



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA
DOUTORADO EM METEOROLOGIA**

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A PRODUTIVIDADE E
PEGADA HÍDRICA DA SOJA CULTIVADA NA REGIÃO DO MATOPIBA**

ROBERTA ARAÚJO E SILVA

ORIENTADOR: Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

CAMPINA GRANDE – PB

Janeiro / 2018

ROBERTA ARAÚJO E SILVA

**IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A PRODUTIVIDADE E
PEGADA HÍDRICA DA SOJA CULTIVADA NA REGIÃO DO MATOPIBA**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Subárea: Agrometeorologia

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

CAMPINA GRANDE – PB

Janeiro / 2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586i Silva, Roberta Araújo e.
Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba / Roberta Araújo e Silva. – Campina Grande, 2018.
113 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.
"Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva".
Referências.

1. Glycine Max. 2. Meteorologia - Rendimento. 3. Clima Futuro. I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Título.


CDU 551.58(043)


ROBERTA ARAÚJO E SILVA


IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A PRODUTIVIDADE E A
PEGADA HÍDRICA DA SOJA CULTIVADA NA REGIÃO DO MATOPIBA

TESE APROVADA EM 30/01/2018

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. GIRLENE FIGUEIREDO MACIEL
Universidade Federal do Tocantins


Prof. Dr. ROMILDO MORANT DE HOLANDA
Departamento de Tecnologia Rural
Universidade Federal Rural de Pernambuco

*Aos meus pais, Ademir Sousa e Silva, Iraci Araújo
e Silva, irmãos Fábio e Adamo, e sobrinhos Inara,
Leonardo e Felipe.*

DEDICO

A Nossa Senhora de Nazaré.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema, pelo amor infinito que me ampara, consola e fortalece em todos os momentos.

A Universidade Federal do Tocantins – UFT pelo consentimento de afastamento para qualificação profissional e apoio durante as atividades de experimento de campo.

A Universidade Federal de Campina Grande – UFCG pela oportunidade de fazer parte do seu corpo discente.

A todos os professores da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG e Universidade Federal do Pará - UFPA, que contribuíram para a minha formação profissional e pessoal, proporcionando conhecimento, não apenas racional, mas a manifestação do caráter que me fizeram chegar até aqui.

Ao Prof. Vicente P. R da Silva, meu orientador, pela sua admirável orientação, paciência e confiança, atributos essenciais para a elaboração e conclusão desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de doutorado.

À Divanete (*in memmorian*) e Arilene, exemplos de profissionalismo, pelo apoio e atenção disponibilizada durante o curso.

Ao Prof. Girlene Maciel, coordenador do LABMET, pelo incentivo a buscar qualificação profissional, amizade e aprendizado disponibilizado durante as minhas atividades junto ao LABMET na UFT.

Ao Prof. José Luiz Cabral pelo aprendizado, amizade e colaboração na construção do trabalho de campo e pesquisa.

Aos parceiros de experimentos: Clemilda Nunes, Frank Borges, Alessandra Lima, Cláudio Aguiar, Flávia Gonçalves, Albert Lenno, Geovana e aos trabalhadores da jardinagem e manutenção elétrica da UFT, pessoas imprescindíveis nas atividades de campo.

Aos amigos de doutorado e parceiros de vida: Alexandra, Leandro, Camilla e Ricardo, pela amizade construída durante minha estadia em Campina Grande e contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos de Palmas – TO: Dona Maria, Eronildes, Leonardo, Gracelena, César, Luciana, Jussira e Sr. Francisco, pelo afeto e acolhimento nos bons e maus momentos.

A minha família, meu porto seguro, em especial ao meu pai, Ademir Sousa e Silva, pelas palavras de incentivo, por sempre me fazer acreditar que iria dar certo e não me deixar

desistir. A minha mãe pela afeição, renúncia, incentivo a buscar condições melhores de vida através dos estudos.

Aos meus filhos do coração Inara, Leonardo, Felipe e Petruccio, pela paciência e carinho.

A todas as pessoas e situações que de alguma forma contribuíram para minha evolução pessoal e profissional.

Muito obrigada!

“Se soubéssemos o que era aquilo que
estávamos fazendo, não seria chamado de
pesquisa, não é mesmo?”

Albert Einstein

RESUMO

Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba

Neste estudo foram avaliadas as condições atuais e os efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região de Matopiba. Para simular a produtividade da cultura foi usado o modelo AquaCrop versão 5.0 da FAO, calibrado com dados do ano de 2016 e validado com os de 2014, usando parâmetros de clima, solo, cultura e manejo coletados em duas campanhas experimentais realizadas entre os meses de junho e outubro nos anos de 2014 e 2016 em Palmas, TO. O desempenho do modelo foi avaliado utilizando os indicadores estatísticos: erro de previsão (Ep), coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio absoluto (EMA), eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), e o índice de concordância de Willmott's (d). A calibração e validação da produtividade da cultura de soja estimada pelo modelo AquaCrop, apresentaram resultados satisfatórios, ilustrando a robustez e a aplicabilidade geral do modelo. O modelo AquaCrop subestima a produtividade de grãos de soja, para condições de estresse hídrico severo durante todo o ciclo de cultivo. Após a calibração e validação, o AquaCrop foi utilizado como ferramenta de simulação de produtividade da cultura da soja para o cenário atual (2016) e de mudanças climáticas a médio (2045/2046; 2055/2056) e longo prazo (2075/2076; 2064/2095), alimentado por dados de dois modelos climáticos (HadGEM2-ES e MIROC5) e considerando as RCP 4.5 e 8.5. Em seguida, calculou-se a pegada hídrica (verde, azul e cinza) de soja atual dos principais municípios produtores, de cada estado que compõem a região do Matopiba. Posteriormente, avaliaram-se os efeitos das possíveis mudanças climáticas sob a produtividade e pegada hídrica da soja, considerando as variações climáticas com foco na temperatura, precipitação e CO_2 . Os modelos climáticos projetaram aumento da produtividade em ambas as RCP consideradas, porém mais acentuado sob a RCP 8.5, em decorrência do aumento da temperatura e concentração de CO_2 e a precipitação, que mesmo sofrendo redução nos totais pluviométricos ao longo do tempo, ainda atendendo a necessidade hídrica da soja. As PH_{soja} atuais da região do Matopiba, variaram de 2036,60 m^3t^{-1} a 2584,12 m^3t^{-1} , valores similares aos encontradas na literatura. Sob cenários de mudanças climáticas, a PH_{soja} decresce ao longo dos anos. A PH_{soja} futura decresce, especialmente a componente verde, devido ao aumento menos acentuado da evapotranspiração, resultando em maior rendimento final. As PH_{verde} diminuem ao longo dos anos, as PH_{azul} aumenta na mesma proporção e as PH_{cinza} apresentam comportamento praticamente contínuo. Os resultados deste estudo podem ser usados para quantificar a produtividade futura da soja, a demanda de água e a sua utilização, bem como obter informações úteis para a gestão dos recursos hídricos na região de estudo.

Palavras-chave: *Glycine max*; AquaCrop; rendimento; Clima futuro.

ABSTRACT

Impact of climate change on productivity and water footprint of soybeans grown in the Matopiba region

This study evaluated the current conditions and effects of climate change on the productivity and water footprint of soybean cultivated in Matopiba region. To simulate crop productivity, the FAO AquaCrop version 5.0 model was used, calibrated with data from 2016 and validated with 2014, using climate, soil, crop and management parameters collected in two experimental campaigns conducted between the months of June and October in the years 2014 and 2016 in Palmas, TO. The performance of the model was evaluated using the statistical indicators: prediction error (Ep), coefficient of determination (R^2), square root mean error (RMSE), mean absolute error (EMA), Nash efficiency and Sutcliffe (NSE) and Willmontt's agreement index (d). Calibration and validation of soybean crop productivity estimated by the AquaCrop model presented satisfactory results, illustrating the robustness and general applicability of the model. The AquaCrop model underestimates soybean grain yield for severe water stress conditions throughout the growing cycle. After calibration and validation, AquaCrop was used as a simulation tool for soybean crop productivity for the current scenario (2016) and medium-term (2045/2046; 2055/2056) and long-term (2075/2076; 2064/2095), fed by data from two climatic models (HadGEM2-ES and MIROC5) and considering RCPs 4.5 and 8.5. Then, the water footprint (green, blue and gray) of the current soybean of the main producing municipalities of each state that compose the Matopiba region was calculated. Subsequently, the effects of possible climatic changes under soybean productivity and water footprint, considering the climatic variations with focus on temperature, precipitation and CO_2 , were evaluated. The climatic models projected increase of productivity in both RCP considered, but more accentuated under RCP 8.5, due to the increase in temperature and concentration of CO_2 and precipitation, that even undergoing a reduction in rainfall totals over time, still taking into account water requirement of soybeans. The current PH_{soja} of the Matopiba region, ranged from $2036.60 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$ to $2584.12 \text{ m}^3\text{t}^{-1}$, values similar to those found in the literature. Under scenarios of climate change, the PH_{soja} decreases over the years. The future PH_{soja} decreases, especially the green component, due to the less accentuated increase of the evapotranspiration, resulting in greater final yield. PH_{verde} decreases over the years, PH_{azul} increases in the same proportion and PH_{cinza} show practically continuous behavior. The results of this study can be used to quantify future soybean yield, water demand and utilization, as well as to obtain useful information for the management of water resources in the study region.

Keywords: *Glycine max*; AquaCrop; Yield; Future climate.

LISTA D E FIGURAS

Figura 1. Delimitação territorial da região do Matopiba e as 31 microrregiões geográficas do IBGE que a compõem	35
Figura 2. Mapa do bioma da região do Matopiba	36
Figura 3. Mapa do solo da região do Matopiba.	37
Figura 4. Mapa das bacias hidrográficas e principais rios da região do Matopiba	38
Figura 5. Mapa climático da região do Matopiba e localização das estações meteorológicas do INMET	39
Figura 6. Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; Tn- temperatura mín do ar; Tx – temperatura máx do ar; ETo - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr- transpiração da cultura; gs - condutância estomática; WP- produtividade da água; HI - índice de colheita; CO2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES – escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) - diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação.....	46
Figura 7. Localização geográfica do estado do Tocantins, com destaque para o município de Palmas	49
Figura 8. Variáveis meteorológicas durante o ciclo de cultivo da cultura de soja nas campanhas experimentais de 2014 (a, b) e 2016 (c, d)	51
Figura 9. Resultados da calibração do modelo AquaCrop para a produtividade de grãos de soja TMG 1288 RR sob todos os tratamentos de irrigação	67
Figura 10. Resultados da validação do modelo AquaCrop para a produtividade de grãos de soja TMG 1288 RR sob todos os tratamentos de irrigação	70
Figura 11. Temperatura média durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelo modelos HadGEM2-ES para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo	

(2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos – TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c), e Formosa do Rio Preto –BA (d) 72

Figura 12. Temperatura média durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelos modelos MIROC5 para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 74

Figura 13. Precipitação acumulada durante o ciclo de crescimento da soja, entre 1 de novembro e 10 de março, projetados pelo modelo HadGEM2-ES para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 76

Figura 14. Precipitação acumulada durante o ciclo de crescimento da soja, entre 1 de novembro e 10 de março, projetados pelo modelo MIROC para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 78

Figura 15. Evapotranspiração durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelos modelos HadGEM2-ES para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 80

Figura 16. Evapotranspiração durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelos modelos MIROC5 para o cenário atual (cinza), e sob os cenários RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo

(2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos-TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 82

Figura 17. Estimativa da PH verde, azul e cinza e a produtividade total para as cultivar de soja TMG 1288RR, projetada pelos modelos HadGEM2-ES para o cenário de RCP 4.5 e RCP 8.5, para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 89

Figura 18. Estimativa da PH azul, verde e cinza e a produtividade total para as cultivar de soja TMG 1288RR, projetada pelos modelos MIROC5 para o cenário de RCP 4.5 e RCP 8.5, para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d) 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas Características hidráulicas do solo da estação experimental da Universidade Federal do Tocantins – UFT Campus Palmas.....	52
Tabela 2. Parâmetros conservativos e não conservativos da cultivar de soja TMG 1288 RR utilizados na calibração do modelo AquaCrop.	53
Tabela 3. Tratamentos de irrigação aplicados à cultura da soja cultivada em Palmas, TO, em função da evapotranspiração da cultura (ET _c).	56
Tabela 4. Localização geográfica dos principais municípios produtores de grãos de soja, de cada estados, que compõem a região do Matopiba.	61
Tabela 5. Resultados da calibração e validação da produtividade para os diferentes tratamentos de irrigação.....	65
Tabela 6. Estatísticas do erro de previsão da calibração do modelo AquaCrop para todos os tratamentos de irrigação.....	66
Tabela 7. Estatísticas do erro de previsão da validação do modelo AquaCrop para todos os tratamentos de irrigação.....	69
Tabela 8. Concentração de CO ₂ e produtividade da soja estimada pelos modelos climático HadGEM2 – ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidade de Balsas - MA, Campos Lindos - TO, Baixa Grande do Ribeiro - PI e Formosa do Rio Preto - BA.	84
Tabela 9. Concentração de CO ₂ e produtividade da soja estimada pelos modelos climáticos HadGEM2 – ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidade de Balsas - MA, Campos Lindos - TO, Baixa Grande do Ribeiro - PI e Formosa do Rio Preto - BA.	85
Tabela 10. Contribuição percentual da PH _{verde} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.....	93
Tabela 11. Contribuição percentual da PH _{verde} da soja para cenário atual e projeções para os períodos a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095),	

geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA..... 94

Tabela 12. Contribuição percentual da PH_{azul} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA..... 95

Tabela 13. Contribuição percentual da PH_{azul} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA..... 96

Tabela 14. Contribuição percentual da PH_{cinza} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA..... 97

Tabela 15. Contribuição percentual da PH_{cinza} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA..... 98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANA - Agência Nacional de Águas.
- B – Biomassa.
- CC - Cobertura verde do dossel.
- CC_x - Cobertura máxima do dossel.
- CC₀ - Cobertura do solo pelo dossel com 90% de emergência.
- CGC - Coeficiente de crescimento do dossel.
- CDC - Coeficiente de declínio do dossel.
- C_{max} - Máxima concentração aceitável.
- C_{nat} - Concentração natural do poluente.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.
- CP – Carga de poluentes que entra no sistema.
- DAP – Dias após o plantio.
- DCH_{verde} - Demanda de água verde da cultura da soja.
- DCH_{azul} - Demanda de água azul da cultura da soja.
- E_e - Espaçamento entre emissores.
- E_i - eficiência de irrigação ET – Evapotranspiração.
- E_l - Espaçamento entre linhas de irrigação.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- ET_c – Evapotranspiração total da cultura
- ET_o – Evapotranspiração de referência
- ET_{verde} – Evapotranspiração diária de água verde.
- ET_{azul} – Evapotranspiração diária de água azul.
- FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.
- F_c - Fator de cobertura do solo.
- FC - Capacidade de campo
- GCM Modelo de Circulação Global
- GEE – Gases do efeito estufa.
- HI - índice de colheita.
- IAF – Índice de área foliar.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.

IPCC/AR5 - Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.

K_c – Coeficiente de cultivo.

K_{sat} - Condutividade hidráulica à saturação.

K_s - Coeficiente de estresse hídrico.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MATOPIBA - Acrônimo das siglas MA, TO, PI e BA.

PH_{azul} - Pegada hídrica azul da cultura da soja.

PH_{cinza} - Pegada hídrica cinza da soja.

PH_{soja} - Pegada hídrica da cultura da soja

PH_{verde} - Pegada hídrica verde da cultura da soja

PMP - Ponto de murcha permanente.

RCP - Trajetórias de Representatividade de Concentração.

REW - água prontamente evaporável.

Pref - precipitação efetiva.

Prvt - Produtividade da cultura da soja.

Q_e - vazão do emissor.

TAQ - Taxa de aplicação por hectare dos agroquímicos no campo

TB - temperatura máxima basal.

T_i - Tempo de irrigação.

TN - temperatura mínima basal.

Tr - Transpiração diária.

UFT - Universidade Federal do Tocantins

UFV – Universidade Federal de Viçosa.

VBP - Valor Bruto da Produção.

WP - Produtividade da água normalizada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Origem e importância econômica da soja	22
2.2. Fisiologia da soja	23
2.3. Fenologia da soja	24
2.4. A pegada hídrica (PH).....	26
2.5. A pegada hídrica na agricultura	28
2.6. Mudanças climáticas	30
2.7. Modelos agrometeorológicos	32
2.7.1. Modelo AquaCrop	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. Características da região de estudo	35
3.2. O cálculo da pegada hídrica da cultura da soja	39
3.2.1. A pegada hídrica verde.....	40
3.2.2. A pegada hídrica azul	41
3.2.3. A pegada hídrica cinza	42
3.3. A evapotranspiração e a produtividade da cultura da soja	43
3.4. O modelo AquaCrop	44
3.4.1. Componente clima	46
3.4.2. Componente solo	47
3.4.3. Componente cultura.....	47
3.4.4. Componente manejo	48
3.5. Dados de entrada para calibração e validação do AquaCrop	48
3.5.1. Parâmetros de clima.....	49
3.5.2. Parâmetros de solo	51
3.5.3. Parâmetros de cultura.....	52
3.5.4. Parâmetros de manejo.....	55
3.6. Calibração e validação do modelo AquaCrop	57
3.7. Projeções climáticas para o Matopiba	60
3.8. Projeções de produtividade para o Matopiba	62
3.9. Pegada hídrica atual e futura para o Matopiba	63
3.10. Limitações e vantagens metodológicas	63

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1. Calibração do modelo AquaCrop	65
4.2. Validação do modelo AquaCrop	68
4.3. Projeções climáticas.....	70
4.4. Produtividade da cultura de soja atual e projeções.....	83
4.5. Pegada hídrica da cultura de soja atual e projeções	87
5. CONCLUSÕES	101
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	102

1. INTRODUÇÃO

O avanço na produção da soja (*Glycine max*) na composição do Valor Bruto da rodução (VBP) da agropecuária e os segmentos ligados ao campo, que se beneficiam desse ciclo de expansão dessa cultura, têm impulsionado o agronegócio e a economia do Brasil. Segundo a Secretaria de Política Agrícola (SPA) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), no ano de 2015 a soja contribui com 37,5% do VBP das lavouras brasileiras, com um valor da produção estimado em R\$ 122,2 bilhões e que representa 31,69% do total exportado pelo País (BRASIL, 2015; AGROSTAT, 2016).

No *ranking* dos países produtores de soja, o Brasil ocupa a segunda posição, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Nos últimos 10 anos a produção brasileira de soja cresceu 72,8% (CONAB, 2015a), e o Brasil ganhou mais espaço no mercado internacional, como mostra a produção da safra 2014/15 onde foram produzidos 95,070 milhões de toneladas em 31,573 milhões de hectares brasileiros contra 108,014 milhões de toneladas em 33,614 milhões de hectares americanos. Os cenários da produção de soja são otimistas e espera-se que na safra de 2024/2025 o Brasil produza em torno de 126,2 milhões de toneladas, o que representa um acréscimo de 33,9% em comparação com a safra de 2014/2015, abaixo do crescimento ocorrido na última década, mas que mesmo assim coloca o Brasil na liderança mundial da produção de grãos de soja (EMBRAPA, 2016; BRASIL, 2015).

O Brasil mostra-se competitivo perante seus principais concorrentes, como os Estados Unidos, Argentina e Paraguai. Essa competitividade é atribuída à evolução da produção de soja em direção as novas áreas no Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Essa nova fronteira agrícola, situada no Centro-Nordeste do país, denominada Matopiba, vem se destacando com um acentuado potencial de produção de grãos. Apesar de suas deficiências de infraestrutura, os preços de terras ainda atrativos, o clima a disponibilidade de recursos hídricos, condições edafoclimáticas e a possibilidade de implantação de grandes áreas e relevo favorável, têm motivado muitos investimentos nessa região (BRASIL, 2015).

A produção de grãos no Matopiba representa 12,8% do que é produzido no Brasil, tendo a soja como principal grão e também o de maior rentabilidade, onde boa parte do que é produzido se destina à exportação. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), na safra de 2014/2015, a soja aumentou significativamente sua produção nos quatro estados que compõem o Matopiba, apresentando crescimento na Bahia de 26,4% (produção total de 4,180 milhões de toneladas), no Piauí de 23,1% (1,822 milhões de toneladas), no Maranhão de 13,5% (2,067 milhões de toneladas) e no Tocantins de 20,2% (2,475 milhões de

toneladas) (BRASIL, 2016). Entretanto, na Safra 2015/2016 a região do Matopiba enfrentou estiagem severa, que provocou quebra de safra e perdas de até 70% na produção de soja, interrompendo o processo de aumento constante da produção.

O sucesso ou quebra da produção agrícola, nas várias regiões produtoras de soja do Brasil, esta diretamente relacionada ao déficit ou excesso hídrico, como também ao aumento da temperatura (FARIAS et al., 2001; SOUZA et al., 2016). Segundo Rosenzweig e Hillel, (1998), a mudança climática, projetadas pelos modelos climáticos para o século XXI, podem afetar significativamente os rendimentos agrícolas e conseqüentemente a segurança alimentar mundial. Também sob condições mudanças climáticas, a pressão sobre os recursos hídricos deverá aumentar, pois visando suprir a redução da precipitação e manter a produção de alimentos à agricultura deverá aumentar a demanda por água (KONAR et al., 2011).

Assim, é crucial desenvolver avaliações quantitativas e melhorar a eficiência de utilização do uso da água na agricultura para reduzir os efeitos adversos da redução da disponibilidade de, principalmente no que refere as mudanças climáticas. O que tem levado a comunidade científica buscar reformulações das atuais práticas agrícolas e ambientais, aliando estratégias que conduzam ao uso sustentável dos recursos hídricos pela agricultura. Uma dessas reformulações é a inclusão do conceito de água virtual nas pesquisas que abrangem agricultura e água. O termo água virtual, refere-se à água que está incorporada na produção e comércio de *commodities* agrícolas, e sobre o comércio virtual de água entre as nações, como um meio para quantificar os recursos hídricos de uma nação (HOEKSTRA e HUNG, 2005, BACCHIOLLA et al., 2013). Um conceito chave da quantificação de água virtual é o paradigma para a avaliação do uso da água na produção de bens e especialmente comida, denominado por Pegada Hídrica (PH) (HOEKSTRA, 2003).

A PH fornece cálculos cumulativos da pressão que as atividades humanas, ao longo de todo um processo (produto/serviço), exercem sobre os recursos hídricos. Para isso considerados os usos diretos e os usos indiretos durante toda a cadeia produtiva. Em uma escala global, a maior parte do uso da água ocorre na produção agrícola (WWAP, 2009). A PH da cultura é obtida pela razão entre a água consumida por unidade de área durante o período de crescimento e seu rendimento (HOEKSTRA e MEKONNEN, 2012). A quantificação da PH da cultura é benéfica para a avaliação do uso da água, o que melhoraria a eficiência do uso da água na agricultura, como também para a diminuição do volume do consumo de água pela agricultura (HOEKSTRA e HUNG, 2002; HOEKSTRA, 2003). A água consumida pela cultura pode ser obtida por medida de campo e estimada através de um conjunto de fórmulas empíricas ou através de um modelo de cultura adequado para a

estimativa da evapotranspiração. No entanto, a medida em campo da evapotranspiração é trabalhosa, sendo geralmente a evapotranspiração estimada indiretamente por meio de modelos baseados em dados climáticos, das propriedades do solo e das características da cultura. O modelo AQUACROP é um desses modelos, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO, a partir do trabalho de Doorenbos e Kassam (1979) especialmente para estimar o crescimento da cultura e a ET sob condições de déficit hídrico (FAO, 2010).

