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para cada cenário de emissões do período 2046/2047 - 2055/2056 (Tabela 5.3.1.). O maior incremento na WP ocorreu para o cenário A1B, devido a uma diferença mais significativa da concentração de CO₂ em comparação com a concentração de referência da Eq. 4.2.4.2.

Tabela 5.3.1. Variáveis para o cálculo da WP ajustada média para a cultura da soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para dois cenários de emissões do período 2046/2047 - 2055/2056

Variáveis	Histórico	Período 2046/2047 - 2055/2056	
	2003/2004 - 2012/2013	Cenário A1B	Cenário B1
w	0,09	0,92	0,67
f_{CO_2}	1,04	1,28	1,23
WP_{adj} (g/m ²)	15,6	19,2	18,5

5.4. Efeito das mudanças climáticas sobre o rendimento de grãos de soja

Para todas as projeções climáticas assumidas, os resultados das simulações com o modelo AquaCrop Versão 4.0 indicaram que o rendimento médio de grãos de soja para o período 2046/2047 - 2055/2056 aumentará em comparação com a média histórica 2003/2004 - 2012/2013 (Figura 5.4.1). Os incrementos previstos se encontram na faixa de 0,759 a 1,429 kg/ha (Tabela 5.6.1.).

Quando assumidas as projeções climáticas do modelo CCCMA CGCM3.1, o incremento do rendimento pode ser atribuído facilmente aos aumentos tanto da precipitação (Figura 5.2.1.) como da eficiência do uso da água (WP) por parte da cultura (Tabela 5.3.1).

Quando assumidas as projeções climáticas do modelo CNRM-CM3, o incremento do rendimento não pode ser atribuído ao incremento da precipitação, pois na verdade essa

variável sofreu uma leve diminuição. Neste caso, o que contribuiu ao incremento do rendimento foi a melhor distribuição temporal da precipitação (Figura 5.2.2.). Essa melhor distribuição temporal da precipitação contribuiria para não atingir os limiares de depleção máxima da água total disponível (TAW) para redução da expansão foliar, fechamento de estômatos, falha da polinização e redução da expansão efetiva das raízes. Tudo isso adicionado a uma maior concentração atmosférica de CO₂ se traduziria em um maior rendimento da cultura.

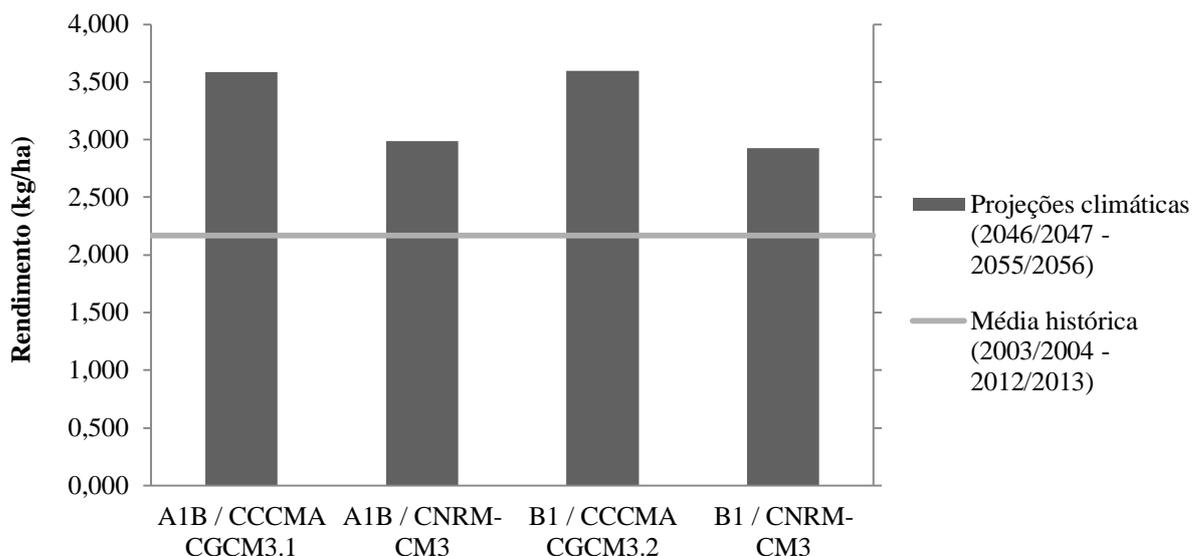


Figura 5.4.1. Rendimento médio de grãos de soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

O incremento do rendimento de grãos de soja previsto para todas as projeções climáticas analisadas neste estudo coincide com as previsões de Siqueira et al. (2000) e de Streck e Alberto (2006), que encontraram que o rendimento de grãos de soja se beneficiaria com as mudanças climáticas na região sul do Brasil e na região de Santa Maria - RS, respectivamente.

Ao observar a Figura 5.4.1. e a Figura 5.2.1., percebe-se que os maiores rendimentos correspondem às projeções climáticas com maior precipitação total média. Isso confirma a alta associação entre precipitação e rendimento de grãos de soja no Rio Grande do Sul, demonstrada nos estudos de Fontana et al. (2001), Cunha et al. (1998) e Berlato e Fontana (1999).

Ao observar as figuras 5.4.1., 5.2.3. e 5.2.4., percebe-se que os maiores rendimentos simulados se encontram associados a menores temperaturas médias, tanto máximas como mínimas. No entanto, do total de simulações realizadas para as projeções climáticas assumidas (40 no total), somente duas apresentaram dias com temperatura superior ao limiar estabelecido para estresse térmico por calor (40 °C). Dessas duas simulações, uma teve um dia só com temperatura superior a 40 °C e a outra teve dois dias com temperatura superior a esse limiar, o qual não reduziria o rendimento de maneira significativa, pois a magnitude do estresse térmico depende da sua duração no ciclo da cultura. De acordo com o mencionado anteriormente, a influência da temperatura sobre o rendimento seria unicamente por afetar o balanço hídrico de água no solo e não por afetar diretamente a produção de biomassa. Dessa forma, a temperatura não seria um fator limitante do rendimento de grãos de soja (desde o ponto de vista do estresse térmico). Isso ratifica o encontrado por Berlato, Fontana e Gonçalves (1992).

5.5. Efeito das mudanças de temperatura e precipitação sobre a demanda de água para irrigação

A demanda de água para irrigação média calculada para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 (297 mm) se encontra acima das faixas encontradas por Mota et al. (1996) (48 a 70 mm), Melo (2015) (10 a 160 mm) e Vivan et al. (2013) (163 a 239 mm), mas encaixa dentro da faixa estimada por Franke e Dorfman (2000) (216 a 523 mm).

Para as quatro projeções climáticas analisadas neste estudo, os resultados das simulações com o modelo AquaCrop Versão 4.0 revelaram que a demanda de água para irrigação média para o período 2046/2047 - 2055/2056 diminuirá em comparação com a média calculada para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 (Figura 5.5.1.). As diminuições foram calculadas na faixa de 85 mm a 132 mm.

Para as duas projeções climáticas do modelo CCCMA CGCM3.1, é fácil atribuir essa diminuição a uma maior precipitação projetada para o ciclo da cultura em comparação com a média histórica (Figura 5.2.1.), mas para as duas projeções do modelo CNRM-CM3 não é assim tão simples, porque a precipitação projetada para o ciclo da cultura é levemente inferior a da média histórica (Figura 5.2.1.). Para essas últimas duas projeções climáticas, a redução

da demanda de água para irrigação deveu-se à melhor distribuição temporal da precipitação durante o ciclo da cultura, a qual gerou menos ocasiões em que se superou a depleção máxima admitida da água facilmente disponível, e em consequência um menor número médio de eventos de irrigação (Tabela 5.5.1.).