A intensificação do crescimento da produção de soja observada nas últimas décadas na região do Matopiba, provavelmente, implicará em aumento da pressão sobre os recursos hídricos da região a longo prazo, principalmente sob cenários de mudanças climáticas, o que comprometerá a sustentabilidade desses recursos. No contexto da importância econômica da soja para a região do Matopiba, da sua demanda hídrica e a influência dos intemperes sobre o seu rendimento, é imperativo que se realize pesquisas que abordem o uso direto e indireto da água, contabilizando, a pressão atual das atuais práticas agrícolas sobre os recursos hídricos da região e mediante as mudanças climáticas. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é de calcular a produtividade e a pegada hídrica da cultivar de soja TMG 1288 RR para o cenário atual e de mudanças climáticas na região do Matopiba, enquanto os objetivos específicos são:

(i) calibrar e validar o modelo AquaCrop para simular a produtividade da cultivar de soja TMG 1288RR adaptadas às condições de solo e clima da região do Matopiba;

(ii) estimar a produtividade dessa cultivar de soja para as condições climáticas atuais e de mudanças climáticas propostos pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climática de acordo com o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC – AR5;

(iii) calcular a pegada hídrica das cultivar de soja para as condições climáticas estabelecidas no item ii para a região da Matopiba;

(iv) identificar os impactos que as mudanças climáticas podem ocasionar sobre a produtividade e a pegada hídrica da soja na região do Matopiba.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Origem e importância econômica da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é a oleaginosa mais produzida e consumida no mundo. Por ser rica em proteína e óleo, é utilizada tanto para o consumo animal, através do farelo da soja, quanto para o humano, através do óleo (DOORENBOS et al., 1979; FAO, 2016). A produção de soja em grandes quantidades ficou restrita à China e Japão até o final do século XIX, quando iniciou sua expansão para outras regiões do mundo. Essa cultura foi introduzida inicialmente na Europa em 1739 e nos Estados Unidos em 1765, como forragem e posteriormente em estudos científicos. Apenas no início do século XX, a soja passou a ser cultivada comercialmente nos Estados Unidos; a partir de então, houve uma rápida expansão na produção, com o desenvolvimento das primeiras variedades comerciais de soja adaptadas (FEDERIZZI, 2005; DALL'AGNOL et al., 2007).

A soja chegou ao Brasil em 1882, sendo introduzida primeiramente na Bahia, em 1891 em São Paulo e em 1914 no Rio Grande do Sul. Somente no final da década de 60 foram implantadas as primeiras grandes lavouras comerciais, que se estabeleceram na região Sul do país e surgiram como uma opção de cultura de verão em sucessão ao trigo (MUNDSTOCK & THOMAS, 2005). Na década de 70 a produção da soja despertou um maior interesse dos agricultores e do governo brasileiro, consequência da explosão dos preços no mercado mundial e das vantagens competitivas que o Brasil apresentava em comparação com os demais países produtores. Esses fatores favoráveis contribuíram para início dos investimentos na produção de soja, através da aplicação de técnicas de melhoramento genético e manejo, permitindo o avanço das áreas cultivadas de soja em direção as regiões Sudeste e Centro-Oeste do País (EMBRAPA, 2009). A implantação desses programas de melhoramento genético no Brasil, com o desenvolvimento de genótipos adaptados às condições de baixa latitude, permitiu que nas décadas seguintes o cultivo de soja crescesse rumo ao Centro-Oeste, Nordeste e Norte do País, levando o progresso e o desenvolvimento para estas regiões (FREITAS, 2011), e onde hoje se estabelece a região do Matopiba.

Atualmente, os três maiores produtores mundiais de soja, são: Estados Unidos, Brasil e Argentina. Dentre esses países, o Brasil é o único que apresenta potencial de multiplicar a produção atual, tanto pelo aumento da produtividade, quanto pelo potencial de expansão da área cultivada. As perspectivas são otimistas, espera-se que até 2020 o Brasil assumira a liderança mundial na produção do grão, ultrapassando a barreira dos 100 milhões de

toneladas. E esse aumento se deve a expansão da produção da soja nas regiões mais promissoras, que são o Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul e Matopiba. No caso do Matopiba, as previsões são ainda mais otimistas com um potencial de crescimento da área plantada de 10 milhões de hectares nos próximos anos (VENCATO et al., 2010; EMBRAPA, 2015).

Segundo a CONAB (2015b) na safra 2013/2014, o Matopiba produziu 8,7 milhões de toneladas de soja, o que representou um incremento de 21,7%, em comparação com a safra anterior, e chegou a 10,5 milhões de toneladas, o que representa 11% da produção brasileira. Dentre os estados que fazem parte dessa região, a Bahia é a que mais se destaca com produtividade de 2.940 kg/ha e 4,2 milhões de toneladas colhidas, seguido pelo Tocantins, com produtividade de 2.914 kg/ha e produção de 2,5 milhões de toneladas.

2.2. Fisiologia da soja

O conhecimento dos aspectos ligados à fisiologia da produção da cultura de soja torna-se importante para os pesquisadores que buscam de alguma forma modelar, simular ou prever resultados. As plantas de soja apresentam aspectos muito interessantes como a fotorrespiração, que deve ser levadas em consideração para realizar previsões corretas no que diz respeito a modelagem. O conhecimento das sucessivas etapas do desenvolvimento da cultura de soja (fenologia), a funcionalidade da espécie (fisiologia) e as interações com o ambiente em que se encontra, faz-se necessário para o planejamento e obtenção de elevadas produtividades (MARTIN, 2007).

A soja é um vegetal herbáceo pertencente à família das Leguminosas. Apresenta caule hispido, pouco ramificado e raízes do tipo pivotante (um eixo vertical principal), de onde partem as raízes secundárias que se ramificam, formando um sistema radicular axial. O caule é do tipo herbáceo, ereto, revestido de pêlo podendo a altura variar em média de 0,5 a 1,5 m. As folhas são de três tipos: cotiledonares (que são as primeiras a emergir por ocasião da germinação); simples (duas folhas de lâminas simples e opostas surgem após as cotiledonares) e, as trifolioladas (são as que apresentam duas estípulas em sua base e estípelas na base dos folíolos). As folhas são do tipo alternadas, com pecíolos grandes, medindo de 7 a 15 cm de comprimento, têm flores de fecundação autógama, de cor branca, roxa ou intermediária. Essa cultura desenvolve vagens (legumes) levemente arqueadas que, à medida que amadurecem, mudam da cor verde para marrom-claro, podendo conter de uma a cinco sementes lisas, elípticas ou globosas, de cor amarelo pálido, com hilo preto, marrom, ou amarelo-palha. Elas

apresentam crescimento indeterminado, sem racemo terminal; determinado, com racemo terminal; ou semideterminado, com racemo intermediário (SEDIYAMA et al., 1999).

2.3. Fenologia da soja

O conhecimento da fenologia da cultura da soja permite a identificação dos seus distintos estádios de desenvolvimento, relacionando-os com suas necessidades específicas no decorrer do ciclo é de fundamental importância para a obtenção de elevados rendimentos de grãos. Essa informação permite que se estabeleça uma relação entre os elementos fisiológicos, climáticos, edáficos etc., o que pode melhorar o desempenho da cultura e conseqüentemente a sua produtividade (CÂMARA, 1998).

Os estádios de desenvolvimento da cultura da soja propostos por Fehr e Caviness (1977), o mais utilizado no mundo, baseia-se na observação do desenvolvimento da haste principal (caule) da soja. Nesse caso, a fenologia da soja é dividida em dois períodos: o vegetativo, representado pela letra V, subdividido em emergência (VE) e cotilédone (VC), e o reprodutivo, representado pela letra R. Cada letra é seguida pelo índice numérico que identifica o estágio específico (FARIAS et al., 2007).

No período vegetativo verifica-se, durante a germinação, o desenvolvimento do sistema radicular, e logo após a emergência da plântula, o desenrolamento das folhas primárias e o desenvolvimento do meristema apical que dará origem a parte aérea. No início do processo de germinação, que ocorre de 7 a 10 dias após a sementeira, dependendo do vigor da semente, profundidade de sementeira, umidade, textura e temperatura do solo, a semente de soja necessita absorver água no volume correspondente a 50% de seu peso. No período vegetativo se dá a emissão de folhas ao longo do caule, possuindo nós, cada qual com folhas trifolioladas, onde o número potencial de locais (nós do caule e dos ramos) com gemas onde poderá haver florescimento. A planta de soja entra na fase reprodutiva devido ao fotoperíodo e a temperatura do ar. O período reprodutivo compreende o florescimento, desenvolvimento dos legumes, enchimento de grãos e maturação (MUNDSTOCK e THOMAS, 2005).

Dentre os principais fatores intrínsecos à produção agrícola, o clima é o mais difícil de controle e também o mais limitante as máximas produtividades (FARIAS et al., 2007). Os principais fatores de risco e de insucesso na produção de soja são decorrentes das adversidades climáticas, e dentre os elementos do clima, os que apresentam maior influência sobre o comportamento e desenvolvimento desta cultura, são: a temperatura, o fotoperíodo e a disponibilidade hídrica (STEDUTO et al., 2012).

Segundo Farias et al. (2007), a soja se adapta melhor nas regiões que apresentam temperaturas do ar entre 20°C e 30°C; sendo 25°C o valor ideal para uma emergência rápida e uniforme. As regiões com temperaturas menores ou iguais a 10 °C são impróprias para o cultivo da soja, pois interfere negativamente no crescimento e desenvolvimento. A soja floresce somente quando é induzida a temperaturas acima de 13°C. Já quando a soja é submetida a temperaturas acima de 40°C, verifica-se efeito adverso na sua taxa de crescimento, provocando distúrbios na floração o que pode acarretar diminuição na altura da planta e diminuição da capacidade de retenção das vagens. As altas temperaturas também podem acarretar em maturação acelerada da soja, e se associadas a alta umidade podem interferir na qualidade dos grãos. Vale ressaltar que todos esses problemas podem ser agravados se, ao mesmo tempo, ocorrer déficits hídricos.

A sensibilidade da soja ao fotoperíodo ainda é uma limitação para a adaptação mais ampla da soja. Essa sensibilidade é característica variável entre as cultivares, possuindo cada cultivar seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado, pois a floração depende do comprimento do dia. A faixa de adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção norte ao sul. Por isso a soja é considerada planta de dia curto (FARIAS et al., 2007). Já a variação interanual de produtividade da soja é uma função mais hídrica do que térmica.

O déficit hídrico é o principal responsável pela quebra de produção de soja como observaram Buainain e Vieira (2011), ao investigarem os principais riscos da agricultura brasileira em relação à ocorrência de sinistros no seguro rural. Isso está associado ao fato que na germinação-emergência tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar boa germinação, e o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total máximo de água disponível e nem ser inferior a 50%. Essa necessidade de água, por parte da soja, vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), quando também normalmente é atingida a cobertura máxima do dossel, decrescendo após esse período. O déficit hídrico quando combinado com temperaturas próximas a 40°C, antecipa a floração e, conseqüentemente, reduz o ciclo vegetativo, comprometendo a produtividade (FARIAS et al., 2001; EMBRAPA, 2006; 2008).

O conhecimento sobre a quantidade água consumida pela soja entre cada um dos seus estádios de crescimento, permite entender quais são os efeitos da deficiência hídrica sobre as culturas para que se possam minimizar os danos ocasionados pela falta de água. Os efeitos da

deficiência hídrica sobre a produtividade de uma cultura vão depender da sua intensidade, duração, época e ocorrência e da interação com outros fatores determinantes da expressão da produtividade final (CUNHA & BERGAMASCHI, 1992).

2.4. A pegada hídrica (PH)

A maior parte da água “azul” retirada e consumida (retirada, menos o fluxo de retorno para o sistema de rios) pela humanidade, provinda de rios, lagos e aquíferos, é usada para irrigação. Entretanto, é um equívoco considerar o alto consumo de água pela agricultura somente pelas retiradas de água azul (ROST et al., 2008). Na verdade, 60-70% dos alimentos do mundo são produzidos em terras chuvosas, isto é, pelo consumo de água de precipitação infiltrada no solo (a chamada "água verde") (FALKENMARK e ROCKSTROM, 2004). Em algumas regiões, a produção de alimentos depende quase que exclusivamente da água verde, a chamada agricultura de sequeiro. Vale ressaltar que em terras irrigadas, a água verde é tão importante quanto a água azul, pois a água azul é fornecida a essas terras apenas quando quantidade que a água de precipitação não é suficiente para garantir um crescimento ótimo das culturas. Assim, conforme sugeriram Rost et al. (2008), o consumo global de água na agricultura deve ser muito maior do que é descrito na literatura, que se refere apenas a água azul. Mesmo os cálculos existentes, que contabilizam o comércio virtual de água (isto é, a água negociada implicitamente com produtos agrícolas), foram baseados, principalmente, apenas no consumo de água azul, e deve-se reconhecer também o consumo de água verde em avaliações dos recursos hídrico global e escassez de água. Da mesma forma, empregar novos indicadores sob escassez de água e estresse, que contabilizam recursos de água verde e azul, é necessário e um desses indicadores é a Pegada Hídrica (PH).

Hoekstra e Hung (2002) apresentaram a teoria da pegada de água (PH) que foi posteriormente elaborado por Hoekstra e Chapagain (2008) para avaliar a utilização da água na agricultura durante o processo de produção. De acordo com o guia padrão de aplicação da pegada hídrica, denominado de “*The Water Footprint Assessment Manual*” (HOEKSTRA et al., 2011), a PH é uma metodologia que envolve um conjunto de atividades com o objetivo de quantificar o quanto de água foi utilizada na fabricação de bens, serviços ou produtos de consumo, ao longo de toda a cadeia produtiva. A maior parte da água utilizada pelos seres humanos vem dos produtos que elas utilizam e não do consumo cotidiano como a maioria da população pensa (MARACAJÁ et al., 2012). A aplicação da PH permite: i) quantificar no tempo e no espaço a pegada hídrica de uma área geograficamente delimitada; ii) analisar a

sustentabilidade ambiental, social e econômica do valor resultante da PH; e iii) formular uma resposta estratégica dos recursos hídricos (MULLER, 2012). Ainda, através desse indicador, é possível obter uma base quantificável, racional e essencial para as tomadas de decisões sobre os limites do consumo dos recursos naturais e a sustentabilidade, fornecendo aos gestores, instrumentos que permitam entender os limites dos ecossistemas para o desenvolvimento de políticas ambientais (GALLI, 2011).

A pegada hídrica é dividida em três componentes, verde, azul e cinza, onde: i) a pegada hídrica verde (PH_{verde}) refere-se ao consumo de água verde (água de chuva, que não escoou), que é evaporada para formar o produto; ii) a pegada hídrica azul (PH_{azul}) refere-se ao consumo de água azul (superficial e subterrânea), água proveniente de irrigação ou armazenada no solo que é evaporada para formar o produto ao longo de sua cadeia produtiva; e iii) a pegada hídrica cinza (PH_{cinza}) que se refere à poluição e é definida como o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes de fontes agrícolas (fertilizantes, pesticidas etc.) para as concentrações naturais e de padrões de qualidade da água existentes. Chapagain e Orr (2009) classificaram água verde e azul como água evaporada e a cinza como não evaporativa. A distinção entre a PH_{verde} e a PH_{azul} é extremamente importante, porque as implicações hidrológicas, ambientais e sociais, bem como os custos econômicos do uso das águas superficiais e subterrâneas para a produção, diferem das implicações e custos de utilização das águas pluviais, o que permite uma análise mais profunda a cerca dos impactos das atividades humanas sobre os recursos hídricos da água consumida ou poluída (HOESKTRA e CHAPAGAIN, 2008).

A PH_{verde} é a fração de água que é usada pelo ser humano, proveniente da precipitação, evaporação potencial e dos resquícios da cultura. A precipitação que chega à superfície terrestre é dividida, tendo parte armazenada no solo, outra permanece temporariamente à superfície ou na vegetação e outra parte passa pelo processo de evaporação ou é utilizada pelas plantas. Esse consumo de água verde pela agricultura pode ser medido ou estimado utilizando um conjunto de fórmulas empíricas ou com um modelo apropriado para estimar a evapotranspiração com base em dados de entrada das características do solo, clima e cultura. A componente verde da pegada hídrica é o volume de água da chuva consumida durante o processo de produção (HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2011; SEIXAS, 2011).

A PH_{azul} é a parcela de água superficial ou subterrânea que é consumida em um determinado local e período de tempo, e que não retorna ao local onde foi retirada (água evaporada ou incorporada no produto), fornecendo informação sobre a quantidade de água azul disponível consumida por seres humanos. A parte restante, que não é consumida pelos

seres humanos, destina-se à manutenção dos ecossistemas que dependem dos fluxos de água subterrânea e superficial. Esse consumo pode ocorrer quando a água evapora, retorna a outra bacia ou ao mar ou é incorporada em um produto (HOEKSTRA et al., 2011). A PH_{azul} é um indicador de uso consumido de água doce superficial ou subterrânea e depende diretamente das variáveis hidrológicas que regulam o ciclo hidrológico (precipitação, escoamento superficial, infiltração, evaporação). O uso consuntivo dessa água refere-se a: i) água evaporada; ii) água incorporada no produto; iii) água que não volta à mesma bacia hidrográfica (volta para outra bacia ou para o mar); e iv) água que retorna num período temporal diferente (deixa a bacia numa época de escassez e retorna num período de elevada precipitação). A evaporação é considerada em alguns casos o único uso consuntivo (SEIXAS, 2011).

A PH_{cinza} expressar as cargas poluentes na forma de volume, indicando a quantidade de água necessária para diluí-las. No cálculo dessa pegada é considerada a carga de poluente medida no tempo, a concentração permitida pela legislação e a concentração natural do curso d'água, que seria encontrada caso não houvesse ocupação humana (HOEKSTRA et al., 2011). Empinotti et al. (2013) destacam que valores altos da PH_{cinza} não significam, necessariamente, que os padrões estabelecidos pela legislação foram ultrapassados, mas que parte da capacidade de assimilação já foi consumida. A assimilação da carga de poluentes que chega até o corpo receptor é feita pela água azul, disponível nos rios, portanto há uma relação direta entre a quantidade de água poluída e a quantidade necessária para diluir essa poluição, possibilitando uma análise da sustentabilidade dessa pegada hídrica.

2.5. A pegada hídrica na agricultura

A pegada hídrica de uma cultura é a contabilização do volume de água necessário para sua produção, relacionando as necessidades hídricas da cultura e a produção. A PH_{total} do processo de crescimento da cultura é a soma da PH_{verde} , PH_{azul} e PH_{cinza} . A determinação das pegadas hídricas azul e verde é geralmente realizada usando estimativas da evapotranspiração (ET), obtidas com uma abordagem que recorre ao uso de coeficientes culturais e da evapotranspiração de referência (HOEKSTRA et al., 2011; MEKONNEN e HOEKSTRA, 2011; NOGUEIRA et al., 2012). Quando estão disponíveis as medições de ET, a precisão da estimativa da PH pode ser melhorada. Segundo Mekonnen & Hoekstra (2011), em estudo da Pegada Hídrica das Nações, verificaram que a pegada hídrica mundial relacionada com a produção agrícola e industrial e de abastecimento de água doméstica para o período 1996-

2005 foi de 9087 Gm³/ano (74% verde, azul 11%, 15% de cinza). O maior consumo global da água azul provém do setor agrícola, que é correspondente a 70% do consumo de água total do planeta (HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2007), segundo Maracajá (2012) isso se deve principalmente a agricultura irrigada. Vários estudos foram conduzidos sobre a avaliação da PH, tanto a nível mundial como nacional (LONG et al., 2005; HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2007; CHAPAGAIN e ORR, 2009; BULSINK et al., 2009; LIU e YANG, 2010; MEKONNNEM e HOEKSTRA, 2011; LAMASTRA et al., 2014). Esse conceito tem sido aplicado a muitas culturas, como: do arroz (HOEKSTRA e CHAPAGAIN, 2011; BOCCHIOLA, 2015; SHRESTHA et al., 2017), da cana-de-açúcar (ALBUQUERQUE, 2013; SILVA et al., 2015), do milho (SUN et al., 2012; BOCCHIOLA et al., 2013), soja (WILLAARTS et al, 2011; ARENA et al., 2011; BOLDRIN e BOLDRIN, 2012; ERCIN et al., 2012; KOTSUKA, 2013; LATHUILLIERE et al., 2014; BLENINGER e KOTSUKA, 2016; AYALA et al., 2016; COSTA et al., 2016).

Nas localidades com clima seco e nos países desenvolvidos, a demanda de água é muito maior do que os países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, devido a maior necessidade de água para a fabricação de produtos mais sofisticados e a grande necessidade de irrigação para a produção agrícola (WWAP, 2009). Segundo a ANA (2011), os totais de água retirados no Brasil são de aproximadamente 58,1 km³/ano, sendo que, deste total, 31,1 km³/ano (53,5%) são efetivamente consumidos nas bacias hidrográficas, ou seja, não ficam mais disponíveis e são provenientes principalmente da evapotranspiração da agricultura. Na agricultura irrigada, ao contrário do cultivo em regime de sequeiro, que utiliza apenas a água da chuva, a fonte de água são os rios, lagos e aquíferos, de onde ela é extraída e aplicada sobre a terra, permitindo que o cultivo cresça em ambientes com recursos hídricos escassos.

Segundo Christofidis (2013), existem no Brasil cerca de 110 milhões de hectares de solos aptos para expansão e desenvolvimento da agricultura, com aproximadamente 72% localizados no bioma de Cerrado. Quanto aos solos aptos à prática da agricultura irrigada, o potencial brasileiro de expansão total dessa prática está estimado em 29.564.000 hectares, sendo 66 % nas regiões Norte e Centro-Oeste. Landau et al. (2013), ao avaliarem as áreas de concentração de pivôs centrais no Brasil, destacaram que na região do Matopiba a maioria dos estabelecimentos rurais com pivôs centrais em 2006, estavam localizadas em Barreiras e Santa Maria da Vitória, no oeste do Estado da Bahia. Esses mesmos autores ao caracterizarem as áreas com agricultura irrigada no Matopiba (LANDAU et al., 2014), a partir de imagens do satélite Landsat 8 – OLI / TIRS de 2013, identificaram que 90% dos pivôs centrais se concentram no oeste da Bahia e municípios com maior número de pivôs nos outros Estados

são Balsas - MA (36 pivôs, 2.148,08 ha irrigados), Pedro Afonso - TO (31 pivôs, 4.088,87 ha irrigados) e Guadalupe - PI (7 pivôs, 421,26 ha irrigados).

Recentemente, o Ministério da Agricultura assinou um memorando de cooperação para agricultura e alimentação com base em estudos e projetos para viabilizar investimentos japoneses na região do Matopiba, que tem como um dos objetivos a expansão da irrigação (MAPA, 2016). Apesar do benefício potencial da irrigação para o aumento da produção agrícola na região, deve se adotar estratégias que estimulem a melhoria da qualidade da água, conservação de nascentes e Áreas de Preservação Permanente (APP), bem como o uso eficiente dos recursos hídricos contribuirão para a melhoria da qualidade e quantidade de água disponível, sendo fundamentais para a sustentabilidade e expansão potencial da agricultura irrigada na região.

2.6. Mudanças climáticas

As possíveis mudanças climáticas projetadas para o século 21 poderão alterar significativamente a produção agrícola, a biodiversidade, e os recursos hídricos, visto que com o aquecimento a evaporação irá aumentar e a disponibilidade hídrica diminuir com a retirada de água armazenada do solo, gerando um maior déficit hídrico (CAMPOS, 2010). As mudanças climáticas podem alterar significativamente a produção das culturas (ROSENZWEIG e HILLEL, 1998; FAO, 2009), pois deverá vir acompanhada pelo aumento da temperatura do ar, em razão do aumento na concentração de dióxido de carbono (CO₂), influenciando negativamente o desenvolvimento, crescimento e a produtividade dos cultivos agrícolas (FAGUNDES et al., 2010). Visto que o aumento da concentração de CO₂ acompanhado pelo aumento da temperatura do ar anulará o crescimento e produtividade das culturas, em razão do encurtamento do ciclo e do aumento da respiração (SIQUEIRA et al., 2001).