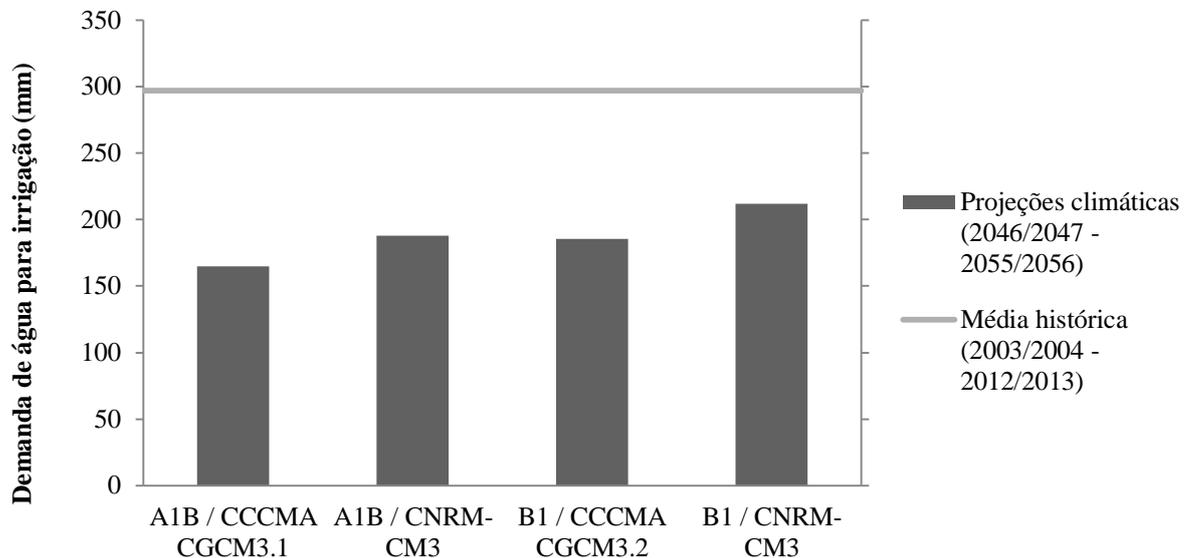


Figura 5.5.1. Demanda de água para irrigação média da cultura da soja calculada para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

Tabela 5.5.1. Número médio de dias de precipitação e de eventos de irrigação durante o ciclo da cultura da soja, para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para duas projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas no modelo de circulação global CNRM-CM3 para os cenários de emissões A1B e B1

Variáveis médias	Histórico	Período 2046/2047 - 2055/2056	
	2003/2004 - 2012/2013	(modelo CNRM-CM3)	
		Cenário A1B	Cenário B1
Precipitação (dias)	49	87	82
Eventos de irrigação (dias)	69	45	47

Melo (2015) também avaliou os impactos das mudanças climáticas ao longo deste século sobre as demandas futuras de água para irrigação na região noroeste do estado do Rio Grande

do Sul sob uma abordagem estocástica e considerando diferentes projeções de modelos climáticos para o período de 2011 – 2100, comparando com o passado (1961 – 1990). Os resultados dos modelos regionais que ela utilizou, indicaram também que haverá uma redução nas demandas de água para irrigação, devido a aumentos da precipitação.

Ao observar a Figura 5.5.1. e a Figura 5.2.1., percebe-se que quanto maior a precipitação total média projetada para o ciclo da cultura de cada cenário, menor a demanda de água para irrigação obtida. Por outro lado, ao observar as figuras 5.5.1., 5.2.3. e 5.2.4., percebe-se que as menores demandas de água para irrigação se encontram associadas a menores temperaturas médias, tanto máximas como mínimas.