Parry et al. (2004) estimaram que a produção global deverá permanecer estável durante a maior parte do século, mas as diferenças regionais serão mais significativas ao longo desse tempo, e possivelmente só com os países desenvolvidos se beneficiando das mudanças climáticas. Por outro lado, Collicchio (2008), ao avaliar as implicações das mudanças climáticas no estado do Tocantins, prognosticou fortes restrições hídricas para o Tocantins. Já Maciel (2011), ao avaliar os impactos econômico-financeiros das variações climáticas sobre o Estado do Tocantins, constatou que o aumento da oferta hídrica em alguns

casos pode inibir os efeitos provocados por alguns aumentos de temperatura do ar sobre a área cultivada mudando o panorama agrícola do Tocantins.

O estudo sobre as tendências dos principais produtos do agronegócio brasileiro realizado pelo Ministério da Agricultura, Projeções do Agronegócio – Brasil 2014/15 a 2024/25 prevê que a área de soja deve expandir-se muito nos próximos anos na região do Matopiba. As estimativas são de que a produção de grãos nessa região ultrapasse 8,7 milhões de hectares plantados e 22,5 milhões de toneladas produzidas (BRASIL, 2015). Entretanto, as projeções do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas para 2011/2040 não são muito otimistas para a região Centro-Nordeste do país. Os prognósticos sob condições de mudanças climáticas são de variações consideradas naturais do regime climático até aceleradas alterações antrópicas, com aumento na temperatura do ar de 1° a 5,5° C e redução na precipitação de 10% a 20%, para o bioma de Cerrado, que corresponde a mais de 90% da região do Matopiba (PBMC, 2013).

Apesar desses prognósticos econômicos otimistas para a região do Matopiba, de crescimento tanto na área plantada quanto na produção de soja, podem não se consolidar devido às previsões de mudanças climáticas. O tempo e clima desempenham um papel primordial na produtividade máxima deste setor, pois é o fator intrínseco de mais difícil controle e também de maior ação limitante. Segundo Bacchiola et al. (2013) os possíveis efeitos do clima sobre a agricultura incluem: (i) mudanças na temperatura e precipitação; (ii) redução das terras cultiváveis, devido aumento da salinidade do solo; (iii) aumento da taxa fotossintética de 30% para 100% em decorrência da duplicação do CO₂, aumento da temperatura e disponibilidade hídrica. Entretanto, espécie de via metabólica tipo C3, como é o caso da soja, reagem de forma positiva (isto é, com aumento do rendimento) para um alto teor de CO₂.

A soja é uma cultura que exige significantes quantidades de água para produção, isto é, chuva e irrigação. A variabilidade na disponibilidade hídrica durante o período de desenvolvimento da cultura da soja é a principal limitação à expressão do potencial do rendimento, independentemente do ciclo da cultivar, da época de semeadura e do local (CUNHA et al., 1998; FARIAS, 2006; 2011). A fim de manter condições favoráveis ao cultivo de grãos, é provável que ocorra nos próximos anos, diante desses cenários de redução da precipitação, a expansão da área irrigada na região do Matopiba, o que deve acarretar maior pressão das atividades agrícolas sobre os recursos hídricos, gerando um conflito cada vez maior entre o desenvolvimento e a degradação dos recursos naturais. Segundo Fader et al. (2011), a agricultura, principalmente a irrigada, é uma atividade de alto consumo de água. Os

recursos hídricos de regiões agricultáveis, por sua vez, sofrem com o aumento da demanda por água pelo crescimento da população e produção de alimentos (KONAR et al., 2011; STRZEPEK & BOEHLERT, 2010).

Sob condições de mudança climática o uso de água pelas culturas podem transformar a pegada hídrica, exigindo estratégias de adaptação. Assim, ferramentas de modelagem como modelos de cultura são ferramentas de extrema importância, pois imitam a produção das culturas sob condições climáticas específicas e podem ser mais tarde utilizado para avaliar o efeito potencial das variações climáticas (RICHTER et al., 2010; SOUSSANA et al., 2010). Porém antes desses modelos serem utilizados, seus resultados precisam ser avaliados com medições de campo e comparados as variáveis estimadas pelos modelos, principalmente a produtividade das culturas (CONFALONIERI e BECHINI, 2004; CONFALONIERI et al., 2009; DONATELLI et al., 1997; NANA et al., 2014).

2.7. Modelos agrometeorológicos

Os modelos agrometeorológicos são ferramentas usadas para gerar cenários de risco climático, simulações do desenvolvimento e da produção das culturas em relação às variáveis climáticas (atuais e para cenários de mudanças climáticas), através de combinações dos fatores que influenciam a produtividade das culturas. Entretanto, esses modelos são limitados aos locais específicos em que foram desenvolvidos, podendo então não ser adequados para a previsão e avaliação de rendimento em escala regional (JAGTAP e JONES, 2002). Porém, quando esses modelos são calibrados e validados com dados específicos de cada local, podem prever com precisão o rendimento durante as fases de desenvolvimento da cultura, desde o período vegetativo até a sua produção final.

Na modelagem agrometeorológica são aplicados modelos de culturas que podem ser úteis para diferentes finalidades, principalmente para interpretar resultados experimentais. Esses modelos simulam o crescimento das culturas em diferentes condições ambientais e de manejo, tendo em vista vários fatores limitantes. Além disso, os modelos agrometeorológicos são ferramentas que pode ser usadas para avaliar a variabilidade temporal e espacial do comportamento das culturas em grandes áreas, o que acarreta na redução das necessidades de realização de longos e caros experimentos de campo (RESOP et al., 2012).

A melhoria da produtividade da água requer o desenvolvimento de competências e habilidades das organizações que estão envolvidas na gestão da água no setor agrícola. A utilização de um modelo de simulação de culturas permite o armazenamento, consistência e

tratamento de dados, bem como, a partir de modelos bem calibrados, simulações dos padrões de respostas evidenciados em experimento de campo. Um modelo desenvolvido recentemente pela FAO em modelagem de produtividade da água de cultivo é o AquaCrop (STEDUTO et al., 2012), que é um modelo simples e de fácil interpretação, porém muito robusto. Os modelos de simulação de culturas de produtividade da água no cultivo são ferramentas muito úteis, pois eles podem ajudar na melhoria da produtividade da água, através de uma visão dos processos de balanço hídrico do solo e estresse hídrico das plantas, além de ajudar na interpretação dos resultados experimentais.

2.7.1. Modelo AquaCrop

A busca de uma opção mais prática para avaliar o rendimento das culturas em resposta à disponibilidade hídrica, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) fez uso das funções empíricas para estimativa da produção final de uma cultura. Assim, surgiu o modelo AquaCrop (RAES et al., 2009; STEDUTO et al., 2009), desenvolvido a partir do trabalho de Doorenbos e Kassam (1979) pela FAO, com vista à predição da produtividade, necessidade de água e a produtividade de água pelas culturas, sob condições limitantes de déficit hídrico e irrigação. A vantagem do AquaCrop em relação aos outros modelos é que ele requer um mínimo de dados de entrada, dados esses que são disponíveis facilmente ou podem ser obtidos sem grande complexidade. O AquaCrop tem valores padrão para vários parâmetros da cultura que ele usa na simulação, no entanto, alguns desses parâmetros não são universais e, portanto, devem ser ajustados para as condições locais, cultivares e práticas de manejo da cultura. Esse modelo tem sido bastante utilizado em todo mundo porque requer um pequeno número de variáveis de entrada, quando comparado com outros modelos, como o DSSAT, CropSyst, CropGrow, dentre outros. A descrição mais detalhada do modelo AquaCrop pode ser encontrada em Hsiao et al. (2009), Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009).

A capacidade de AquaCrop para simular a produtividade de diferentes culturas foi amplamente testada por diversos pesquisadores ao redor do mundo, em diversos tipos de ambientes e todos eles relataram resultados positivos, como por exemplo: trigo (*Triticum aestivum* L.) na Sibéria (STRICEVIC et al., 2011), no Canadá (MKHABELA e BULLOCK, 2012), na China (XIANGXIANG et al., 2013); algodão (*Gossypium hirsutum* L.), nos USA (Baumhardt et al., 2009) e na Macedônia (Linker et al., 2016); cevada (*Hodeum vulgare* L.) na Etiópia (ARAYA et al., 2010); óleo de canola (*Brassica napus* L.) na Austrália (ZELEKE et al., 2011); milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e ervilha (*Pisum sativum* L.) em

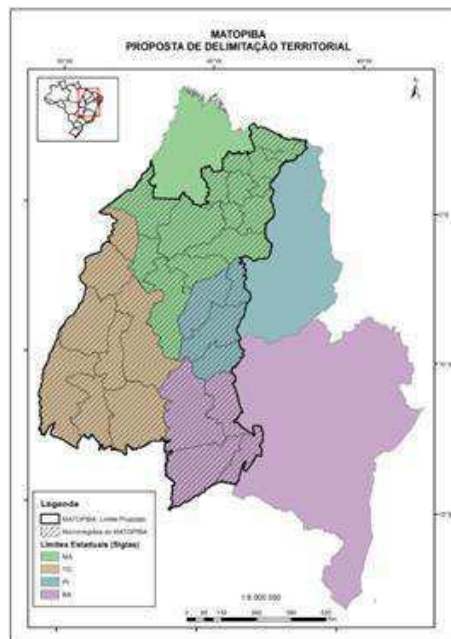
Portugal (PAREDES et al., 2014); milho no Brasil (ANJOS, 2011); milho e soja na Tailândia (LIEVENS, 2014), milho na Uganda (Kikoy e Norbert, 2016); cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*) no Brasil (ALENCAR, 2014); soja no Líbano (ABI SAAB et al., 2014), na China (PAREDES et al., 2015), e na região do Matopiba, Brasil (Silva et al., 2018). Por outro lado, muitas pesquisas têm sido realizadas visando a determinação do consumo hídrico, produção de biomassa, produtividade e eficiência de uso de água de diferentes culturas no Brasil (BORGES et al., 2008; SOUZA et al., 2008; SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características da região de estudo

A região denominada de Matopiba resulta das siglas dos quatro estados que a compõem: Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. A área de domínio do Matopiba corresponde a todo estado do Tocantins, sul e nordeste do Maranhão, sul do Piauí e oeste da Bahia (Figura 1). O Maranhão ocupa 33% de todo o território do Matopiba, com 23,9 milhões de hectares em 135 municípios; o Tocantins com 38% da área, com 27,7 milhões de hectares e 139 municípios; o Piauí representa 11,21%, tem 8,2 milhões de hectares e 33 municípios e a Bahia ocupam 18% da área, que corresponde a 13,2 milhões de hectares e 30 municípios. Contabilizando, ainda, 31 microrregiões geográficas, 337 municípios e aproximadamente de 73 milhões de hectares. Esses municípios englobam 324.326 estabelecimentos agrícolas que ocupam uma área de 33.929.100 ha, além de 46 unidades de conservação (8.334.679 ha), 35 terras indígenas (4.157.189 ha) e 781 assentamentos de reforma agrária e áreas quilombolas (3.033.085 ha) (MIRANDA et al., 2014a; FONSECA e MIRANDA, 2014).

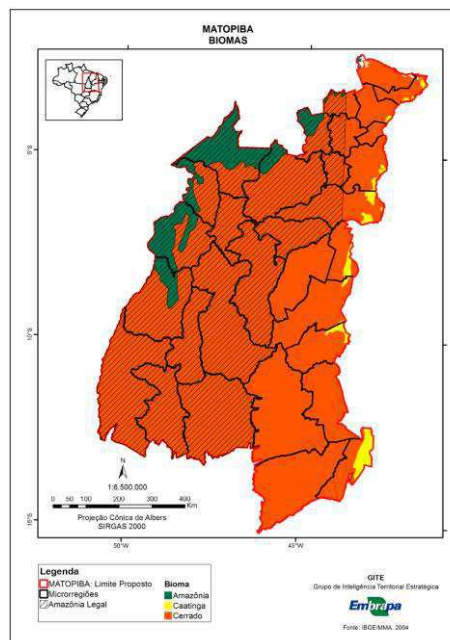
Figura 1. Delimitação territorial da região do Matopiba e as 31 microrregiões geográficas do IBGE que a compõem.



Fonte: Miranda et al. (2014a).

Verificam-se três biomas predominantes na região do Matopiba: Cerrado, Amazônia e Caatinga (Figura 2). O Cerrado representa 91% de toda a área, seguida pela Amazônia com 7,3% e a Caatinga com 1,7%. Quanto às bacias hidrográficas, estão localizadas nessa região três importantes bacias: a do Tocantins-Araguaia (ocupando 43% da área do Matopiba), a bacia do Atlântico – Trecho Norte/Nordeste (com 40%) e a bacia do São Francisco (com 17%). Por essas bacias correm os principais rios da região: Tocantins, Araguaia, São Francisco, Parnaíba, Itapicuru, Mearim, Gurupi e Pindaré (MAGALHÃES e MIRANDA, 2014; MINGONTI et al., 2014).

Figura 2. Mapa do bioma da região do Matopiba.

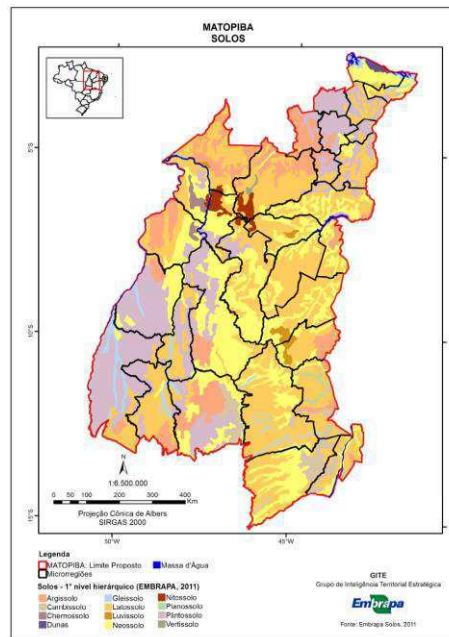


Fonte: Miranda et al. (2014a).

Segundo a análise do 1º nível do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2006, 2011), no Matopiba verifica-se 12 classes de solos. Sendo a classe Latossolo predominante em 38% da região, que tem como característica alta permeabilidade e alta porosidade, baixa fertilidade, porém, com características favoráveis a práticas agrícolas. Seguido por Neossolo com aproximadamente 25% da classe, caracterizados como solos profundos a muito profundos, com alta porosidade e permeabilidade, dificultando a retenção da água ocorrem predominantemente no sudoeste da Bahia e no N/NE do Tocantins, tem características de solos pouco desenvolvidos, com baixa fertilidade natural e com alta porosidade e permeabilidade, dificultando a retenção da água (Embrapa, 2006).. Por outro lado, em terceiro lugar estão os Plintossolos, com cerca de 19,2% da classe, que são solos

ácidos e de baixa fertilidade natural e geralmente são formados em condições de restrição à percolação de água, porém, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade. Ocorrem na porção central do Tocantins e no leste do Maranhão (EMBRAPA, 2006; MAGALHÃES e MIRANDA, 2014).

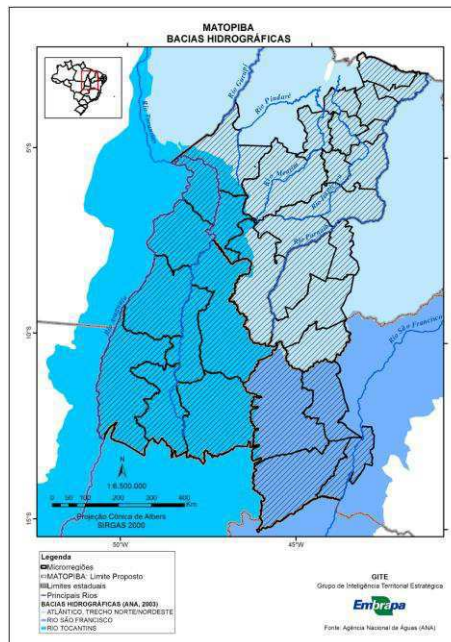
Figura 3. Mapa do solo da região do Matopiba.



Fonte: Miranda et al. (2014a).

No Matopiba verificam-se três bacias hidrográficas: Bacia do Rio Tocantins (ocupando 43% da área do MATOPIBA), Bacia do Atlântico – Trecho Norte/Nordeste (com 40%) e Bacia do Rio São Francisco (com 17%) (Figura 4). Nestas Bacias correm os principais rios da região: Araguaia, Tocantins, São Francisco, Parnaíba, Itapicuru, Mearim, Gurupi e Pindaré.

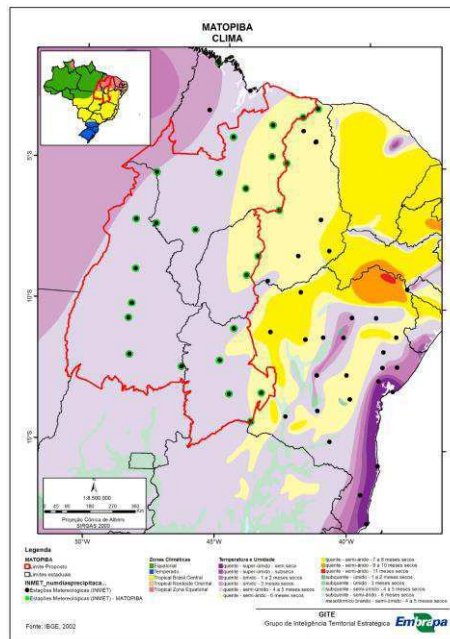
Figura 4. Mapa das bacias hidrográficas e principais rios da região do Matopiba.



Fonte: Miranda et al. (2014a).

Quanto ao clima no Matopiba (Figura 3) caracterizam-se três zonas climáticas: tropical Brasil central (53%), tropical zona equatorial (44%) e equatorial (3%). Na extensão central, o clima tropical semiúmido é dominante e corresponde a aproximadamente 78% da região, tendo como característica períodos de 7 a 8 meses sem chuva e temperatura do ar média acima de 18°C em todos os meses do ano. No limite leste, tem-se clima semiárido, com temperaturas elevadas e período de seis meses sem precipitação. O Tocantins é o estado que apresenta as maiores médias mensais de precipitação do Matopiba, com 135,33 mm mês⁻¹. Quanto à temperatura, as maiores médias compensadas (~27,7°C) são observadas no Piauí, e a maior insolação mensal é observada na Bahia (246,50 horas de luz por mês) (IBGE, 2002; MAGALHÃES e MIRANDA, 2014).

Figura 5. Mapa climático da região do Matopiba e localização das estações meteorológicas do INMET.



Fonte: Miranda et al. (2014a).

3.2. O cálculo da pegada hídrica da cultura da soja

Para a determinação da pegada hídrica da soja (PH_{soja}), foi adotada a mesma metodologia originalmente introduzida por Hoekstra (2003), e que posteriormente foi utilizada por Hoekstra e Chapagain (2008) e Hoekstra et al. (2011) para a contabilização da pegada hídrica de uma cultura e em estudos sobre uso de água de agricultura por Rost et al. (2008) e Fader et al. (2011). A pegada hídrica total (PH_{total}) de uma cultura consiste na soma das suas componentes verde, azul e cinza do processo de crescimento da cultura e é calculada para cada componente dividida pela produtividade da cultura. Assim, a PH_{total} expressa a quantidade de água envolvida dentro da produção da cultura, representando a quantidade de água, em m^3 , necessária para produzir uma tonelada de rendimento colhido e é calculado pela Eq.1:

$$PH_{soja} = PH_{verde} + PH_{azul} + PH_{cinza} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que:

PH_{soja} = Pegada hídrica da cultura da soja ($m^3 t^{-1}$);

PH_{verde} = Pegada hídrica verde da cultura da soja ($m^3 t^{-1}$);

PH_{azul} = Pegada hídrica azul da cultura da soja ($m^3 t^{-1}$);

PH_{cinza} = Pegada hídrica cinza da soja ($m^3 t^{-1}$).

3.2.1. A pegada hídrica verde

A pegada de água verde refere-se ao consumo de água armazenada no chão como resultado da precipitação. A água provinda da precipitação infiltra-se no solo e permanece por períodos curtos, e caso essa água seja usada pela planta é considerado como água verde.

A componente verde da pegada hídrica PH_{verde} foi calculada com na base evapotranspiração diária acumulada durante o ciclo completo da cultura da soja. Dessa forma, a PH_{verde} foi obtida com base na Eq.2, envolvendo a Demanda Hídrica da Cultura verde (DHC_{verde}) e a produtividade da cultura da soja ($Prvt$) da área de estudo.

$$PH_{verde} = \frac{DHC_{verde}}{Prvt} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que:

$PH_{soja,verde}$ = Pegada hídrica verde da cultura da soja ($m^3 t^{-1}$);

DCH_{verde} = Demanda de água verde da cultura da soja ($m^3 ha^{-1}$);

$Prvt$ = Produtividade da soja ($t ha^{-1}$).

A DHC_{verde} da componente da PH_{verde} é relevante apenas para produtos e atividade agrícola e florestal (grãos, madeiras, etc.), correspondendo ao total de água da chuva que sofre o processo de evapotranspiração. Assim, de acordo com a Eq. 3, seu cálculo é realizado apenas através do somatório do volume de água da precipitação, que é evapotranspirada diariamente pela cultura (ET_{verde}), durante todo o período de cultivo, ou seja, desde o primeiro dia de plantio ($d=1$) até o fim da colheita (pd).

$$DHC_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{pd} ET_{verde} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que:

DHC_{verde} = Demanda de água verde da cultura da soja ($m^3 ha^{-1}$);

10 é o fator de conversão, que visa converter a lâmina de água proveniente da chuva em milímetros para litros de água por superfície terrestre, em $m^3 ha^{-1}$;

ET_{verde} = Evapotranspiração diária de água verde ($mm dia^{-1}$).

A evapotranspiração de água verde (ET_{verde}) como o mínimo entre os valores da evapotranspiração total da cultura (ET_c), obtida através do produto entre a evapotranspiração de referência (ET_0) e o coeficiente de cultivo (K_c), e a precipitação efetiva (P_{ef}), como mostra a Eq. 4:

$$ET_{verde} = \min(ET_c; Pref) \quad (\text{Eq. 4})$$

e se:

$$ET_c \geq Pref; PH_{verde} = Pref \quad (\text{Eq. 5})$$

$$ET_c < Pref; PH_{verde} = ET_c \quad (\text{Eq. 6})$$

3.2.2. A pegada hídrica azul

A pegada de água azul refere-se ao consumo de água azul, ou seja, água que tem origem nos rios e lagos, ou é extraída do subterrâneo, e não é derivada diretamente precipitação durante a estação de cultivo (ROST et al., 2008; FADER et al., 2011). O consumo neste caso faz referência à perda de água disponível em corpos d'água superficiais ou subterrâneos.

A componente azul da pegada hídrica da cultura da soja (PH_{azul}) é calculada de forma parecida com a PH_{verde} , porém considerando o consumo diário da água aplicada na irrigação, pela evapotranspiração da cultura (ET_{azul} , m^3 ou L), durante todo o período de cultivo (CHAPAGAIN et al., 2011; MÜLLER, 2012). A PH_{azul} foi obtida através da razão entre a Demanda Hídrica da Cultura azul (DHC_{azul}) e a produtividade dessa cultura ($Prvt$) conforme a Eq. 7.

$$PH_{azul} = \frac{DHC_{azul}}{Prvt} \quad (\text{Eq. 7})$$

A DHC_{azul} é calculada através do somatório do volume de água irrigada, dada pela equação (8), que é evapotranspirada diariamente pela cultura (ET_{azul} , m^3 ou L), durante todo o período de cultivo do primeiro dia de plantio ($d=1$), ao fim da colheita (pd).

$$DHC_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{pd} ET_{azul} \quad (\text{Eq. 8})$$

em que

DHC_{azul} = Demanda de água azul da cultura da soja (m^3);

10 é o fator de conversão, que visa converter a lâmina de água irrigada de milímetros para litros de água por superfície terrestre, em m^3/ha ;

ET_{azul} = Evapotranspiração diária de água azul (mm/dia).