5.6. Efeito isolado do CO₂ sobre o rendimento de grãos de soja

Ao repetir as simulações para as quatro projeções climáticas analisadas, mantendo as concentrações atmosféricas de CO₂ do histórico 2003/2004 - 2012/2013, os rendimentos resultaram inferiores aos calculados quando foi admitido aumento da concentração (Figura 5.6.1). As diferenças no rendimento médio para estas duas situações oscilam entre 428 kg/ha e 600 kg/ha, sendo esta a contribuição de efeito estimulador do CO₂ sobre o rendimento de grãos de soja (Tabela 5.6.1).

Ao comparar a altura das barras (para uma mesma projeção climática) da Figura 5.6.1, observar-se que para as projeções do modelo CCCMA CGCM3.1 o incremento do rendimento em comparação com a média histórica se deveu principalmente ao aumento da precipitação. De forma contrária, para as projeções do modelo CNRM-CM3, o incremento do rendimento em comparação com a média histórica se deveu principalmente ao aumento da concentração atmosférica de CO₂.

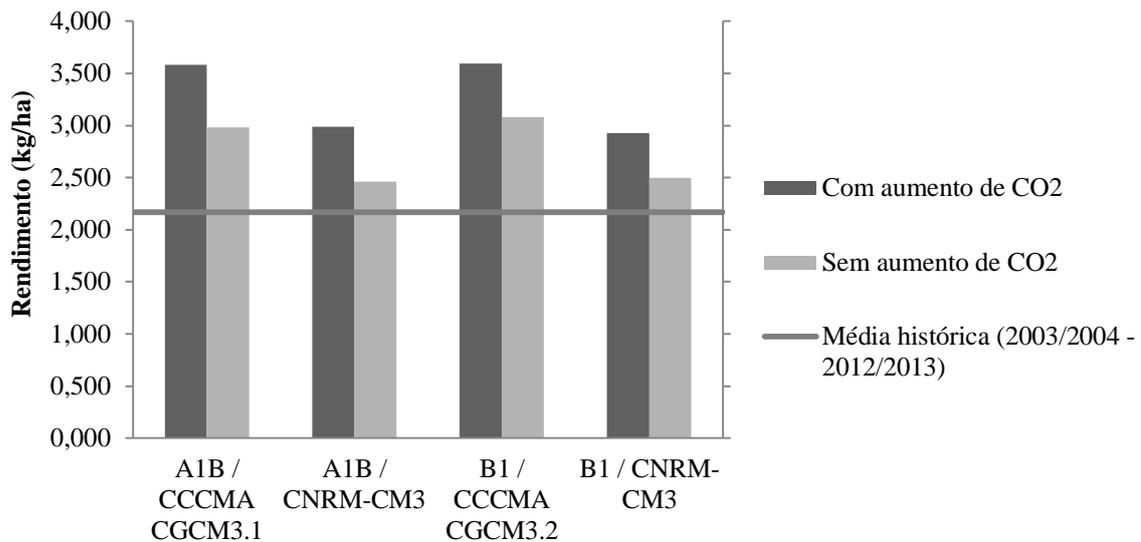


Figura 5.6.1. Rendimento médio de grãos de soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1, considerando e sem considerar aumento da concentração atmosférica de CO₂

Tabela 5.6.1. Rendimento médio de grãos de soja para o histórico 2003/2004 - 2012/2013 e para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1, considerando e sem considerar aumento da concentração atmosférica de CO₂

Variáveis médias	Histórico (2003/2004 - 2012/2013)	Cenário A1B (2046/2047 - 2055/2056)				Cenário B1 (2046/2047 - 2055/2056)			
		CCCMA CGCM3.1		CNRM-CM3		CCCMA CGCM3.1		CNRM-CM3	
CO ₂ (ppm)	386	536	386	536	386	490	386	490	386
Y (kg/ha)	2,168	3,584	2,983	2,988	2,459	3,597	3,080	2,927	2,500

5.7. Comparação de médias pelo teste de Mann - Whitney

Para todas as projeções climáticas assumidas (2046/2047 - 2055/2056), tanto as médias de rendimento de grãos de soja como as médias de demanda de água para irrigação resultaram

diferentes das médias do histórico 2003/2004 – 2012/2013 pelo teste de Mann – Whitney, para um nível de significância de 5% (Tabelas 5.7.1. e 5.7.2.). Assim, é possível afirmar que tanto o incremento do rendimento como a diminuição da demanda de água para irrigação previstos pelas simulações realizadas, podem ser considerados como significativos.

Tabela 5.7.1. Resultado da estatística de Mann – Whitney (U) para comparar a média de rendimento de grãos de soja do histórico 2003/2004 – 2012/2013 com a média de rendimento de grãos de soja para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

Projeção climática comparada com o histórico 2003/2004 – 2012/2013	U*
A1B / CCCMA CGCM3.1	11
A1B / CNRM-CM3	22,5
B1 / CCCMA CGCM3.1	8
B1 / CNRM-CM3	20

*U deve ser menor ou igual a 23 para rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as médias populacionais para um nível de significância de 5%.

Tabela 5.7.2. Resultado da estatística de Mann – Whitney (U) para comparar a média de demanda de água para irrigação do histórico 2003/2004 – 2012/2013 com a média de demanda de água para irrigação para quatro projeções climáticas do período 2046/2047 - 2055/2056, baseadas em dois modelos de circulação global (CCMA CGCM3.1 e CNRM-CM3) para os cenários de emissões A1B e B1

Cenário comparado com o histórico 2003/2004 – 2012/2013	U*
A1B / CCMA CGCM3.1	6
A1B / CNRM-CM3	18
B1 / CCMA CGCM3.1	14
B1 / CNRM-CM3	22

*U deve ser menor ou igual a 23 para rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as médias populacionais para um nível de significância de 5%.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo AquaCrop Versão 4.0 foi calibrado satisfatoriamente para simular o rendimento de grãos de soja na bacia do rio Potiribu. A melhor qualidade da calibração foi obtida quando foi adotada como data de semeadura o dia 15 do mês de novembro.

Para todas as projeções climáticas assumidas, os resultados das simulações com o modelo AquaCrop Versão 4.0 revelaram que o rendimento médio de grãos de soja para o período 2046/2047 - 2055/2056 aumentará em comparação com a média histórica 2003/2004 - 2012/2013. Quando assumidas as projeções climáticas do modelo CCCMA CGCM3.1, o maior responsável desse aumento foi o incremento da precipitação. Quando assumidas as projeções climáticas do modelo CNRM-CM3, o maior responsável desse aumento foi o incremento da concentração atmosférica de CO₂.

Ao mesmo tempo, para todas as projeções climáticas assumidas neste trabalho, os resultados das simulações revelaram que a temperatura não será um fator limitante do rendimento de grãos de soja.

A contribuição do efeito estimulador do CO₂ sobre o incremento do rendimento médio de grãos de soja foi quantificada na faixa de 428 a 600 kg/ha.

Para todas as projeções climáticas assumidas, os resultados das simulações com o modelo AquaCrop Versão 4.0 também indicaram que haverá diminuição da demanda de água para irrigação média do período 2046/2047 - 2055/2056 em comparação com a média calculada para o histórico 2003/2004 - 2012/2013. Quando assumidas as projeções climáticas do modelo CCCMA CGCM3.1, a diminuição da demanda de água para irrigação ocorreu devido ao incremento da precipitação. Quando assumidas as projeções climáticas do modelo CNRM-CM3, a diminuição da demanda de água para irrigação ocorreu devido à melhor distribuição temporal da precipitação durante o ciclo da cultura.

Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de procedimentos de simulação que considerem também o efeito do aumento da concentração atmosférica de CO₂ sobre a transpiração da cultura, para poder avaliar o efeito final dessa variável sobre a demanda de água para irrigação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell And Environment**, [S. L.], v. 30, p.258-270, 2007.