A ET_{azul} foi calculada a partir do máximo entre a diferença da evapotranspiração total da cultura (ET_c), obtida através do produto entre a evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultivo (K_c), e a precipitação efetiva (P_{ref}), como mostra a Eq. 9:

$$ET_{azul} = \max(0; ET_c - P_{ref}) \quad (\text{Eq. 9})$$

e se:

$$ET_c \geq P_{ref}; PH_{azul} = P_{ref} - ET_c \quad (\text{Eq. 10})$$

$$ET_c < P_{ref}; PH_{azul} = 0 \quad (\text{Eq. 11})$$

3.2.3. A pegada hídrica cinza

A pegada hídrica cinza é um indicador do grau de poluição da água doce, sendo definida como o volume de água doce necessário para assimilação da carga de poluentes com base nos atuais padrões de qualidade ambiental da água. Segundo Hoekstra et al. (2011), o cálculo dessa componente da pegada hídrica, no caso deste trabalho a pegada hídrica cinza da cultura da soja, ($PH_{soja,cinza}$), é calculada pelo produto entre a taxa de aplicação por hectare dos agroquímicos no campo (TAQ), e a fração de lixiviação/escoamento (α), dividido pela diferença entre a máxima concentração aceitável (C_{max}) e a concentração natural do poluente em questão (C_{nat}), divididas então pela produtividade da cultura ($Prvt$), como mostra a Eq. 12.

$$PH_{cinza} = \frac{(\alpha \times TAQ)}{\frac{(C_{max} - C_{nat})}{Prvt}} \quad (\text{Eq. 12})$$

em que:

α = fração de lixiviação/escoamento do fertilizante;

TAQ = taxa de aplicação por hectare do composto agroquímico em campo kg ha^{-1} ;

C_{max} = concentração máxima aceitável de poluentes no sistema (t m^{-3});

C_{nat} = concentração natural num corpo de água (t m^{-3}). No caso de concentrações naturais não conhecidas com precisão, mas estimativas que sejam baixas, admite-se que a concentração natural da massa de água receptora é nula ($C_{nat} = 0$);

$Prvt$ = produtividade da cultura (t ha^{-1}).

Hoekstra et al. (2011) recomendam que se considere no cálculo da pegada hídrica cinza, somente o ‘fluxo residual’ para os corpos d’água, que geralmente corresponde a uma fração da aplicação total de fertilizantes (nitrogênio, fósforo etc) ou pesticidas no campo. Não sendo necessário contabilizar todos os poluentes que afetam o sistema, mas apenas aquele, poluente mais críticos que os que geram o maior volume de água após o cálculo da pegada hídrica cinza.

No caso da lavoura de soja, a fonte de poluição adotada foi o fertilizante nitrogenado, que é empregado no processo de adubação da cultura de soja. Segundo Lamond e Wesley (2001), para soja de alta produtividade, a aplicação de nitrogênio recomendada é de 22 kg.ha⁻¹. O valor limite aceitável dos fertilizantes nitrogenados seguiu o padrão da Resolução CONAMA 357/2005, classe 3 para águas doces que é de 10 mg L⁻¹. Como nesta pesquisa não houve avaliações, análise e espacialização de corpos hídricos em entorno das áreas agrícolas, atribuiu-se o valor 0 (zero) para a concentração natural do nitrogênio no corpo hídrico. Para a fração de lixiviação, adotou-se o valor de 10% da lixiviação para fertilizantes nitrogenados, de acordo com Chapagain et al. (2006).

3.3. A evapotranspiração e a produtividade da cultura da soja

Neste estudo, a evapotranspiração e a produtividade da soja necessários para o cálculo da pegada hídrica verde e azul para as condições atuais e cenários de mudanças climáticas na região do Matopiba serão obtidas através do gerador de arquivos de tempo MarkSimGCM e do modelo AquaCrop, descritos com mais detalhes nos itens seguintes. A evapotranspiração atual foi estimada a partir das séries diárias de temperatura máxima, mínima e radiação solar, usando a função clima atual do MarkSimGCM, que faz o processo de regionalização “downscaling” espacial e temporal. A evapotranspiração para cenários futuros também foi estimada através de séries temporais diárias de temperatura e radiação geradas através do MarkSimGCM, porém considerado os modelos climáticos HadGEM2-ES e MIROC5, para os cenários de RCP 4.5 e 8.5. A produtividade atual da cultura da soja foi obtida na ferramenta “Cidades” do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para os principais municípios produtores de soja na região do Matopiba. As projeções futuras de produtividade foram estimadas por meio do modelo AquaCrop, usando os parâmetros da cultura calibrada por esse modelo, tipo de solo da região e as séries de dados meteorológicos gerados através do MarkSimCGM, para os modelos climáticos e os cenários de RCP considerados neste estudo.

3.4. O modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop foi desenvolvido pela FAO e tem uma abordagem em modelagem de simulação de crescimento e produtividade das culturas herbáceas em resposta à água disponibilizada por irrigação suplementar ou total, déficit hídrico ou sequeiro, e outros estresses abióticos (temperatura, fertilização, salinidade e CO₂) (RAES et al., 2012; STEDUTO et al., 2012). O modelo surgiu em substituição aos antigos procedimentos estabelecidos por Doorenbos e Kassam (1979), em *Irrigation & Drainage Paper no. 33, Yield Response to Water*, que utilizavam somente a evapotranspiração (ET) para estimativa da produtividade das culturas. No AquaCrop a ET é dividida em evaporação do solo e transpiração da cultura. Essa separação tem a finalidade de evitar o uso da água não produtiva. Além da ET, o modelo divide o rendimento final da cultura em biomassa (B) e índice de colheita (HI), a fim de evitar conflito entre os efeitos do estresse hídrico sobre a B e HI.

Como no AquaCrop o crescimento da cultura é impulsionado pela água, a contabilização dessa água é dada pela transpiração que desempenha uma relação linear com taxa de crescimento da biomassa. Assim a transpiração é convertida em biomassa através do parâmetro produtividade da água (WP) (STEDUTO et al., 2007). Os principais componentes usados pelo AquaCrop para estimar o rendimento final da cultura (Eq. 15) são obtidos pelo produto entre a B (Eq. 13), obtida através da produtividade da água normalizada (WP*), e em função do HI, como mostram as equações abaixo:

$$B = WP * \times \sum \frac{Tr}{ET_o} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$Tr = K_s \times K_{cb} \times ET_o \quad (\text{Eq. 14})$$

$$Y = HI \times B \quad (\text{Eq. 15})$$

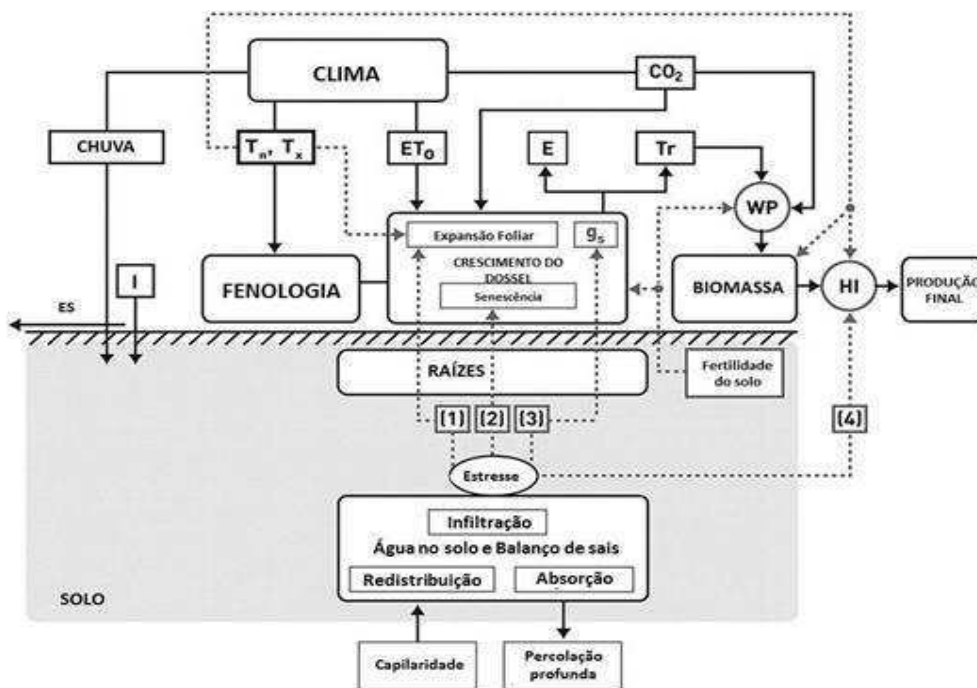
onde: B (t ha⁻¹) é a biomassa produzida desde a data de plantação até maturação; WP* (g m⁻²) é a produtividade da água normalizada; ET_o é a evapotranspiração de referência diária (mm) calculada usando a equação FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998); Tr é transpiração diária (mm); K_s é coeficiente de estresse hídrico; K_{cb} é o coeficiente basal da cultura que é proporcional a cobertura verde do dorsel (CC); Y é o rendimento da cultura (t ha⁻¹); e HI é índice de colheita (adimensional).

O parâmetro de WP* tende a ser constante para diferentes solos e climas (HANKS, 1983; TANNER e SINCLAIR, 1983). Steduto et al. (2007) ressaltam que a WP normalizada é um parâmetro conservativo para diferentes condições climáticas, o que implica maior

aplicabilidade, robustez e transferibilidade do modelo para diferentes regiões do mundo. No cálculo de Tr , que representa a cobertura do dossel verde, K_s é estimado pela tolerância de uma determinada cultura ao estresse hídrico e a disponibilidade de água na zona radicular simulada usando a função de drenagem exponencial de Raes (1982) (KIM e KALUARACHCHI, 2015), seu valor varia de 0 a 1, com zero representando o efeito máximo possível de estresse e um condição sem estresse (STEDUTO et al., 2009). O dossel, através da sua expansão, envelhecimento, condutância e envelhecimento, é muito importante no AquaCrop (KIM e KALUARACHCHI, 2015), pois o dossel está diretamente ligado a Tr , que está diretamente relacionado a B , e indiretamente a Y . Assim, sob condições não limitantes de água, o crescimento do dossel é exponencial, desde a emergência até a cobertura máxima do dossel (CC_x). Por sua vez, a duração do dossel é função do tempo e depende da cultura (RAES et al., 2009). Ao contrário de todos outros modelos, o AquaCrop usa a cobertura do dossel (CC) ao invés do usual índice de área folhear (IAF), destacando outra característica singular do AquaCrop. Segundo Kim e Kaluarachchi (2015) o uso da CC introduz simplicidade ao AquaCrop, reduzindo todo o crescimento acima do solo em apenas uma única função de crescimento. O HI usado no cálculo do rendimento final começa a aumentar a partir do início da floração até a maturação da cultura (RAES et al., 2009, 2011; STEDUTO et al., 2009).

Os componentes estruturais do AquaCrop incluem o solo (balanço hídrico do solo), a planta e a atmosfera (STEDUTO et al., 2009), os quais definem o ambiente onde a cultura se desenvolve como mostra a Figura 6. Os parâmetros atmosfera e solo no AquaCrop são semelhantes com outros modelos conhecidos de simulação de rendimento de cultura, o que distingue o AquaCrop é a relação entre a planta e as componentes do solo. O AquaCrop modela a cultura com base em cinco componentes principais e suas respostas associadas ao estresse hídrico. As componentes são: fenologia/desenvolvimento, cobertura do dossel, profundidade de enraizamento, produção de biomassa e rendimento (RAES et al., 2009). Os efeitos do estresse hídrico provocam: (1) limitação da expansão do dossel, (2) a senescência precoce do dossel e (3) fechamento dos estômatos (RAES et al., 2009). Sob o estresse hídrico contínuo, os parâmetros (4) WP e (5) HI também podem ser afetados. Steduto et al. (2009) destacam que essas três respostas ocorrem no nível do dossel, daí a importância do dossel no AquaCrop. Essas cinco respostas formam a estrutura da componente cultura do AquaCrop.

Figura 6. Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; T_n – temperatura mín do ar; T_x – temperatura máx do ar; ET_0 - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr – transpiração da cultura; g_s - condutância estomática; WP - produtividade da água; HI - índice de colheita; CO_2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES – escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) - diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação.



Fonte: Alencar (2014), adaptado de Steduto et al. (2009).

3.4.1. Componente clima

Os arquivos de clima do AquaCrop são gerados a partir de dados diários de temperatura do ar máxima e mínima, precipitação, demanda evaporativa da atmosfera, expressa em termos de evapotranspiração de referência (ET_0), e a concentração média anual de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. As quatro primeiras variáveis meteorológicas foram obtidas junto a uma estação meteorológica instalada dentro da área experimental e a concentração média anual de CO_2 considerada foi a medida pelo observatório de Mauna Loa no Havaí. A ET_0 foi calculada pelo software ET_0 Calculator (RAES, 2012), o qual usa a equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

3.4.2. Componente solo

No que se refere ao perfil do solo, o modelo permite até cinco diferentes horizontes cada um com suas características físicas. Quanto às características hidráulicas do solo, os dados necessários são: capacidade de campo (FC) ou limite superior de retenção de água; ponto de murcha permanente (PMP), ou limite inferior de água; coeficiente de drenagem (τ); e a condutividade hidráulica à saturação (K_{sat}). Na impossibilidade de obtenção de dados em campo, o usuário do modelo pode fazer uso de valores indicativos fornecidos pelo AquaCrop para várias classes texturais do solo ou de importação ou derivado de dados locais da textura do solo, obtidos com a ajuda das funções de transferência de solo, de acordo com a calculadora desenvolvida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América em cooperação com a Universidade Estadual de Washington disponível em: <http://http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>. Ao especificar dados do solo para o horizonte superior, são obtidas as primeiras estimativas para o Número da Curva (USDA, 1964) e água prontamente evaporável (REW) (Allen et al., 1998). O modelo ainda executa um balanço diário de água que inclui os processos de infiltração, escoamento, drenagem interna dentro da zona de raiz, extração da raiz em diferentes camadas de profundidade, percolação profunda, evaporação, transpiração e ascensão capilar (RAES et al., 2009).

3.4.3. Componente cultura

A componente cultura no modelo AquaCrop considera cinco elementos da cultura associada às respostas dinâmicas do sistema: fenologia, cobertura do dossel, profundidade de enraizamento, produção de biomassa e produtividade. Segundo Steduto et al. (2009), ao longo das fases fenológicas do ciclo total da cultura a cultura cresce e desenvolve seu dossel, expande e aprofunda seu sistema radicular. Ainda segundo esse autor, o AquaCrop considera quatro efeitos do estresse hídrico: no crescimento foliar, na condutância estomática, na senescência do dossel e no índice de colheita (HI). Excetuando-se HI, tais feitos se manifestam por meio de seus coeficientes de estresse individuais, K_s , que é considerado o indicador da intensidade relativa do efeito. A parametrização pode ser realizada para diferentes níveis de fertilidade de solo, como: sem restrição de fertilidade, média fertilidade e alta restrição da fertilidade, os quais afetam CGC, CC, o início da senescência do dossel e a taxa de declínio da cobertura do solo pelo dossel e a WP. O AquaCrop também fornece um padrão de todos os parâmetros necessários para rodar o modelo na ausência de informações

mais específicas de culturas ainda inexploradas (GEERTS et al., 2009). O sistema radicular da cultura também é considerado no AquaCrop através da profundidade da raiz efetiva, definida como a profundidade na qual a cultura irá realizar a maior parte da sua absorção de água (RAES et al., 2009). O AquaCrop fornece ao usuário dois modos de simulação: tempo térmico (GDD) e tempo do calendário. O modelo em si usa tempo térmico (RAES et al., 2009) com base no Método 2 descrito por McMaster e Wilhelm (1997). Há uma importante modificação no AquaCrop, na medida em que não há ajuste para a temperatura mínima basal (T_n) quando e se ocorrer temperatura abaixo da temperatura máxima basal (T_b). Isso permite melhores considerações e flutuações mais realistas da temperatura abaixo da T_b e permite simulação efetiva de culturas de inverno (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009). A concentração de CO_2 utilizada como referência (378,8 ppm) equivale à concentração média medida no ano 2005, no Observatório de Mauna Loa, no Havaí.

3.4.4. Componente manejo

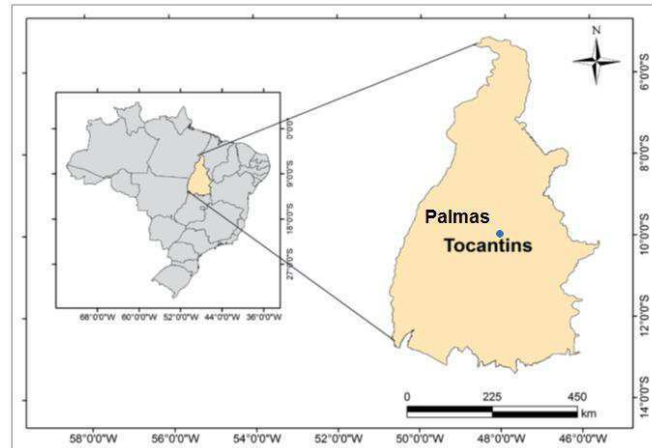
O componente manejo no AquaCrop tem duas categorias: uma é o manejo de campo (que é bastante amplo) e a outra é a gestão da água (que é mais específica). Na opção manejo de campo é possível selecionar ou definir as seguintes condições: (i) o nível de fertilidade do solo ou as condições em que a cultura é exposta durante o seu ciclo; (ii) práticas de campo, tais como cobertura morta sob o solo para reduzir a evaporação ou a utilização de diques para controlar o escoamento superficial e a infiltração; e (iii) o período para o corte das culturas forrageiras. O AquaCrop não calcula o balanço de nutrientes, mas oferece as opções semi quantitativas para avaliar os efeitos da fertilidade na produção de biomassa e na produtividade final da cultura. No manejo de água há duas opções: (i) agricultura de sequeiro (sem irrigação) e (ii) irrigação. Na opção sob irrigação, o usuário seleciona o método a ser aplicado (por aspersão, gotejamento ou superficial, além de especificar o turno de rega e a lâmina de irrigação ou deixar que o modelo determine automaticamente a programação com base no turno de rega fixo ou variável (STEDUTO et al., 2009).

3.5. Dados de entrada para calibração e validação do AquaCrop

Para a calibração e validação do modelo AquaCrop na região do Matopiba, foram utilizados como dados de entrada parâmetros de clima, solo, cultura, manejo de campo e irrigação coletados em duas campanhas experimentais, realizadas entre os meses de junho a

novembro sob regime de irrigação por gotejamento para a cultivar de soja TMG 1288 RR, na área experimental da Universidade Federal do Tocantins – UFT localizada no campus de Palmas (10°10' Sul, 48°21' Oeste e altitude de 216 metros) (Figura 7).

Figura 7. Localização geográfica do estado do Tocantins, com destaque para o município de Palmas.



Fonte: Adaptado de Souza et al. (2010).

3.5.1. Parâmetros de clima

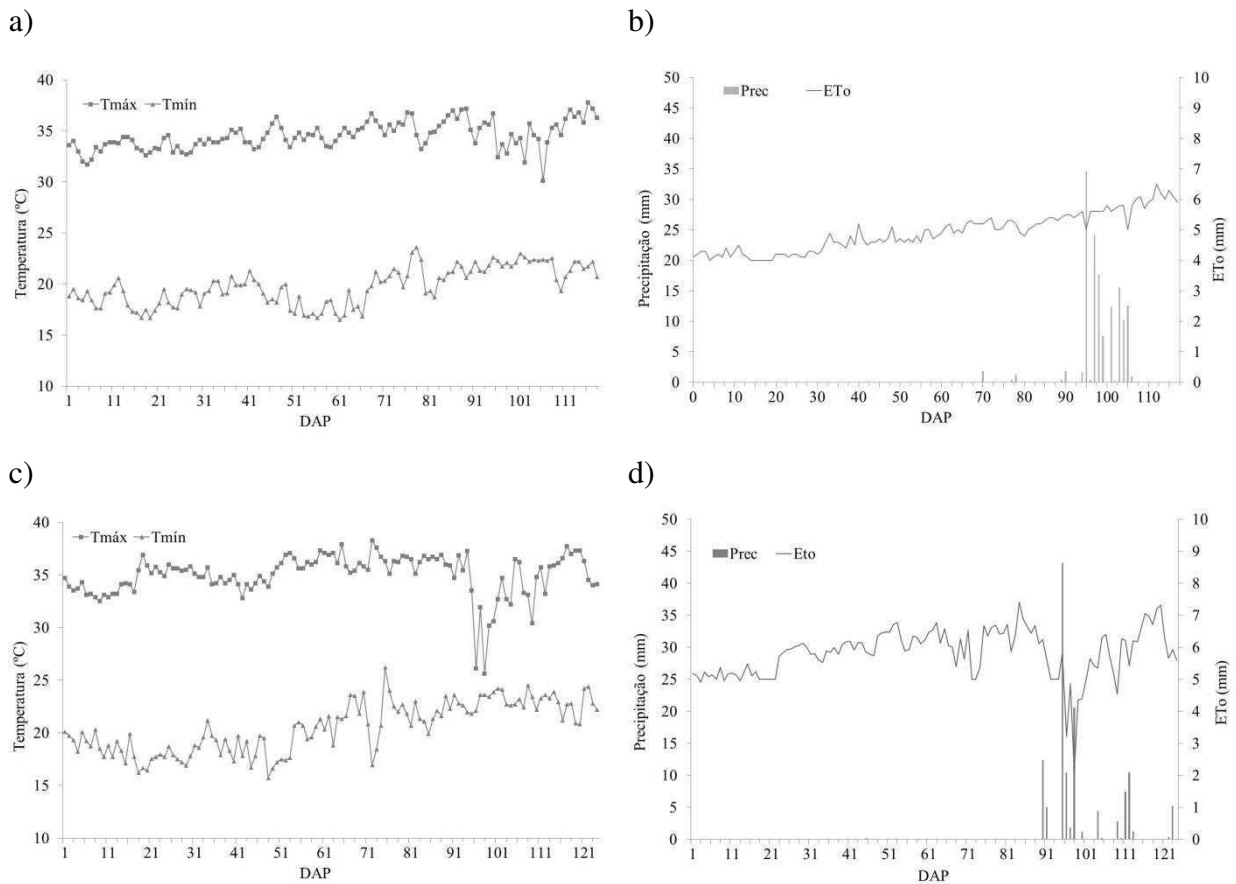
Os elementos do clima exigidos pelo modelo AquaCrop são valores diários de temperatura do ar mínima e máxima, evapotranspiração de referência da cultura (ET_o), precipitação e concentração média anual de dióxido de carbono (CO_2). A ET_o foi calculada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998), como mostra a Eq. 16 através do software ETo Calculator Version 3.2 (FAO, 2012).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (\text{Eq. 16})$$

em que ET_o é a evapotranspiração de referência [$mm\ d^{-1}$]; o valor de 0,408 converte a radiação líquida R_n expressa em $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ para evaporação equivalente, expressa em $mm\ d^{-1}$; R_n é o saldo de radiação à superfície da cultura [$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$]; G é a densidade do fluxo de calor do solo [$MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$], que é considerada relativamente pequena e assume nulo para um período de 24 horas; T é a temperatura média do ar a 2 m de altura [$^{\circ}C$], u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura [$m\ s^{-1}$]; $(e_s - e_a)$ é o déficit da pressão de vapor medido a 2 m de altura (kPa); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$); γ constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$).

Na Figura 8 são mostradas as variáveis meteorológicas coletadas durante duas campanhas experimentais realizadas área experimental do *Campus* de Palmas da Universidade Federal do Tocantins (10°10' Sul, 48°21' Oeste). As campanhas experimentais foram realizadas em 2014 (Figuras 4a e 4b), durante o período de 20 de junho a 15 de outubro totalizando 117 DAP (Dia Após o Plantio), e em 2016 (Figuras 4c e 4d) no período de 20 de junho a 21 de outubro de 2016, equivalente a 124 DAP. Nota-se que nas duas campanhas experimentais as precipitações se concentraram no final do ciclo de cultivo da soja, entre os meses de setembro e outubro com totais de 143,6 mm em 2014 e 127,0 mm em 2016. Os maiores volumes diários de precipitação ocorrem no dia 95 DAP em 2014, com de 34,0 mm, e em 2016, com 43,2 mm. As temperaturas do ar registradas durante as duas campanhas experimentais de cultivo da soja variaram entre máximas de 38,80°C (2014) e 38,27°C (2016), e mínimas de 16,50°C (2014) e 15,70°C(2016). As maiores amplitude térmicas foram observadas entre os meses de julho e agosto para ambos os ciclo de cultivo, sendo que essa amplitude foi mais acentuada no ano de 2016. No mês de setembro de 2016, verificou-se decréscimo de quase 10°C na temperatura máxima do ar em decorrência de dias consecutivos de precipitação. A ET_0 estimada apresentou comportamento crescente ao logo do ciclo de cultivo, com maiores valores diários observados nos meses de setembro em ambos os anos. A ET_0 durante o ciclo de cultivo da soja foi de 624,80 mm em 2016 e de 580,80 mm em 2014.

Figura 8. Variáveis meteorológicas durante o ciclo de cultivo da cultura de soja nas campanhas experimentais de 2014 (a, b) e 2016 (c, d).



Fonte: Elaborada pela autora.

3.5.2. Parâmetros de solo

Para calibrar e validar o solo no modelo AquaCrop neste estudo, foram requeridos: o conteúdo volumétrico do solo a saturação (Θ_{SAT}); a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}); a profundidade do solo em que a água pode ser prontamente evaporada sem restrição (REW) (ALLEN et al., 1998) no valor de 11 mm, calculada através do conteúdo volumétrico do solo a capacidade de campo (Θ_{CF}), do teor de água no solo seco ($\Theta_{air,dry}$), que corresponde a aproximadamente 0,5 do ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}) e da espessura da camada superficial do solo em contato direto com a atmosfera ($Z_{e,surf}$), assumindo o valor de 40 mm. Os parâmetros Θ_{CC} e Θ_{PMP} foram estimados a partir da curva de retenção considerando um potencial matricial de -6 kPa e 1500 kPa, respectivamente. Na Tabela 1 são apresentadas análises físicas e químicas do solo da área experimental realizadas no ano de 2016 pelo Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa – UFV pelo Laboratório Agropecuário Zoofértil – Palmas – TO. Além desses

parâmetros, considerou-se a profundidade efetiva máxima do sistema radicular (Z) de 60 cm e o número da curva (CN) local de 65, usada para estimar o escoamento superficial das chuvas que ocorreram durante o experimento.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas Características hidráulicas do solo da estação experimental da Universidade Federal do Tocantins – UFT Campus Palmas.

Propriedades	Valores
Areia (%)	82,0
Silte (%)	5,0
Argila (%)	13,0
Densidade do solo (g cm^{-3})	1,55
Condutividade hidráulica saturada (K_{sat} ; mm/dia)	541,68
Capacidade de campo (Θ_{CF} ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,332
Ponto de murcha permanente (Θ_{PMP} ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0,129
Saturação (Θ_{SAT} ; $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).	0,429
Fósforo (mg dm^{-3})	20,60
Potássio – Mel (mg dm^{-3})	72,00
Cálcio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	1,60
Magnésio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,80
Alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,00

Fonte: Laboratório de Análise de Solo, Tecido Vegetal e Fertilizante da Universidade Federal de Viçosa – UFV (2016); Laboratório Agropecuário Zoofértil – Palmas – TO (2016).

3.5.3. Parâmetros de cultura

De acordo com Hsiao et al. (2009), no modelo AquaCrop alguns parâmetros de entrada da cultura são ditos conservativos e não-conservativos. Os parâmetros conservativos mostrados na Tabela 2, e são ditos como tal porque eles não mudam com localização geográfica, práticas de gerenciamento e tempo, eles são aplicáveis a várias condições e não é específico de uma determinada cultivar da cultura da soja (STEDUTO et al., 2009; RAES et al., 2009; HENG et al., 2009). Os parâmetros não conservativos são específicos de cultivares e são afetados pelo clima, gerenciamento de campo ou condições no perfil do solo, portanto, devem ser fornecido pelo usuário ao modelo AquaCrop. Portanto, se não estiver disponível, o AquaCrop pode estimá-los (por exemplo, data de semeadura, densidade da planta etc.) (MKHABELA e BULLOCK, 2012).

Tabela 2. Parâmetros conservativos e não conservativos da cultivar de soja TMG 1288 RR utilizados na calibração do modelo AquaCrop.

Parâmetros	Valores						
	Todos os tratamentos						
Conservativos							
Temperatura mínima basal (Tn) (°C)	5,0						
Temperatura máxima basal ((Tb) (°C)	30,0						
Cobertura do solo pelo dossel com 90% de emergência (CC ₀) (cm ²)	5,0						
Densidade de planta (planta. ha ⁻¹)	286,0						
Produtividade de água da cultura normalizada para ET ₀ e CO ₂ (WP*) (g m ⁻²)	15,0						
Produtividade da água normalizada durante a formação de grão WP* (g m ⁻²)	60,0						
Fator forma da expansão das raízes	15,0						
Não conservativos							
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Tempo da semente até a emergência (dia)	7,0	6,0	5,0	5,0	6,0	7,0	7,0
Tempo de emergência de 90% das plântulas (dia)	15,0	10,0	13,0	15,0	16,0	15,0	15,0
Cobertura máxima do dossel (CCx) (%)	0,49	0,44	0,54	57,0	78,0	0,65	0,90
Coefficiente de crescimento do dossel (CGC) (%.d ⁻¹)	0,13	0,08	0,15	0,12	0,08	0,08	0,11
Coefficiente de declínio do dossel (CDC) (%.d ⁻¹)	0,17	0,23	0,24	0,30	0,16	0,16	0,25
Tempo da semente até o início da senescência (dia)	106,0	113,0	110,0	110,0	102,0	113,0	112,0
Tempo da semente até a floração (dia)	53,0	57,0	52,0	57,0	53,0	57,0	58,0
Comprimento da floração (dia)	35,0	36,0	39,0	38,0	43,0	46,0	38,0
Tempo da semente até a maturação (dia)	115,0	119,0	117,0	119,0	113,0	121,0	124,0
Profundidade efetiva mínima das raízes (m)	0,30	0,31	0,33	0,33	0,30	0,32	0,28
Profundidade efetiva máxima das raízes (m)	0,70	0,67	0,62	0,58	0,55	0,55	0,53
Tempo da semente até profundidade máxima de enraizamento (dia)	69,0	67,0	65,0	65,0	78,0	0,80	70,0
Índice de colheita de referência (%)	17	35	21	19	43,0	47,0	0,40
Limiar da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite superior (p _{exp,upper})	0,25	0,0	0,25	0,20	0,20	3,0	0,10
Limiar da depleção da água no solo para a expansão do dossel - Limite inferior (p _{exp,lower})	0,60	0,35	0,60	0,55	0,55	0,55	0,45
Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Limiar da depleção da água no solo para controle estomático- Limite superior (p _{sto})	0,65	0,25	0,65	0,65	0,55	0,55	0,45
Fator forma para o coeficiente de estresse hídrico para o fechamento estomático	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Limiar da depleção da água no solo para a senescência do dossel - Limite superior (p _{sen})	0,65	0,35	0,65	0,65	0,55	0,55	0,45
Fator de forma para o coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Neste estudo, os parâmetros não conservativos foram obtidos a partir de campanhas experimentais realizadas nos anos de 2014 e 2016, com a cultivar de soja TMG 1288 RR de ciclo de maturação tardio e adaptadas às condições edafoclimáticas da região do Matopiba. Essa cultivar tem bons índices de produtividade, além de resistência ao acamamento, pragas e doenças (NUNES et al., 2016). Os dados foram coletados quinzenalmente em cada período fenológico da cultura, sendo alguns dados obtidos através de amostras destrutivas de uma planta por parcela experimental. Esses parâmetros referem-se aos períodos de emergência, desenvolvimento do dossel, cobertura máxima do dossel, início da floração, duração da floração, início da senescência e maturidade fisiológica, bem como máxima profundidade de enraizamento e biomassa da parte aérea da planta. Também foram ponderados como sendo aplicável a uma ampla gama de condições e não específico para uma dada cultivar de cultura, o coeficiente de declínio do dossel, o coeficiente da cultura para a transpiração na cobertura do dossel completo, os limiares de depleção da água do solo para a inibição do crescimento da folha e a condutância estomática, a aceleração da senescência do dossel (HSIAO et al., 2009; HENG et al., 2009).

No AquaCrop o tempo de emergência é tomado como a data em que ocorreu 90% da emergência das plântulas. Nesta data assume-se como o início do desenvolvimento. O desenvolvimento da cobertura do dossel foi determinado por seis parâmetros: coeficiente de crescimento do dossel (CGC), coeficiente de declínio do dossel (CDC), cobertura máxima do dossel (CCx), dias para emergência, dias para senescência e dias até a maturidade total. O tempo da máxima cobertura do dossel (CC) é um componente importante no cálculo da transpiração da cultura, dependente da densidade de plantas e do índice de área foliar. Já a senescência foi assumida quando iniciou o declínio do dossel, que segundo Hsiao et al. (2009) é o momento em que cobertura do dossel diminuiu abaixo de um valor correspondente ao valor do índice de área foliar. A maturidade fisiológica foi adotada, conforme indicado nas referências, quando a cobertura do dossel diminuiu quase a zero. A profundidade de enraizamento, conforme Hsiao et al. (2009), foi considerado o tempo para que as raízes alcançaram a máxima profundidade e esse tempo também foi considerado como o início da senescência do dossel em condições de não estresse. A biomassa parte aérea da soja foi obtida pesando-a após manter em estufa por 48 horas a 65 ° C. Também foi utilizado o coeficiente de colheita para transpiração na cobertura completa do dossel, limiar de depleção de água no solo para inibição do crescimento foliar e condutância estomática, aceleração da senescência do dossel, conforme recomendado por Hsiao et al. (2009).

Segundo Abedinpour et al. (2012) os limiares superior e inferior e a forma da resposta curva são os parâmetros obtidos para cada tipo de estresse e que definem a sensibilidade e gravidade de um perfil de solo empobrecido. O estresse hídrico é dividido em estresse de expansão, estresse estomático e coeficientes de estresse de senescência. O limite superior determina quando o estresse começa, enquanto o limite inferior é o ponto em que o processo fisiológico cessa completamente. O fator de forma por sua vez, descreve a amplitude dos estresses que afetam a produtividade da cultura. Um fator de forma zero indica maior sensibilidade da cultura ao estresse hídrico e maior do que zero é um indicativo de menor sensibilidade ao estresse hídrico. Assim, nesse estudo esses parâmetros foram ponderados como não conservativos e foram calibrados usando os dados dos experimentos para obter uma melhor combinação entre os parâmetros simulados pelo AquaCrop e os observados.

3.5.4. Parâmetros de manejo

A irrigação e o manejo de campo realizados durante o experimento no campo são componentes importantes a serem consideradas no modelo AquaCrop. As campanhas experimentais de 2014 e 2016 foram realizadas no período seco da região de estudo, com ciclo de cultivo de aproximadamente 130 dias. A soja foi semeada manualmente com delineamento experimental em blocos ao acaso com quatro repetições, tendo os tratamentos dispostos em um esquema de parcelas subdivididas, em duas subparcelas (cultivares). A área de cada parcela era de 70 m² (3,5 x 20 m), totalizando uma área de 610 m² (30,5 x 20 m) ocupada pelo experimento, composta de 56 linhas de plantio e tendo 14 plantas por metro linear. A fim de garantir que não houvesse interferência entre os diferentes tratamentos, foi realizado espaçamento de 1 m entre os mesmos. A parcela subdividida experimental (repetições) foi constituída por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas de 0,5 m. Na colheita foram desprezadas as bordaduras de cada parcela, duas linhas das laterais e 0,5 m das extremidades das fileiras, resultando em uma área útil de 3,6 m² por parcela experimental com um total de 112 plantas. Nos tratamentos culturais foram efetuadas aração e gradagem, correção do solo, adubação, aplicação de formicida e fungicida, e limpeza manual dos canteiros.

A prática de irrigação adotada foi localizada, por gotejamento, onde cada linha de plantio tinha uma linha lateral de polietileno com diâmetro nominal de 16 mm contendo gotejadores espaçados de 0,5 m. A lâmina de irrigação equivale a evapotranspiração da cultura (ET_c), obtida pelo produto entre a ET_0 e o coeficiente de cultivo (K_c), conforme mostra a Eq. 17:

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (\text{Eq. 17})$$

onde: ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm d^{-1}); ET_o a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}) por Allen et al. (1998), e K_c o coeficiente de cultivo para cada período fenológico da cultura (adimensional). Os valores adotados de K_c são, na fase inicial da cultura de 0,4; no desenvolvimento de 0,8; na floração, no desenvolvimento de 1,15; na fase final de 0,8 e colheita de 0,5 (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A irrigação foi realizada diariamente, aplicando sete lâminas de irrigação denominadas de T1, T2, T3, T4, T5, T6 e T7, da maior para a menor lâmina e variando de acordo com as fases de crescimento da planta (Tabela 3). Quando ocorreu registro de precipitação, o volume precipitado foi descontado da lâmina diária. Também no final do ciclo da cultura, quando a cultura da soja iniciou a fase de maturação foi realizada a interrupção da irrigação para que as plantas iniciassem o processo de senescência e os grãos atingissem a umidade ideal para colheita.

Tabela 3. Tratamentos de irrigação aplicados à cultura da soja cultivada em Palmas, TO, em função da evapotranspiração da cultura (ET_c).

Tratamento	Lâmina
T1	25% da ET_c em TC
T2	100% ET_c na FV e 25% ET_c na FR
T3	50% da ET_c em TC
T4	100% ET_c na FV e 50% ET_c na FR
T5	25% ET_c na FV e 100% ET_c na FR
T6	50% ET_c na FV e 100% ET_c na FR
T7	100% da ET_c em TC

TC = Todo ciclo de cultivo; FV = Fase vegetativa; FR = Fase reprodutiva.

Fonte: Elaborada pela autora.

As lâminas de irrigação de cada tratamento e estágio de cultivo foram convertidas em tempo de irrigação, através da Eq. 18:

$$T_i = \frac{ET_c \times E_L \times E_e \times Fc}{Ei \times q_e} \quad (\text{Eq. 18})$$

em que: T_i é o tempo de irrigação (h); ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); E_L é o espaçamento entre linhas de irrigação (m); E_e é o espaçamento entre emissores (m); Fc é o fator de cobertura do solo (adimensional); Ei é a eficiência de irrigação (adimensional); q_e é a vazão do emissor (L h^{-1}).

A cultivar de soja TMG 1288 RR é de ciclo de maturação tardio e adaptadas às condições edafoclimáticas da região do Matopiba. Essa cultivar tem bons índices de produtividade, além de resistência ao acamamento, pragas e doenças (NUNES et al., 2016). Foram realizadas controle de pragas, doenças e plantas daninhas, em ambas as campanhas, sempre que necessário. Nos tratos culturais utilizou-se aração e gradagem; correção do solo; adubação; aplicação de formicida e fungicida, e limpeza manual dos canteiros.

Modelos de simulação agrícola antes de serem usados na prática, devem ser cuidadosamente calibrados, parametrizados e validados (ADDISCOTT et al., 1995; NAIN e KERSEBAUM, 2007). Assim, a primeira etapa deste estudo consistiu em calibrar e validar o desempenho do modelo AquaCrop em simular o rendimento de grãos soja em Palmas – TO para todos os sete tratamentos de irrigação. Usando os dados das campanhas experimentais de 2016 para calibrar e os de 2014 para validar os dados, pois todos os parâmetros de cultura necessários para o procedimento de calibração da produtividade só puderam ser coletados no experimento realizado no ano de 2016.

3.6. Calibração e validação do modelo AquaCrop

A calibração consistiu em rodar o modelo com os dados de entrada de cada tratamento de irrigação, resultando em produtividades simuladas, que foram comparadas com as produtividades observadas no experimento de campo para os tratamentos. Foram realizados ajustes, por tentativa e erro, nos parâmetros que se conhecia e que mais poderiam influenciar a variável de referência. Esse procedimento foi repetido inúmeras vezes até se chegar ao valor correspondente mais próximo, entre o valor de produtividade simulado pelo modelo e o valor observado (ABEDINPOUR et al., 2012), com a finalidade de minimizar a diferença entre esses dois valores, resultando em um conjunto de parâmetros, que segundo o Manual do AquaCrop (RAES et al., 2009) são ditos conservativos para cada situação de estresse ao qual a cultura foi submetida. Em contrapartida, o procedimento de validação consiste em comparar

as produtividades simuladas pelo modelo, usando como dados de entrada do modelo os parâmetros da cultura que apresentaram os melhores ajustes de calibração de cada tratamento de irrigação, com as produtividades observadas em experimento de campo (NAIN e KERSEBAUM, 2007; SALAZAR et al., 2009).

O modelo AquaCrop foi calibrado para prever a produtividade de grãos de soja sob diferentes níveis de irrigação usando os dados do experimento realizado em 2016 e validado com os dados do experimento de 2014, em virtude da necessidade de dados de clima, solo, cultura e manejo, necessários para o procedimento de calibração estarem disponíveis apenas para o experimento realizado em 2016. O desempenho e robustez do modelo AquaCrop em simular a produtividade de grãos de soja obtida na calibração e validação foi avaliando através dos seguintes indicadores estatísticos: erro de previsão (E_p), coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio absoluto (EMA), eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), e o índice de concordância de Willmott's (d), em que S_i e O_i são, respectivamente, os valores simulados e observados, e \bar{O} é o valor médio de O_i e n o número de observações.

- O erro de previsão - P_e , foi calculado usando a Eq. (19):

$$E_p = \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 19})$$

- O coeficiente de determinação - R^2 , foi calculado usando a Eq. (20):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right)} \quad (\text{Eq. 20})$$

O R^2 é o valor do coeficiente de correlação de Pearson ao quadrado, descreve a magnitude da variância entre os dados medidos e os estimados pelo modelo, indicando a precisão do modelo (FIELD, 2005). Os valores de R^2 (Eq.16) variam de 0 a 1, com valores mais próximos de 1 indicando melhor ajuste, normalmente valores maiores que 0,5 são considerados aceitáveis. Uma desvantagem do R^2 é que apenas a dispersão é quantificada, dessa forma um modelo que superestima (ou subestima) as observações pode apresentar bons valores de R^2 (KRAUSE et al., 2005).

- A raiz quadrada do erro quadrático médio - RMSE (do inglês, *root mean square error*), foi calculada usando a Eq. (21):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (\text{Eq. 21})$$

O RMSE mede a magnitude média dos erros estimados, fornecendo o grau de espalhamento obtido na correlação entre os valores estimados e os observados. Uma das vantagens do RMSE é que, essa diferença é dada na mesma unidade das variáveis observadas e simuladas (NYAKUDYA e STROOSNIJDER, 2014). Os valores de RMSE são sempre positivos, assim variam de 0 a infinito e quanto mais próximo o valor de 0, melhor desempenho de simulação do modelo. Entretanto, assim com R^2 , o RMSE não diferencia a superestimação da subestimação.

- O erro médio absoluto – EMA, foi calculado usando a Eq. (22)

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{N} \quad (\text{Eq. 22})$$

O EMA mede a magnitude da média ponderada dos erros absolutos. Para Willmott e Matsuura (2005), o MAE é uma medida natural e mais precisa da magnitude média do erro.

- A eficiência de Nash e Sutcliffe – NSE (do inglês, *Nash-Sutcliffe efficiency*) foi calculada usando a Eq. (23):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (23)$$

Segundo Nash e Sutcliffe (1970), o NSE é uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variação de dados observados. NSE indica quão bem a combinação dos dados observados versus simulado se encaixam na linha 1:1, indicando a robustez do modelo. Os valores da NSE variam de $-\infty$ a 1, com 1 indicando uma combinação perfeita entre a simulação do modelo e as observações. Valores de NSE entre 0 e 1 são vistos com nível de desempenho aceitável, enquanto valor < 0 indicam que o valor médio observado é melhor preditor do que o valor simulado, indicando desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007).

• O índice de concordância (d) proposto por Willmott's et al. (1985) foi calculado utilizando a Eq. (23):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (23)$$

O índice de concordância de Willmott's é uma medida do grau em que os valores simulados concordam com os valores observados. Os valores variam entre 0 e 1, quando igual a 0 denota discordância e quando igual a 1, denota concordância perfeita. Quanto maior o valor do índice melhor o desempenho do modelo.

O R^2 , índice d e NSE foram usados para verificar a eficácia de previsão do modelo, avaliando a robustez do modelo quanto à previsão dos valores. Enquanto que RMSE e EMA indicam o erro de previsão do modelo, avaliam a previsibilidade modelo.

3.7. Projeções climáticas para o Matopiba

As simulações de tempo futuro dos principais municípios produtores de soja da região do Matopiba (Tabela 4) foram obtidas através de séries de dados meteorológicos geradas pelos modelos climáticos globais (GCM, sigla em inglês), que são as ferramentas mais utilizadas para projetar mudanças climáticas futuras em diferentes cenários de emissão (IPCC, 2007). Os GCMs projetam as variáveis meteorológicas em uma resolução de tempo de 30 min para algumas horas, mas em uma grade espacial geralmente grosseira (50-500 km). Ele funciona razoavelmente bem na simulação atmosférica de escala sinótica, porém eles costumam reproduzir mal em escalas espaciais menores, devido à disparidade de escalas espaciais dos GCMs. Dessa forma, para investigar os impactos da mudança climática na hidrologia, agricultura, saúde. etc., é necessário adequar as escalas espaciais entre os modelos. Para isso aplica-se o “downscaling” estatístico, que tem a função de assumir que o clima regional está condicionado pelo estado do clima de grande escala e características fisiográficas locais (WILBY et al., 2004).

Tabela 4. Localização geográfica dos principais municípios produtores de grãos de soja, de cada estados, que compõem a região do Matopiba.

Municípios	Latitude	Longitude
Balsas – MA	-7° 31' 58"	-46° 2' 8"
Campos Lindos – TO	- 8° 10' 4"	-46° 40' 13"
Baixa Grande Ribeiro – PI	-8° 29' 21"	-45° 8' 58"
Formosa do Rio Preto – BA	-11° 2' 27"	-45° 11' 26"

Fonte: Elaborada pela autora.

Neste estudo, utilizou-se o modelo britânico HadGEM2-ES (Met Office Hadley Center, 1,875 ° x 1,25 °) (BELLOUIN et al., 2011) e o japonês MIROC5 (Center for Climate System Research – CCSR; University of Tokyo; National Institute for Environmental Studies - NIES; Japan Agenc for Marine-Earth Science and Technology; 1,4 ° x 1,6°) (WATANABE et al., 2011). Segundo o IPC-IG Working Paper No.141 (2016), esses modelos “enxergam” o clima no futuro de jeitos diferentes: o modelo britânico tende a apontar um mundo mais seco no futuro, enquanto o modelo japonês vê um mundo mais chuvoso, ambos modelos tem apresentado resultados muito consistentes na avaliação das mudanças do clima na América do Sul para uma faixa de tempo de 30 anos. Os estudos sobre os impactos das mudanças climáticas normalmente requerem informações em resoluções espaciais e temporais menores, que aquelas fornecidas pelos GCM's. Então, foi usado o MarkSimGCM (<http://gisweb.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>) para produzir valores climáticos diários reduzidos para o local de estudo.