ANJOS, Franklin Alves dos. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AQUACROP**. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011.

BARNI, Nídio Antonio; MATZENAUER, Ronaldo. Ampliação do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, [S. L.], v. 6, n. 2, p.189-203, 2000.

BERLATO, M.A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.) **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2.ed., 1999. 125p.

BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos da soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

BERLATO, Moacir A.; FONTANA, Denise C.; GONÇALVES, Hélio M.. Relação entre rendimento de grãos da soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, p.695-702, maio 1992.

BERLATO, Moacir Antonio; FONTANA, Denise Cybis. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p.119-125, 1999.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do

Tanque Classe A e radiação solar global. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 251-259, 1986.

BONATO, Emídio Rizzo et al. Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 6, p.879-884, 1998.

BRAGA, Nelson R.; COSTA, José A.. Avaliação de dez cultivares de soja pelo índice de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 18, n. 3, p.253-260, mar. 1983.

CHEVALLIER, P.; CASTRO, N. M. R.. As precipitações na Região de Cruz Alta e Ijuí (RS – Brasil). **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 10**, Rio de Janeiro. ABRH/APRH, p. 183-192. 1991.

COLASANTE, Luiz Osvaldo; COSTA, José Antonio. Índice de colheita e rendimento biológico na comparação da eficiência de variedades de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 16, n. 2, p.225-230, mar. 1981.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CUNHA, Gilberto Rocca da et al. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p.111-119, 1998.

CUNHA, Gilberto Rocca da et al. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p.446-459, 2001.

FLATO, G.M.; BOER, G.J.. Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. **Geophysical Research Letters**, [S. L.], v. 28, n. 1, p.195-198, 01 Jan. 2001.

FONTANA, Denise Cybis et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p.399-403, mar. 2001.

FRANKE, Alberto Elvino; DORFMAN, Raul. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p.1675-1683, ago. 2000.

GEDANKEN, Alexandre et al. Utilização do modelo Ceres-Maize na avaliação de estratégias de irrigação na cultura do milho em duas regiões do Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p.439-447, 2003.

GIRVETZ, Evan H. et al. **Making Climate Data Relevant to Decision Making: The important details of Spatial and Temporal Downscaling**. 2013. Disponível em: <<https://scholarcommons.scu.edu/handle/11123/641>>. Acesso em: 02 nov. 2015.

IGNACIUK, Ada; MASON-D'CROZ, Daniel. Modelling Adaptation to Climate Change in Agriculture. **OECD Food, Agriculture And Fisheries Papers**, [S. L.], n. 70, p.1-58, 22 Dec. 2014.

JIMÉNEZ, Karena Quiroz; MELO, Tirzah Moreira de; LOUZADA, José Antônio. Uso de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto em um modelo agro-hidrológico. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p.496-508, jul. 2013.

JONES C.A.; KINIRY, J.R. **Ceres-Maize: A simulation model of maize growth and development**. College Station: Texas A & M University Press, 1986.

KIMBALL, B.A.; KOBAYASHI, K.; BINDI, M.. Responses of Agricultural Crops to Free-air CO₂ Enrichment. **Advances In Agronomy**, [S. L.], v. 77, p.293-368, 2002.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R. F. A.; JACOBS, C. M. J. **SWAP version 3.2. Theory description and user manual**. Wageningen, Alterra, Alterra Report 1649, 262 p., 2008.

MALL, R.K. et al. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S. L.], v. 121, p.113-125, 2004.

MARENGO, Jose A. et al. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, [S. L.], v. 35, p.1073-1097, 2010.

MARTINS, Minella Alves; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; TOMASELLA, Javier. Modelos de produtividade agrícola aplicados à agricultura de sequeiro: Limitações e vantagens para avaliação de colapso de safras. **Agropecuária Científica no Semiárido**, [s. L.], v. 10, n. 4, p.41-48, out/dez. 2014.