O MarkSim é um gerador de precipitação de Markov de 3° ordem que não foi projetado como um downscaler de GCM, mas vem sendo usado eficientemente como downscaling temporal e espacial, com uma resolução de 0,5° (aproximadamente 50 km) (JONES E THORNTON, 2000; JONES et al., 2002). Além da precipitação, o MarkSim estima as temperaturas diárias máxima e mínima do ar e os valores diários de radiação solar, que são estimados a partir de temperaturas, longitude e latitude adotado a metodologia proposta por Donatelli e Campbell (1997) (JONES e THORNTON, 2013). Uma das vantagens do MarkSim é que ele pode ser usado por qualquer modelo agrícola que requer dados meteorológicos (JONES e THORNTON, 2013), como observaram Hartkamp et al. (2003), Bitew (2015), Oliveira (2015), Tongson et al. (2017) e Habtemariam et al. (2017), ao avaliar os potenciais impactos das mudanças climáticas nos sistemas agrícolas, através da simulação cenários futuros gerados pelo MarkSimCGM.

Para comparação dos cenários de mudanças climáticas foram selecionadas as Trajetórias de Representatividade de Concentração - RCP (Representative Concentration Pathway, em inglês), do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC – AR5 (2014). As RCP definidas como forçante radiativa total, descrevem as mudanças no saldo líquido entre às entradas e de saída de radiação na atmosfera a qual representa uma medida das emissões de gases estufa em $W m^{-2}$.

As RCPs são divididas em quatro cenários RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 e RCP 8.5, com base na forçante de radiação. Estes quatro RCP's representam diferentes trajetórias para a emissão dos gases de efeito estufa e são classificadas de acordo com os níveis totais de forçantes radioativas. A RCP 2.6 é denominada como um cenário de baixa emissão, este cenário apresenta um nível de forçamento radiativo muito baixo e que será alcançado apenas se as políticas e os esforços de mitigação adequados forem feitos, que resultará na redução da emissão de gases de efeito estufa. Os cenários de RCP 4.5 e RCP 6 são considerados cenários intermediários de estabilização da emissão dos gases de efeito estufa, e que só serão alcançados se as estratégias de adaptação foram implementadas adequadamente. O RCP 8.5 é considerado o cenário pessimista de emissão dos gases de efeito estufa, em que muito pouco ou nenhum esforço será realizado para reduzir a emissão desses gases. Portanto, para avaliar o impacto das mudanças climáticas com e sem estratégias de adaptação no futuro, foram selecionados os RCP 4.5 e RCP 8.5 para este estudo. Segundo Machado Filho et al. (2016), sob a RCP 4.5 haverá aumento de $1,8^{\circ}C$ na temperatura da superfície global nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Já sob a RCP 8.5 essas regiões, devido ao crescimento da forçante radiativa que levará a um cenário de maior emissão de gases do efeito estufa sofreram um aumento na temperatura da superfície global de até $3,8^{\circ}C$. As concentrações anuais de CO_2 para cada período futuro, baseadas no Quinto Relatório de Avaliação do IPCC – AR5 para as RCP 4.5 e 8.5, foram obtidas na base de dados da componente clima do AquaCrop 5.0.

3.8. Projeções de produtividade para o Matopiba

Para obtenção da produtividade sob condições de mudanças climáticas na região do Matopiba, executou-se o modelo AquaCrop considerando as novas séries de dados meteorológicos, concentrações de CO_2 e tipo de solo, enquanto todos os parâmetros de manejo e cultura foram mantidos iguais aos utilizados na calibração do tratamento T7. As produtividades foram geradas para cada modelo, cenário e períodos futuros a médio (2045/2046 e 2055/2056) e a longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) dos municípios de

Campos Lindos - TO, Formosa do Rio Preto – BA, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Balsas – MA (Tabela 1). A semeadura considerada foi de 01 de novembro para todos os municípios e períodos, representando a época de plantio de grãos característica da região do Matopiba.

As simulações das projeções climáticas levaram em consideração a concentrações de CO₂ dos cenários RCP4.5 e RCP 8.5 obtidas no próprio AquaCrop, que tem a capacidade simular produtividade para altas temperaturas e concentrações de CO₂. A evapotranspiração diária para os cenários futuros foram obtidas através do método Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1974). Quanto ao solo para os cenários futuros, foi identificada nas regiões de estudo a predominância do solo Latossolo, segundo Embrapa (2006). Ao invés de usar a contagem de dias após o plantio (DAP), para identificar as fases de desenvolvimento da cultura no AquaCrop, como foi considerado na calibração e validação, para cenários futuros adotou-se o modo de acúmulo térmico (Graus Dias Acumulado - GDA), conforme recomendado por Steduto et al. (2012). Como o DAP é obtido através de observações de campo, para projeções se faz se uso do GDA, que contabiliza a temperatura necessária para a cultura atingir determinadas fases fenológicas a partir da semeadura (PORTER e GAWITH, 1999).

3.9. Pegada hídrica atual e futura para o Matopiba

A pegada hídrica futura da soja foi calculada conforme descrito no item 3.2 (O cálculo da pegada hídrica da soja), usando as projeções de precipitação, temperatura, evapotranspiração e produtividade geradas pelo MarkSim para os modelos HadGEM2-ES e MIROC5, cenários de RCP's 4.5 e 8.5, e os períodos futuros de médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) dos municípios de Balsas – MA, Campos Lindos - TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto – BA. A pegada hídrica do período atual (utilizado como referência) também foi construída de acordo com o item 3.2, para cada um dos quatro municípios, utilizando dados de: precipitação, gerada pelo MarkSimGCM; evapotranspiração da cultura estimada através da ET_o e o KC; e as produtividades das safras dos anos de 2014 e 2015, disponíveis na ferramenta “Cidades” do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

3.10. Limitações e vantagens metodológicas

Os principais pressupostos deste estudo incluem que a área de produção de soja para os municípios analisados permanecerá a mesma no futuro. Além disso, outros parâmetros

climáticos, especificamente a velocidade do vento e a umidade foram assumidas que sejam as mesmas no futuro como em períodos históricos e sob os diferentes cenários. Também não foi levando em consideração o fator tecnologia disponível, a presença de pragas e doenças na cultura da soja, a utilização de material genético resistente, dentre outros. Nesse pressuposto, considerou-se que o padrão climático é o principal fator limitante do potencial da produtividade da cultura. Apesar das considerações mencionadas acima, enfatiza-se que este estudo é extremamente útil na identificação de tendências e padrões dos parâmetros climáticos, produtividade da cultura e pegada hídrica da soja, embora os números possam variar de acordo com as limitações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Calibração do modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop foi calibrado usando dados de clima, solo, cultura e manejo coletados na campanha experimental de 2016 para prever a produtividade de grãos para diferentes lâminas de irrigação. Na Tabela 5 é exibida a produtividade de grãos de soja observada e a simulada pelo modelo AquaCrop, e o erro de relativo para diferentes níveis de irrigação.

Tabela 5. Resultados da calibração e validação da produtividade para os diferentes tratamentos de irrigação

Tratamento	Produtividade (t ha ⁻¹)					
	Calibração		Pe	Validação		Pe
	Obs.	Sim.	(±%)	Obs.	Sim.	(±%)
T1 - 25% da ETc TC	1,26	1,12	-10,92	0,96	1,04	8,33
T2 -100% ETc FV 25% e ETc FR	1,86	1,86	0,25	1,56	1,63	4,42
T3 - 50% ETc TC	2,25	1,63	-27,50	1,88	1,86	-0,90
T4 - 100% ETc FV e 50% ETc FR	1,85	1,86	0,36	2,44	2,40	-1,80
T5 - 25% ETc FV e 100% ETc FR	2,15	2,15	0,04	2,89	2,73	-5,71
T6 - 50% ETc FV e 100% ETc FR	2,43	2,42	-0,23	3,91	3,76	-3,86
T7 - 100% da ETc TC	3,46	3,45	-0,44	3,72	3,77	1,45

Obs = Observado; Sim. = Simulado; Pe = erro relativo

Fonte: Elaborada pela autora.

Verificou-se um bom ajuste entre a produtividade de grãos observada e a simulada pelo AquaCrop, com uma leve tendência de subestimação, para os tratamentos T1 e T3 com desvios negativos de 10,9% e 27,5%, respectivamente. Os rendimentos de grãos simulados variaram de 1,12 a 3,45 t ha⁻¹ enquanto a produtividade observada de 1,26 a 3,46 t ha⁻¹. Os erros de previsão de produtividade de grãos simulados, máximo e mínimo respectivamente, foram observados para os tratamentos T3 e T5 no valor de -27,5% e 0,03%. Nota-se que o modelo AquaCrop apresentou melhor ajuste para o tratamento T5, que recebeu 25% de irrigação na fase vegetativa e 100% de irrigação na fase reprodutiva. Já o pior ajuste foi verificado para o tratamento T3, que recebeu 50% de irrigação durante todo o ciclo. Os resultados simulados foram menos precisos para os tratamentos que sofreram déficit hídrico

durante todo o ciclo de cultivo, quando comparado os resultados obtidos para aqueles tratamentos que sofreram estresse hídrico apenas em uma fase de desenvolvimento da cultura.

As estatísticas de erro de previsão da calibração do modelo AquaCrop para todos os tratamentos de irrigação ao longo do ciclo de cultivo da soja são apresentadas na Tabela 6. Analisando o desempenho do modelo para estimativa da produtividade, observa-se que o modelo apresentou ótima precisão ($R^2 = 0,90$; $d = 0,98$) com a produtividade observada em experimento de campo. O valor de R^2 indica que o modelo explicou 90% da relação entre a produtividade observada e a simulada e o índice d próximo de 1 indica que o AquaCrop conseguiu simular a produtividade da cultura de soja com alto grau de confiabilidade. Valores semelhantes a esses foram encontrados por Araya et al. (2010) com $R^2 = 0,80$; Stricevic et al. (2011) com $R^2 = 0,84$, Karunaratne et al. (2011) com $R^2 = 0,72$; Abedinpour et al. (2012) $R^2 = 99$. Os valores dos erros $RMSE = 0,24 \text{ t ha}^{-1}$ e $EMA = 0,11 \text{ t ha}^{-1}$, que representa respectivamente 11% e 5% da produtividade média observada, indicam que o modelo não apresenta grande variabilidade e nem tendência expressiva. Em geral os resultados são bem coerentes, a diferença entre a produtividade estimada pelo modelo e a observada foi de apenas $0,11 \text{ t ha}^{-1}$, indicando que o modelo subestimou o rendimento de grãos em apenas 5%. Valores mais baixos do $RMSE$ e $NSE = 0,85$, para simulações do AquaCrop indicam o bom desempenho deste modelo. Abrha et al. (2012) encontraram valores de NSE variando entre 0,72 e 0,81 ao usar o AquaCrop para simular o rendimento da cevada. Abi Saab et al. (2015), ao comparar a eficiência do AquaCrop com o CropSyst, encontrou $NSE = 0,84$ para o AquaCrop.

Tabela 6. Estatísticas do erro de previsão da calibração do modelo AquaCrop para todos os tratamentos de irrigação.

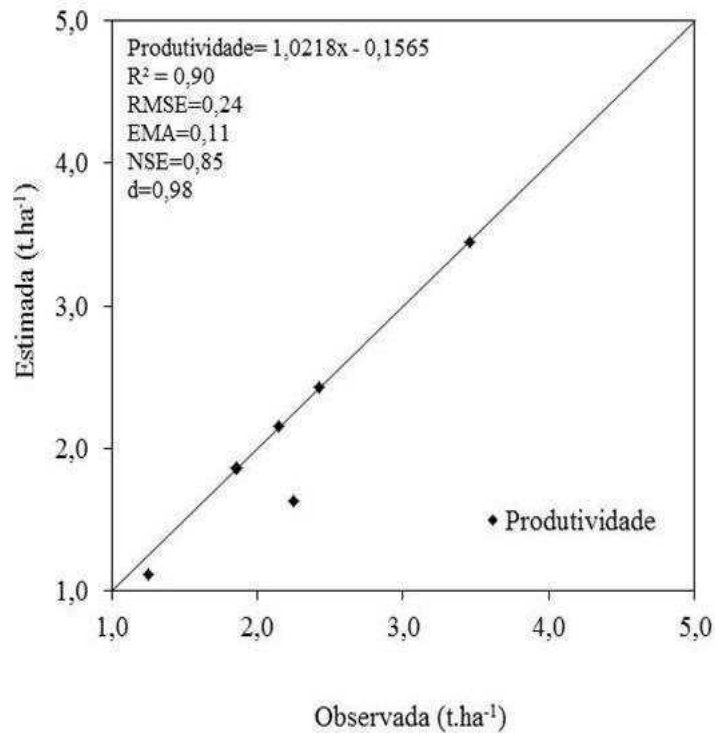
Parâmetro de saída do modelo	Média		R^2	RMSE (t ha^{-1})	EMA (t ha^{-1})	NSE	d
	Medido	Simulado					
Produtividade (t ha^{-1})	2,18	2,07	0,90	0,24	0,11	0,85	0,98

Fonte: Elaborada pela autora.

A relação entre as produtividades de soja estimadas pelo modelo para os diferentes tratamentos de irrigação e as produtividades observadas é apresentada na Figura 9. Na análise de todo o conjunto de dados observados e estimados, observa-se que o modelo AquaCrop apresentou um bom ajuste aos dados observados, com valores de R^2 , d e NSE próximos de

um, com a correspondência ideal 1:1 para os tratamentos T2, T4, T5, T6 e T7 e correspondência inferior para os tratamentos T1 e T3, indicando subestimação da produtividade simulada. Esses resultados reforçam o que já foi mencionado anteriormente, que o modelo apresenta melhor desempenho na simulação para condição sem déficit hídrico severo durante todo o ciclo de cultivo da soja, e é o mais preciso para os tratamentos de irrigação que não sofreram déficit hídrico em alguma fase de desenvolvimento da soja.

Figura 9. Resultados da calibração do modelo AquaCrop para a produtividade de grãos de soja TMG 1288 RR sob todos os tratamentos de irrigação.



Fonte: Elaborada pela autora.

O modelo subestimou a produtividade de grãos para T1 e T3, provavelmente devido à deficiência de água na fase reprodutiva em que há maior demanda de água pela planta. Heng et al. (2009) encontraram melhor performance para o modelo AquaCrop sob condições de estresse hídrico suave; já em condições de estresse hídrico severo a performance do modelo é menos satisfatória, especialmente quando o estresse ocorre durante o estágio reprodutivo. Stricevic et al. (2011), observaram que o AquaCrop subestimou a produtividade da beterraba quando as condições forma de extremamente seco. Zeleke et al. (2011) verificaram que o AquaCrop superestima o rendimento da canola cultivada sob condição de estresse hídrico,

indicando que as simulações do modelo são menos satisfatória na simulação sobre essas condições, especialmente quando o estresse ocorreu durante a senescência. Abedinpour et al.(2012) identificaram que o modelo AquaCrop prevê o rendimento de milho com maior precisão sob condição sem deficiência de água e nitrogênio. Xiangxiang et al. (2013), ao avaliarem a eficiência do modelo AquaCrop na estimativa da produtividade do trigo na China sob diferentes regimes de irrigação, também identificaram que o modelo apresenta melhores simulações de produtividade em condições úmida e menos precisa sob condições secas.

Assim, pode-se concluir que os resultados obtidos na avaliação estatística da calibração do AquaCrop está dentro das aplicações de soja relatadas, indicando assim que AquaCrop pode ser usado para previsões de rendimento quando adequadamente calibrado.

4.2. Validação do modelo AquaCrop

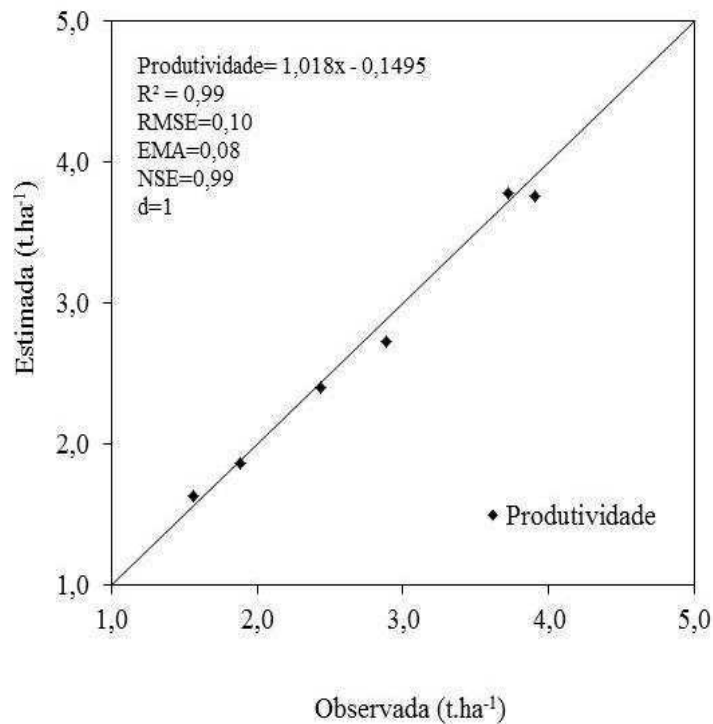
A validação do modelo AquaCrop foi realizada com os dados da campanha experimental de 2014, como explicado anteriormente. Observou-se que as produtividades de soja simuladas variaram de 1,04 t.ha⁻¹, para o tratamento T1 sob déficit hídrico severo, a 3,77 t ha⁻¹, tratamento T7 sem déficit hídrico. O erro de previsão variou entre mínimo de - 0,9% para o tratamento T3, que recebeu 50% da ET_c durante todo o ciclo, e máximo de 8,33% para o tratamento T1, que recebeu apenas 25% de ET_c durante todo o ciclo (Tabela 7). Os critérios de avaliação do modelo calculado entre as produtividades simuladas e as observadas para todas as lâminas de irrigação são exibidos na Tabela 7. A validação da produtividade para todos os tratamentos de irrigação resultaram em R² = 0,99, RMSE = 0,10, EMA = 0,08, NSE = 0,99 e d = 0,99. Os valores de R² e d e NSE são próximos de um e RMSE de 0,10, indicam significância da validação e que o modelo foi capaz de simular com precisão a produtividade de grãos da soja sob diferentes lâminas de irrigação (Figura 10). Resultados semelhantes a esses apresentados aqui neste trabalho foram encontrados em várias pesquisas que vêm sendo realizadas em diversas partes do globo, nos últimos anos com o modelo Aquacrop, como: Mabhaudhi et al.(2014) encontraram valores de R² = 0,98, d = 0,99 e RMSE = 1,26 t.h⁻¹. Bello e Walker (2017) obtiveram valores de R² = 0,91, d = 0,91 e RMSE = 1,96 t.ha⁻¹. Battistia et al. (2017) encontraram R² = 0,71 e d = 0,91. Silva et al. (2018) encontraram R² = 0,94 e d = 0,96 para a cultivar de soja MSOY 9144 RR e R² = 0,93 e d = 0,99 para a cultivar TMG 1288 RR. Esses autores também observaram que a maioria dos modelos ainda tem dificuldades, em estimular o rendimento da soja com precisão sob condições severas de déficit hídrico.

Tabela 7. Estatísticas do erro de previsão da validação do modelo AquaCrop para todos os tratamentos de irrigação.

Parâmetro de saída do modelo	Média		R ²	RMSE	EMA	NSE	d
	Medido	Simulado					
Produtividade (t ha ⁻¹)	2,18	2,45	0,99	0,10	0,08	0,99	0,99

A relação entre as produtividades estimadas e as observadas, com a correspondência ideal 1:1, é exibida na Figura 10. Nota-se que a produtividade se correlacionou bem, os valores simulados ficaram muito próximos dos observados para todos os tratamentos. O tratamento T1 apresentou superestimativa da produtividade simulada sobre a observada e os tratamentos T5 e T6 apresentarem leve subestimação, esses resultados confirmam com o que foi identificado no erro de previsão e reforçam o que já foi mencionado anteriormente, que o modelo apresenta melhor desempenho na simulação para condição sem déficit hídrico durante todo o ciclo de cultivo da soja ou em apenas uma fase de desenvolvimento. García-Vila e Fereres (2012), ao avaliar o AquaCrop para quatro diferentes culturas no sudoeste da Espanha, identificaram que a produtividade é subestimada em até 11% para os tratamentos com irrigação deficitária. Resultados semelhantes foram observados por: Mabhaudhi et al. (2014) ao validar o modelo AquaCrop para a cultura de taro na África do Sul; Bello e Walker (2017) ao calibrar e validar o Modelo AquaCrop para a cultura do amaranto no Sul da África; Battistia et al. (2017), ao avaliaram e calibrarem vários modelos de simulação de cultura da soja, dentre eles o AquaCrop, na região sul do Brasil. Silva et al. (2018) ao calibrarem e validarem a produtividade da soja sob diferentes lâminas de irrigação na região de Matopiba através do modelo AquaCrop.

Figura 10. Resultados da validação do modelo AquaCrop para a produtividade de grãos de soja TMG 1288 RR sob todos os tratamentos de irrigação.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3. Projeções climáticas

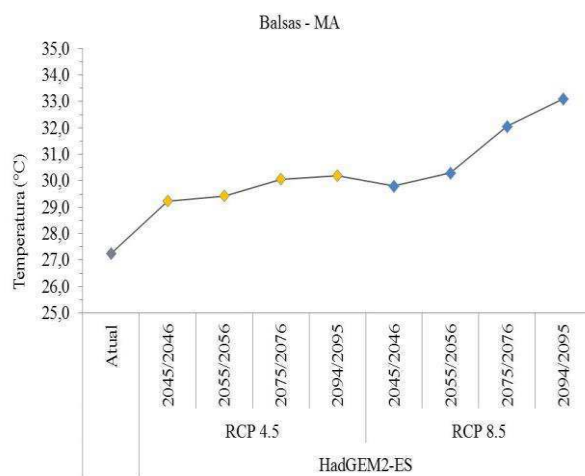
As projeções climáticas de temperatura, precipitação e evapotranspiração de referência para a estação de crescimento da soja gerada para cada modelo climático e cenários de RCPs na área de estudo são exibidas, respectivamente, nas Figuras 11 e 12, 13 e 14, 15 e 16 para os períodos de médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazos (2075/2076 e 2094/2095), em comparação com a condição atual.

A temperatura projetada para os modelos HadGEM2-ES (Figura 11) e MIROC5 (Figura 8) sofreu incremento em relação ao cenário atual, embora com taxas diferentes para cada RCP e localidade. O modelo HadGEM2-ES (Figura 11) sob a RCP 4.5 projetou incremento de temperatura para ambas as localidades, sendo que sob a RCP 4.5 o incremento foi menos acentuado, variou entre de 1,2°C e 2,9°C, já sob a RCP 8.5 o incremento foi mais proeminente, de 1,7°C a 5,79°C. Nota-se que em Formosa Rio do Preto – BA (Figura 11d), por exemplo, que apresenta a menor temperatura atual (25,6 °C), as projeções para 2094/2095 geradas pelo HadGEM2-ES, são de 28,5 °C sob RCP 4.5, um incremento de 2,87°C, e 31,4 °C sob a RCP 8.5, aumento de aproximadamente 5°C. Balsas – BA (Figura 11a), dentre as

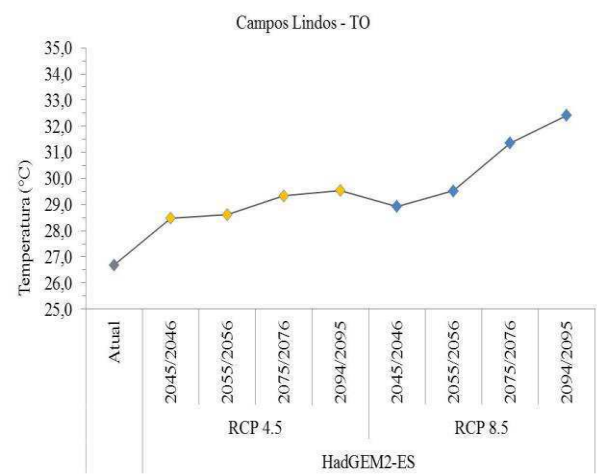
localidades consideradas neste estudo, é a que apresenta a maior temperatura atual (27,25 °C), com projeções para 2094/2095, gerada pelo modelo HadGEM2-ES sob a RCP 4.5, de incremento de 2,95°C, com temperatura passando a medir 30,2 °C. Já sob a RCP 8.5, esse modelo projeta incremento mais acentuado de 5,8°C, com temperatura passando para 33,10 °C. Em Campos Lindos – TO (Figura 11b), as projeções para até o final desse século, geradas pelo HadGEM2-ES são de incremento de até 2,8°C, sob a RCP 4.5 e de até 5,8°C sob a RCP 8.5. No caso de Baixa Grande do Ribeiro – PI (Figura 11c), as projeções sob a RCP 4.5 são de incremento de 2,2 °C e de até 5°C sob a RCP 8.5.

Figura 11. Temperatura média durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelo modelos HadGEM2-ES para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos – TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c), e Formosa do Rio Preto –BA (d).

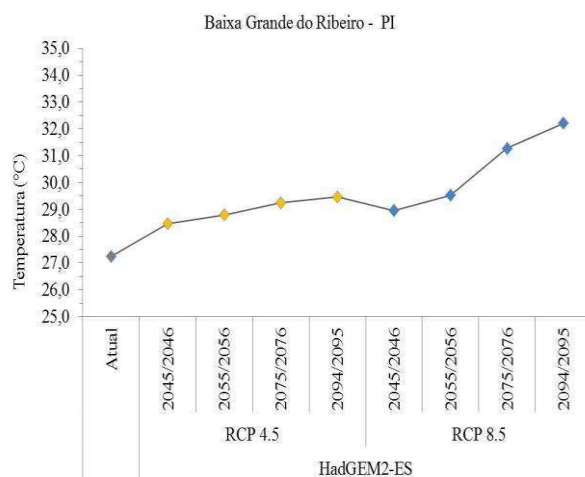
a)



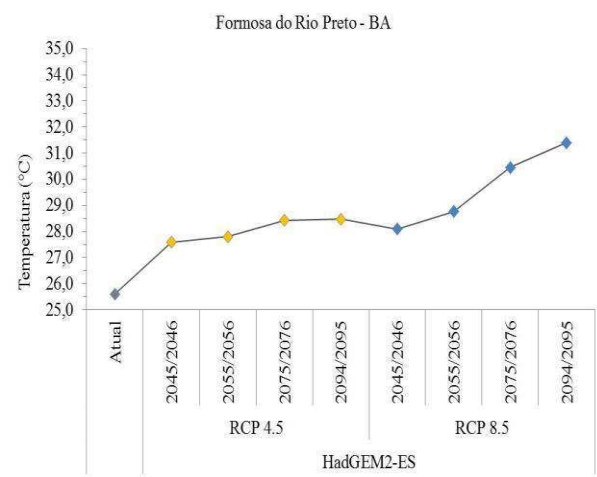
b)



c)



d)



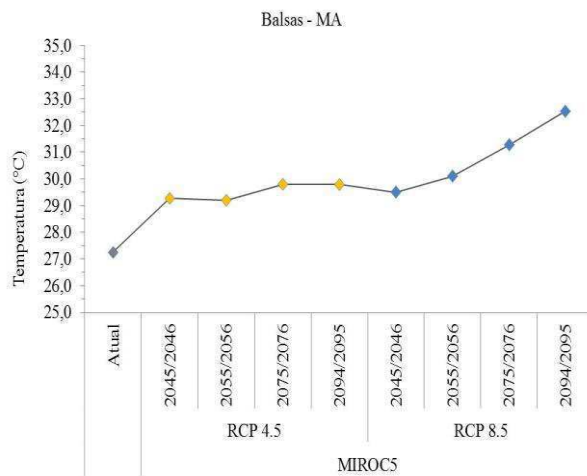
Fonte: Elaborada pela autora.

O modelo MIROC5 (Figura 12) sob a RCP 4.5 projetou incremento menos acentuado de 1,12 °C a 2,91°C, enquanto que sob a RCP 8.5 o incremento foi mais acentuado entre 1,6°C e 6,1°C. Em média, durante a estação de crescimento (de 01 de novembro a 10 de março) a temperatura aumentará em todos os cenários. As projeções do modelo MIROC5 para Formosa Rio do Preto – BA (Figura 12d) sob a RCP 4.5, são de incremento de temperatura de 2,9 °C, passando de 25,6 °C (atual) para 31,7 °C em 2094/2095, e para a RCP 8.5 o incremento é de 6,1 °C espera-se temperatura de 31,67°C até o final do século. Para Balsas – MA (Figura 12a), o MIROC5 projeta condições muito parecida, espera-se que para 2094/2095 a temperatura de 29,8 °C sob a RCP 4.5, incremento de 2,54 °C, e de 32,54 °C sob a RCP 8.5, incremento de 5,29 °C. As projeções de temperatura para Campos Lindos – TO (Figura 12b) e Baixa Grande do Ribeiro – PI (Figura 12c) para 2094/2095, são equivalentes as observadas nas localidades citadas anteriormente, de respectivamente, 2,4 e 2,54 °C sob a RCP 4.5 e de 5,15 e 5,29°C sob a RCP 8.5.

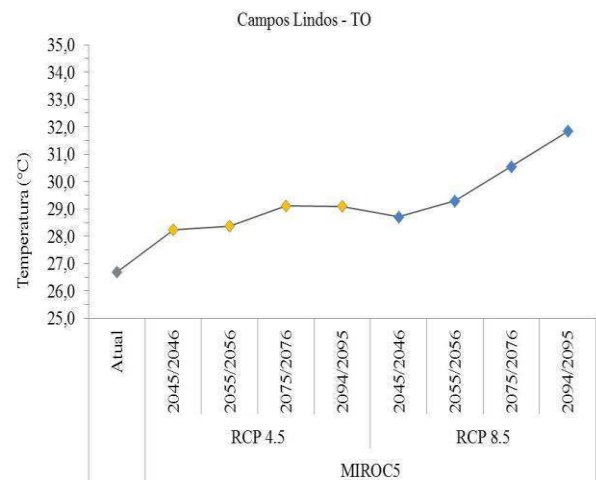
Nota-se comportamento ordinário de temperatura em todas as localidades analisadas nesse estudo, de incremento mais acentuado ao longo do tempo, para as projeções geradas pelo modelo MIROC5 e sob cenário de RCP 8.5.

Figura 12. Temperatura média durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelos modelos MIROC5 para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).

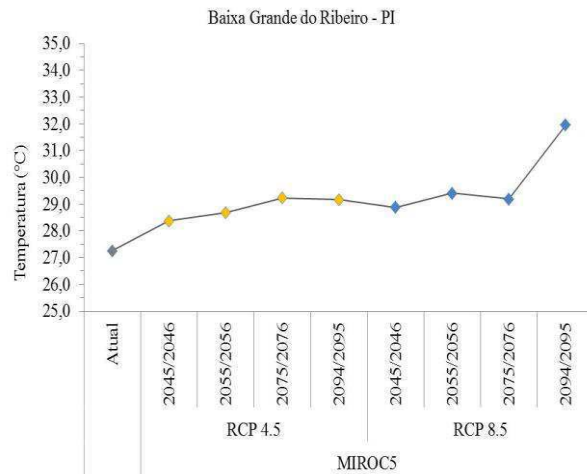
a)



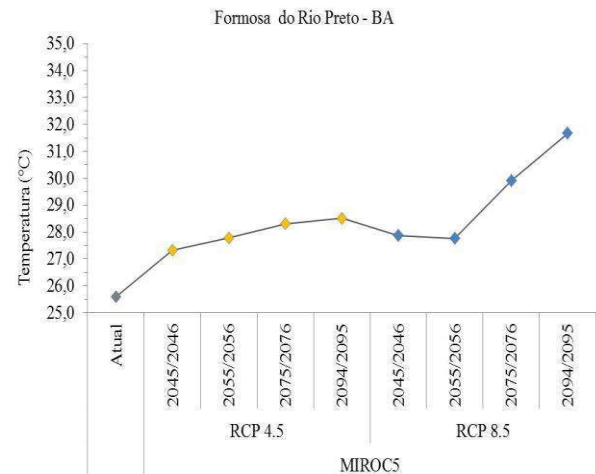
b)



c)



d)

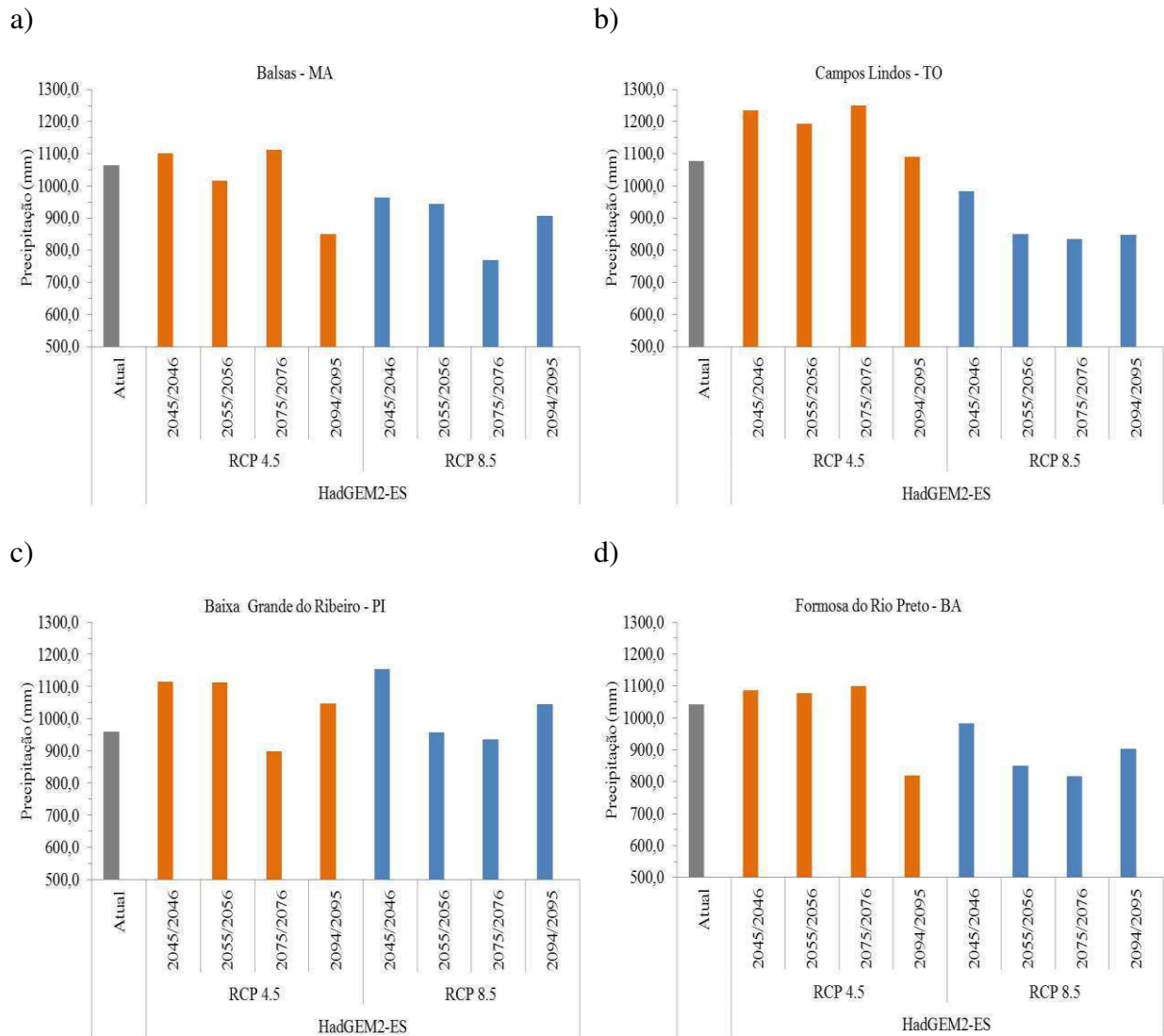


Fonte: Elaborada pela autora.

Nas Figuras 13 e 14 são exibidas respectivamente, as projeções dos totais de precipitação para os ciclos de crescimento da cultura da soja geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, sob os cenários de RCP 4.5 e 8.5, sob as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos - TO, Baixa G. do Ribeiro – PI, e Formosa Rio Preto – BA

O modelo HadGEM2 –ES, sob a RCP 4.5, projetou incremento de precipitação para Campos Lindos – TO (Figura 13b), de quase 200 mm de precipitação a médio e longo prazo. Para Formosa do Rio - Preto - BA (Figura 13d) e Balsas (Figura 13a), o modelo gerou redução de aproximadamente 250 mm na precipitação a longo prazo. Em Baixa do Grande do Ribeiro – PI (Figura 13c) a projeção foi de incremento de precipitação de aproximadamente 150 mm a médio prazo. Nota- sob o cenário de RCP 8.5 o modelo HadGEM2-ES produziu redução, em comparação a condição atual, de até 200 mm na precipitação a longo e médio prazo e em grande parte das localidades estudadas, com exceção da Baixa Grande do Ribeiro - PI que apresentou incremento de quase 200 mm de precipitação em 2045/2046 seguida por decréscimo, menor que 25 mm, em 2055/2056 e novamente aumento menor que 100 mm em 2094/2095.

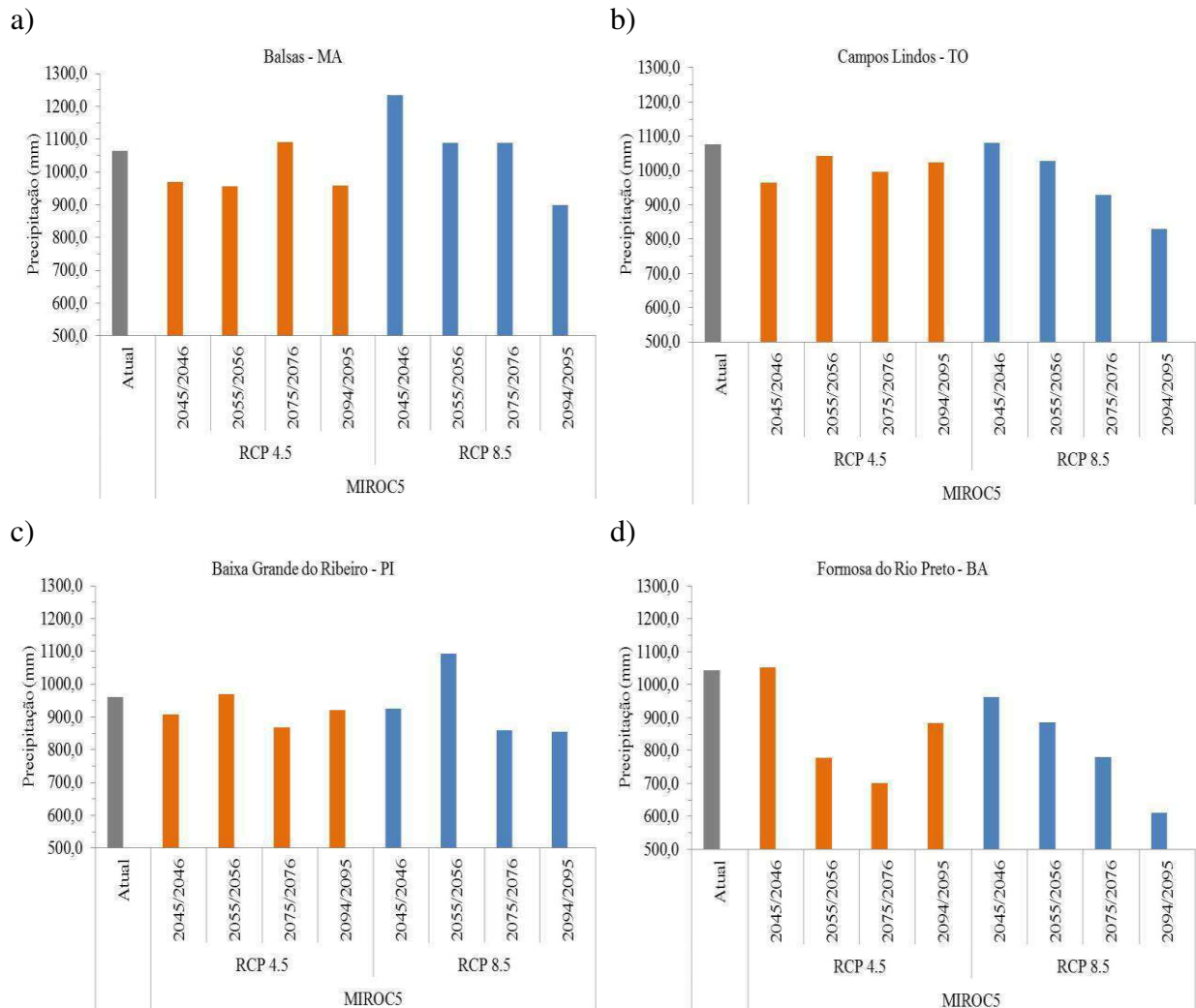
Figura 13. Precipitação acumulada durante o ciclo de crescimento da soja, entre 1 de novembro e 10 de março, projetados pelo modelo HadGEM2-ES para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).



Fonte: Elaborada pela autora.

O modelo MIROC5 sob a RCP 4.5 projeta redução de aproximadamente 100 mm de precipitação, a médio e longo prazo para Balsas – MA (Figura 14a), Campos Lindos – TO (Figura 14b), e Baixa do Grande Ribeira (Figura 10c). Para Formosa do Rio Preto – BA (Figura 14d) as projeções geradas por esse modelo são de aumento insignificante, menor que 10 mm, de precipitação em 2045/2046 seguida de decréscimo de quase 350 mm, a longo prazo. Sob a RCP 8.5 as projeções do MIROC5 são de decréscimo de até 430 mm, na precipitação de Formosa do Rio Preto, Campos Lindos e Baixa do Grande Ribeiro. Por outro lado, para Balsas as projeções são de incremento de até 170 mm em 2045/2046 seguido por aumento de apenas 25 mm em 2055/2056 e 2075/2076, e decréscimo de 165 mm em 2094/2095. Nota-se que os decréscimos mais acentuados de precipitação foram projetados para Baixa Grande do Ribeira – PI e Formosa do Rio Preto – BA e sob ambas as RCP.

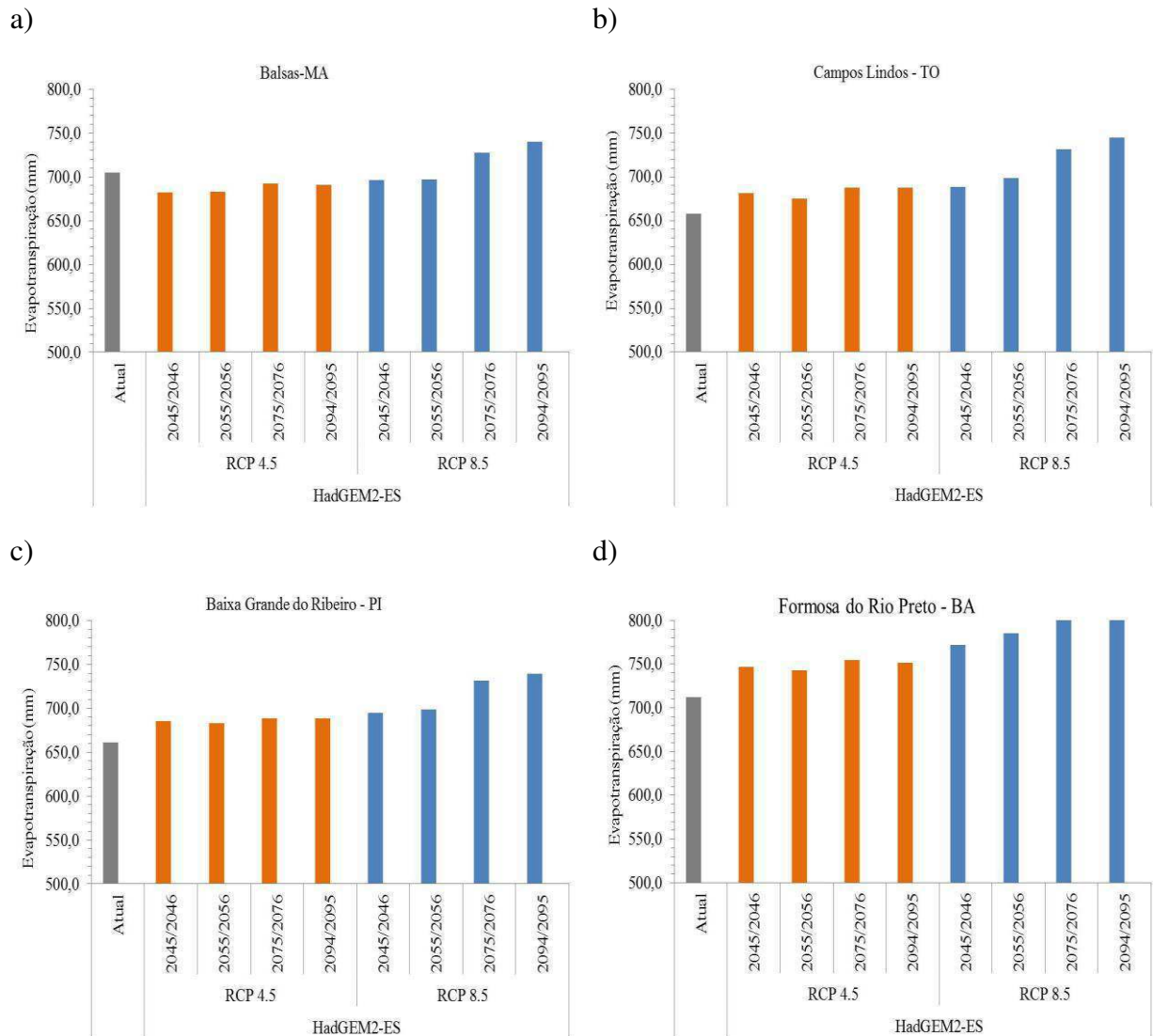
Figura 14. Precipitação acumulada durante o ciclo de crescimento da soja, entre 1 de novembro e 10 de março, projetados pelo modelo MIROC para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).



Fonte: Elaborada pela autora.

A evapotranspiração ao longo dos três períodos, dois cenários climáticos e quatro localidades estudadas são apresentadas nas Figuras 15 e 16. O modelo HadGEM2-ES, sob a RCP 4.5, projetou incremento na evapotranspiração $< 50,0$ mm para nas localidades de Campos Lindos – TO (Figura 15b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (Figura 15c) e Formosa do Rio Preto – BA (Figura 15d), em Balsas - MA (Figura 15a) as projeções são de decréscimo na evapotranspiração < 30 mm. Sob a RCP 8.5 o HadGEM2-ES também projetou incremento de evapotranspiração ao longo do tempo, porém com valores mais acentuados (30 e 100 mm) para quase todas as localidades, a exceção de Balsas – MA, que assim como sob a RCP 4.5, apresentou decréscimo insignificante (< 10 mm) a médio prazo e incremento menor que 35 mm a longo prazo. Nota-se que a evapotranspiração acumulada durante o ciclo de cultivo da soja na maioria das localidades, sob a RCP 4.5 não ultrapassou os 700 mm e sob a RCP 8.5 os 750 mm para os períodos de médio e longo prazo, porém em Formosa do Rio Preto – BA as projeções de evapotranspiração acumulada sob a RCP 4.5 ficam próximo de 750 mm e sob a RCP 8.5 superiores a 800 mm.