MATOS, Alex Bortolon de. **Efeito do controle de montante na previsão hidrológica de curto prazo com redes neurais: aplicação à bacia do Ijuí**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MATZENAUER, Ronaldo; BARNI, Nídio Antonio; MALUF, Jaime Ricardo Tavares. Estimativa do consumo relativo de água para a cultura da soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p.1013-1019, nov/dez. 2003.

MATZENAUER, R. et al. Análise agroclimática das disponibilidades hídricas para a cultura da soja na região do Planalto Médio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.263-275, 1998.

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. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MENDONÇA, Francisco. Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: alguns indicadores da região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. L.], v. 2, p.71-86, dez. 2006.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, [S. L.], v. 50, n. 3, p. 885-900. 2007.

MOTA, Fernando Silveira da et al. Análise agroclimatológica da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p.133-138, 1996.

OLIVEIRA, Nilson Teixeira de. **Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PEREIRA, Marco Alésio Figueiredo; KOBIYAMA, Masato; CASTRO, Nilza Maria dos Reis. Análise de variâncias pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Tabão – RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. L.], v. 29, n. 3, p.409-419, set. 2014.

PUTEH, Adam B. et al. Soybean [Glycine max (L.) Merrill] seed yield response to high temperature stress during reproductive growth stages. **Australian Journal of Crop Science**, [S. L.], v. 10, n. 7, p.1472-1479, 2013.

RAES, Dirk. **The ETo Calculator: Reference Manual Version 3.2**. 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/docs/ReferenceManualV32.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

RAES, Dirk et al. **Reference Manual AquaCrop Version 4.0: Chapter 3. Calculation procedures**. 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Chapter3.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

RAES, Dirk et al. **Reference Manual AquaCrop Version 4.0: Annex I. Crop parameters**. 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Annexes.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

SALAS-MÉLIA, D. et al. **Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model**. 2005. Disponível em: <http://www.cnrn.meteo.fr/scenario2004/paper_cm3.pdf>. Acesso em: 01 Dec. 2015.

SANTOS, Marcos Alex dos. **Extração de água so solo por plantas de soja: modelagem hidrofísica e empírica**. 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física do Ambiente Agrícola, Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, [S. L.], v.15, p.125-141, 1986.

SIQUEIRA, Otávio João Wachholz de et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos giss e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 2, p.311-320, 2000.

SIQUEIRA, Otávio João Fernandes de; FARIAS, José Renato Bouças de; SANS, Luiz Marcelo Aguiar. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p.115-129, 1994.

STEDUTO, Pasquale et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield: Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437, Jan. 2009.

STRECK, Nereu Augusto; ALBERTO, Cleber Maus. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 9, p.1351-1359, jul. 2006.

STRECK, Nereu Augusto. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p.730-740, maio/jun. 2005.

THUZAR, M. et al. The Effects of Temperature Stress on the Quality and Yield of Soya Bean [(Glycine max L.) Merrill.]. **Journal of Agricultural Science**, [S. L.], v. 2, n. 1, p.172-179, mar. 2010.

VAN ITTERSUM, M.K. et al. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal Of Agronomy**, [S. L.], v. 18, p. 201-234. 2003.

VANUYTRECHT, Eline; RAES, Dirk; WILLEMS, Patrick. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S. L.], v. 151, p.1753-1762, 2011.

VANUYTRECHT, Eline; RAES, Dirk; WILLEMS, Patrick. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. **Environmental Modelling & Software**. [S. L.], v. 51, p. 323-332, 2014.

VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VIVAN, Gisele Aparecida et al. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p.282-292, abr. 2013.

ZABOT, Lucio. **Caracterização agronômica de cultivares transgênicas de soja cultivadas no Rio Grande do Sul**. 2009. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ZHANG, Lixia et al. Warming decreases photosynthates and yield of soybean [*Glycine max(L.) Merrill*] in the North China Plain. **The Crop Journal**, [S. L.], v. 2, n. 4, p.139-146, 2016.