Figura 15. Evapotranspiração durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelos modelos HadGEM2-ES para o cenário atual (cinza), e sob os cenários de RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).

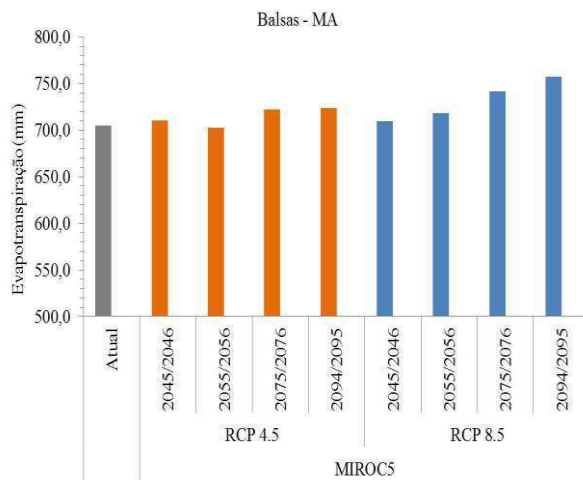


Fonte: Elaborada pela autora.

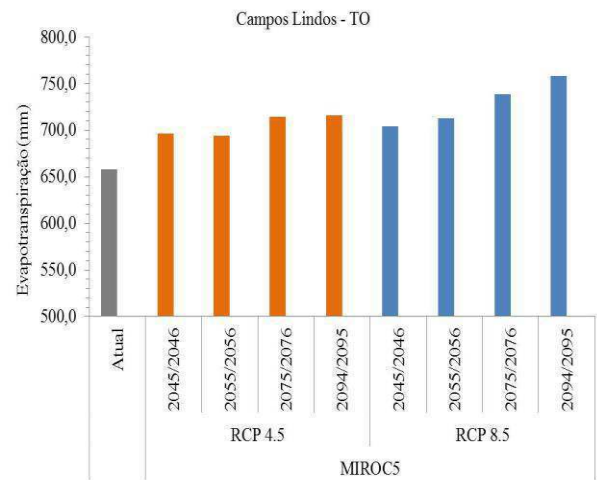
O modelo MIROC5 projetou incremento de evapotranspiração ao longo de todos os períodos futuro e sob todas as RCPs. Sendo que, os incrementos de evapotranspiração são mais acentuadas que as projeções do HadGEM2-ES, com valores variando entre 30,0 e 177,0 mm em Campos Lindos – TO (Figura 16b), Baixa Grande do Ribeiro (Figura 16c) e Formosa do Rio Preto – BA (Figura 16d). Assim, como observados no modelo HadGEM2-ES, Balsas – MA (Figura 16a) apresentou comportamento distintos das demais localidades, com incremento inferior a 50 mm. A evapotranspiração acumulada durante o ciclo de cultivo da soja, sob as RCPs 4.5 e 8.5 não ultrapassou os 750 mm e 800 mm, respectivamente, a médio e longo prazo em Balsas - MA, Campos Lindos – TO e Baixa Grande do Ribeiro – PI. Já em Formosa do Rio Preto – BA as projeções de evapotranspiração acumulada sob a RCP 4.5 com valores acima de 750 mm e sob a RCP 8.5 com valores superiores a 800 mm.

Figura 16. Evapotranspiração durante o ciclo de crescimento da soja, entre 01 de novembro e 10 de março, projetados pelos modelos MIROC5 para o cenário atual (cinza), e sob os cenários RCP 4.5 (laranja) e RCP 8.5 (azul), para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).

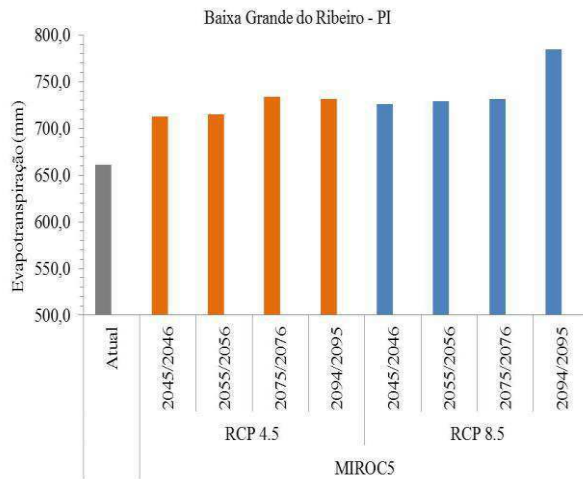
a)



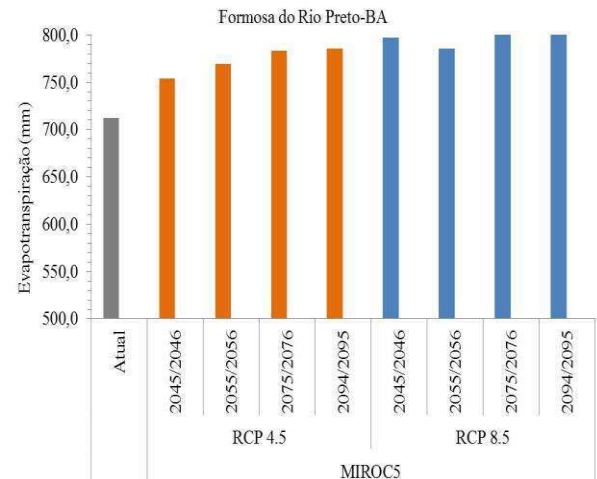
b)



c)



d)



Fonte: Elaborada pela autora.

De modo geral, as projeções geradas pelos dois modelos avaliados e sob a RCP 8.5, produziram comportamento mais acentuado nas variáveis meteorológicas, como: decréscimo precipitação, incremento de temperatura e evapotranspiração. Já sob a RCP 4.5, em ambos os modelos, as projeções apresentaram desempenho mais suave com aumento de precipitação a médio prazo, seguida por diminuição a longo prazo e aumento menos acentuado na temperatura e evapotranspiração ao longo de todo o período. As projeções dos acumulados de precipitação, combinada ao aumento de temperatura durante período o crescimento da cultura da soja e da evapotranspiração podem impactar positivamente o rendimento da soja. Além dos efeitos de precipitação e temperatura, o modelo AquaCrop também representa os efeitos do aumento das concentrações de CO₂. Visto que, a precipitação, temperatura e o CO₂, influenciam diretamente na produtividade de grãos da soja.

4.4. Produtividade da cultura de soja atual e projeções

Nas Tabelas 8 e 9 são exibidas a concentração de CO₂ e produtividade da soja para os dois períodos a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazos (2075/2076 e 2094/2095), comparados com o cenário atual, projetada pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob as RCP 4.5 e 8.5, respectivamente, na área de estudo.

Os cenários adotados nesse estudo forneceram diferentes concentrações de CO₂ para o clima futuro. Os valores de CO₂ sob a RCP 4.5 (Tabela 8) tiveram um incremento de aproximadamente 160 ppm, passando de 378,8 ppm no cenário atual para 536 ppm (até o final do século (2094/2095)). Por outro lado, sob a RCP 8.55 (Tabela 9) o incremento de CO₂ duplicou, passou de 378,8 ppm na condição atual para 885,0 ppm no período de 2094/2095.

Tabela 8. Concentração de CO₂ e produtividade da soja estimada pelos modelos climático HadGEM2 – ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidade de Balsas - MA, Campos Lindos - TO, Baixa Grande do Ribeiro - PI e Formosa do Rio Preto - BA.

Semeadura		Clima				
		Atual	Médio prazo		Longo prazo	
01/novembro			2045/2046	2055/2056	2075/76	2094/2095
CO ₂ (ppm)		378,8	475,0	500,0	530,0	536,0
Produtividade (t ha ⁻¹)	HadGEM2 - ES					
	Balsas – MA	3,04	3,69	3,77	3,85	3,86
	Campos Lindos – TO	2,86	3,64	3,77	3,82	3,84
	Baixa G. Ribeiro – PI	2,83	3,71	3,83	3,87	3,95
	Formosa do R. Preto – BA	2,58	3,47	3,61	3,91	3,92
	MIROC5					
	Balsas – MA	3,04	3,78	3,86	3,93	3,95
	Campos Lindos – TO	2,86	3,72	3,78	3,92	3,93
	Baixa G. Ribeiro – PI	2,83	3,72	3,92	3,99	4,02
	Formosa do R. Preto – BA	2,58	3,51	3,59	3,77	3,81

Fonte: Elaborada pela autora.

Nota-se que todas as projeções climáticas assumidas, resultados das simulações com o modelo AquaCrop Versão 5.0 a partir dos parâmetros da cultura do tratamento que apresentou melhor ajuste na calibração, indicaram incremento da produtividade de grãos da soja para o período entre 2046/2047 - 2094/2095 em comparação com a condição atual (Figura 18). Os incrementos previstos variaram de 0,57 a 1,88 t ha⁻¹ para o modelo HadGEM2-ES e de 0,64 a 1,98 t.ha⁻¹ para o MIROC5.

As projeções do HadGEM2-ES sob a RCP 4.5 mostram incremento da produtividade em comparação ao cenário atual, os acréscimos variaram de 0,57 a 1,07 t ha⁻¹ em Campos Lindos - TO e Formosa do R. Preto - BA, e de 1,03 a 1,67 t ha⁻¹ em Baixa Grande do Ribeiro - PI e Balsas - MA. O modelo MIROC5 projetou maior incremento de produtividade sob a RCP 4.5, quando comparada ao cenário atual e as projeções do modelo HadGEM2-ES, as produtividades aumentaram em até 0,96 t ha⁻¹ em Campos Lindos - TO e Formosa do Rio

Preto - BA, já em Baixa Grande do Ribeiro - PI e Balsas - MA o incremento de produtividade variou de 1,04 a 1,35 t ha⁻¹.

O HadGEM2-ES, sob a RCP 8.5, também projetou incremento de produtividade, porém mais acentuado, variando de 0,76 a 1,88 t ha⁻¹ em Campos Lindos - TO e Formosa do Rio Preto - BA, e de 1,07 a 1,87 t ha⁻¹ em Baixa G. do Ribeiro - PI e Balsas - MA. As projeções de incremento para o MIROC5, sob a RCP 8.5, variaram de 0,64 a 1,91 t ha⁻¹ em Campos Lindos - TO e Formosa do R. Preto - BA, e de 1,16 a 1,98 t ha⁻¹ em Baixa G. do Ribeiro - PI e Balsas - MA.

Tabela 9. Concentração de CO₂ e produtividade da soja estimada pelos modelos climáticos HadGEM2 - ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas - MA, Campos Lindos - TO, Baixa Grande do Ribeiro - PI e Formosa do Rio Preto - BA.

Semeadura		Clima					
		Atual	Médio prazo		Longo prazo		
01/novembro			2045/2046	2055/2056	2075/76	2094/2095	
CO ₂ (ppm)		378,8	516,0	575,0	720,0	885,0	
Produtividade (t ha ⁻¹)	HadGEM2 - ES						
	Balsas - MA		3,04	3,81	3,88	4,21	4,41
	Campos Lindos - TO		2,86	3,83	4,02	4,27	4,40
	Baixa G. Ribeiro - PI		2,83	3,90	3,94	4,32	4,53
	Formosa do R. Preto - BA		2,58	3,70	4,15	4,45	4,73
	MIROC5						
	Balsas - MA		3,04	3,90	4,01	4,29	4,47
	Campos Lindos - TO		2,86	3,83	3,92	3,71	4,41
	Baixa G. Ribeiro - PI		2,83	3,97	4,09	4,20	4,65
	Formosa do R. Preto - BA		2,58	3,66	3,81	4,48	4,76

Fonte: Elaborada pela autora.

Verificou-se pelas projeções que o modelo MIROC5 tem característica de ser mais chuvoso que o HadGEM2-ES, mesmo com o decréscimo da precipitação ao longo do ciclo de cultivo da soja nos dois modelos, o volume de precipitação ainda atende a necessidade hídrica da soja que varia de 450 a 850 mm. Sugere-se que essa condição pode ter contribuído para o

incremento mais acentuado na produtividade estimada por esses dois modelos, que em conjunto com o aumento de temperatura do ar e CO₂ na atmosfera favoreceram essa condição observada. Dessa forma, identifica-se que sob a influência de mudanças climáticas, algumas culturas podem beneficiar-se, positivamente, como é o caso da cultivar de soja TMG 1288 RR, que como observaram Nunes et al. (2016) e Silva et al. (2018), é resistente a seca. O volume de precipitação projetado para a estação de crescimento da soja identificou que as projeções de aumento da produtividade podem ser atribuídas aos efeitos combinados da mudança nas variáveis climáticas, bem como aos efeitos de CO₂. As plantas C3, como é o caso da soja, respondem de forma positiva aos efeitos diretos de fertilização de CO₂ (BOOTE et al., 2011). Castillo (2016), ao analisar os efeitos das mudanças da temperatura, precipitação e concentração atmosférica de CO₂ sobre a demanda de água e o rendimento de grãos da soja na bacia do rio Potiribu – RS verificou incremento da produtividade em comparação com a média histórica e atribuiu essa condição principalmente ao aumento da concentração atmosférica de CO₂.

As projeções dos modelos indicam pequena redução no total pluviométrico (variando 611 a 1250 mm, acima da necessidade da cultura da soja), ao longo do ciclo de cultivo da soja, que combinado ao incremento de temperatura e CO₂, pode ter contribuído positivamente para a produtividade. Segundo Doorenbos e Kassam (1979) para a obtenção de uma produtividade elevada, as necessidades hídricas da cultura da soja encontram-se entre 450 e 850 mm por ciclo, dependendo do clima, do manejo e da duração do período de crescimento da cultura. Vivan et al. (2010) citam que fatores como duração do ciclo da cultura (precoce, médio e tardio) e data de semeadura (outubro, novembro e dezembro) também podem influenciar significativamente nas necessidades hídricas da cultura e, conseqüentemente, em sua produtividade. Temperaturas mais elevadas, por sua vez, principalmente em ambientes com fotoperíodos quase constantes, como é o caso das localidades deste estudo, influenciam o tempo de florescimento. Pascale (1969) verificou que existe uma relação inversa entre a temperatura média e o número de dias necessários para a floração. A temperatura média do ar é um dos elementos meteorológicos mais importantes no desenvolvimento da cultura (BRUNINI et al., 1976). Segundo Farias et al. (2009) a soja tem melhor adaptação nas regiões onde as temperaturas oscilem entre 20 °C e 30 °C. Abreha et al. (2012), ao investigar o impacto de um clima hipotético e cenários de CO₂ na América do Sul, verificaram que o efeito combinado de duplicação de CO₂ e os aumentos de 2 °C na temperatura e 10 % na precipitação, aumentam a produção do milho, que assim como a soja, é uma planta C3.

4.5. Pegada hídrica da cultura de soja atual e projeções

Nas Figuras 17 e 18 são exibidas a produtividade e pegada hídrica da soja para os dois períodos a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazos (2075/2076 e 2094/2095), comparados com o cenário atual, projetada pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, respectivamente, sob as RCP 4.5 e 8.5 para as localidades de Balsas- MA, Campos Lindos – TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto - BA. Como já foi mencionado antes, os modelos HadGEM2-ES e MIROC5 projetaram incremento crescente de produtividade sob todas as RCPs ao longo dos períodos futuros.

A PH_{soja} atual para cada localidades é de 2.036,6 $m^3 t^{-1}$ em Balsas-MA; 2.158,88 $m^3 t^{-1}$ em Campos Lindos – TO; 2.187,72 $m^3 t^{-1}$ em Baixa Grande do Ribeiro – PI; e 2.584,12 $m^3 t^{-1}$ em Formosa do Rio Preto – BA. Os valores de PH_{soja} atual obtidos para essas localidades do Matopiba são similares aos encontrados na literatura, como por exemplo Hoekstra e Chapagain (2008) e Mekonnen e Hoekstra (2011), ao analisar a média global da PH_{soja} encontram valores de 1.958 $m^3 t^{-1}$ e 2.145 $m^3 t^{-1}$, respectivamente. Mekonnen e Hoekstra (2011) encontraram para o Brasil uma PH_{soja} de 2.202,0 $m^3 t^{-1}$. Arena et al. (2011) encontraram PH_{soja} de 2.440,7 $m^3 t^{-1}$ para cultivos não irrigados e 2.572,2 $m^3 t^{-1}$ para cultura irrigada, na Argentina. Ercin et al. (2012) encontraram para cultivo não irrigado de soja PH_{soja} de 2.651,0 $m^3 t^{-1}$ na França, e de 3.172 $m^3 t^{-1}$ no Canadá. Kotsuka (2013) encontrou PH_{soja} de 2.209,4 $m^3 t^{-1}$ para Maringa – PR, para essa mesma região Bleninger e Kotsuka (2015) encontraram PH_{soja} de 2.210 $m^3 t^{-1}$. Costa et al. (2016) encontrou para a Paragominas PH_{soja} de 1.306 $m^3 ton^{-1}$.

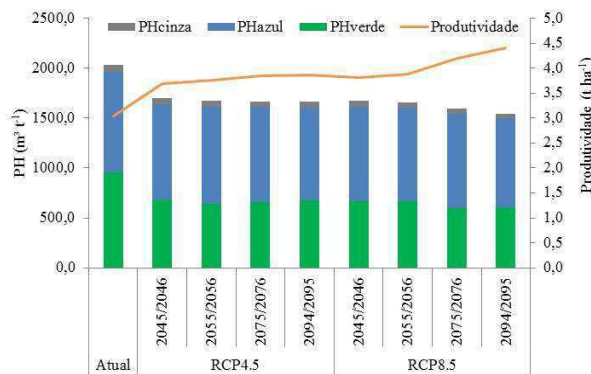
As projeções futuras da PH_{verde} , geradas através do modelo HadGEM2-ES, são decrescentes ao longo do tempo, variando em intensidade para cada RCP e localidade. A PH_{verde} atual de Balsas (Figura 17a) de 955,7 $m^3 t^{-1}$, é a menor dentre as localidades estudadas, com projeções para até o final deste século de 660 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 630 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5. Campos Lindos – TO (Figura 17b) tem PH_{verde} atual de 1.114,8 $m^3 t^{-1}$, com projeções de 685,5 $m^3 t^{-1}$ de sob a RCP 4.5 e de 650 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5. Baixa Grande do Ribeiro – PI (Figura 17c) apresenta uma PH_{verde} de 1.066,2 $m^3 t^{-1}$ com projeções de aproximadamente 690 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 650 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5. Formosa do Rio Preto – BA (Figura 17d) tem a maior PH_{verde} atual de 1.133,4 $m^3 t^{-1}$, com projeções de aproximadamente 950 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 680 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5.

As PH_{azul} , projetadas através do modelo HadGEM2-ES, são decrescente para Balsas – MA, Baixa Grande do Ribeiro - PI e Formosa do Rio Preto – BA ao longo dos dois períodos

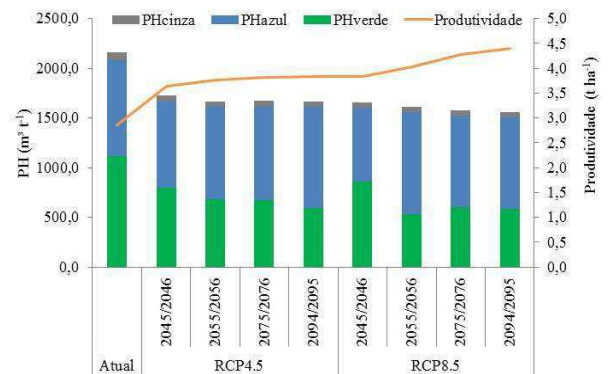
estudados, variando em intensidade para cada RCP e localidade. Apenas Campos Lindos – TO apresenta comportamento distinto das demais localidades, com PH_{azul} crescente para as duas RCPs. A PH_{azul} atual de Balsas é de $1.008,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, com projeções para até o final deste século de aproximadamente $955 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $930 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5. Campos Lindos – TO, dentre as localidades estudadas, tem a menor PH_{azul} atual de $967,13 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, com projeções de em torno de $940 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de sob a RCP 4.5 e de $650 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5. Baixa Grande do Ribeiro – PI apresenta uma PH_{azul} de $1.043,7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ com projeções de $910 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $920 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5. Formosa do Rio Preto – BA é a que apresenta maior PH_{azul} atual de $1.365,47 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, com projeções de aproximadamente $900 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $1.005 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5.

Figura 17. Estimativa da PH verde, azul e cinza e a produtividade total para as cultivar de soja TMG 1288RR, projetada pelos modelos HadGEM2-ES para o cenário de RCP 4.5 e RCP 8.5, para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).

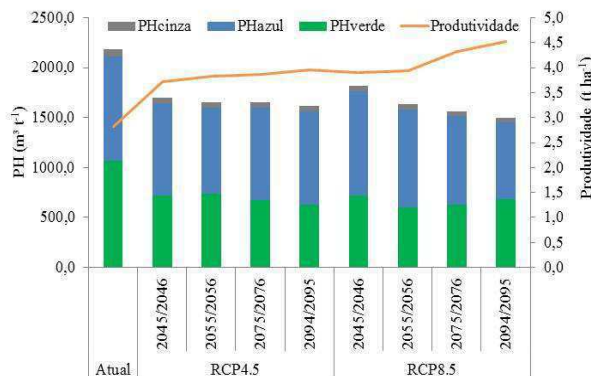
a)



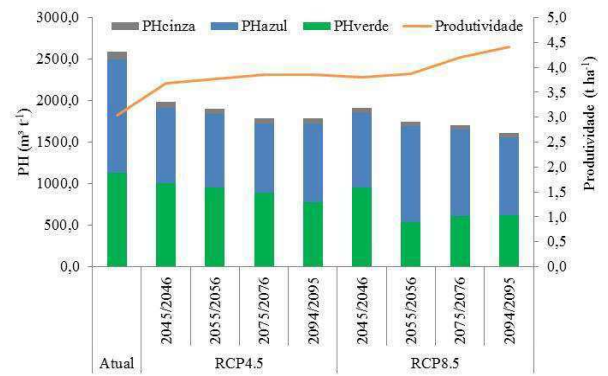
b)



c)



d)



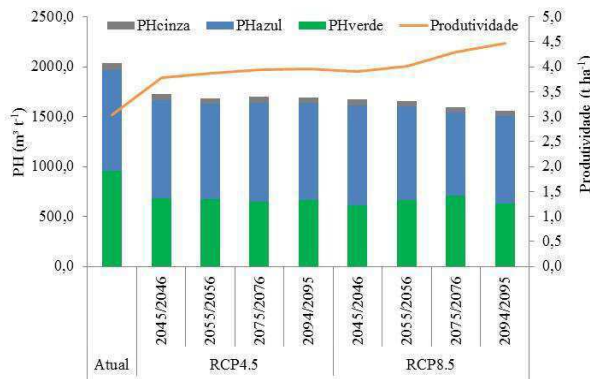
Fonte: Elaborada pela autora.

As PH_{verde} geradas através do modelo MIROC5 sob as RCP 4.5 e 8.5, para todas as localidades analisadas neste estudo, também apresentam comportamento decrescente da componente verde ao longo dos anos. A PH_{verde} de Balsas (Figura 18a) até o final deste século sob a RCP 4.5, sofrerá decréscimo de $294,6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, e sob a RCP 8.5 de $324,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Em Campos Lindos – TO (Figura 18b), o decréscimo na PH_{verde} sob a RCP 4.5 será de $472,3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ e sob a RCP 8.5 de $497,1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Na localidade de Baixa Grande do Ribeiro – PI (Figura 18c) a PH_{verde} decrescerá $492,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e $490,9$ sob a RCP 8.5. Formosa do Rio Preto (Figura 18d) apresenta valores próximos aos observados nas demais localidades, com redução de até $456,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $639,59$ sob a RCP 8.5.

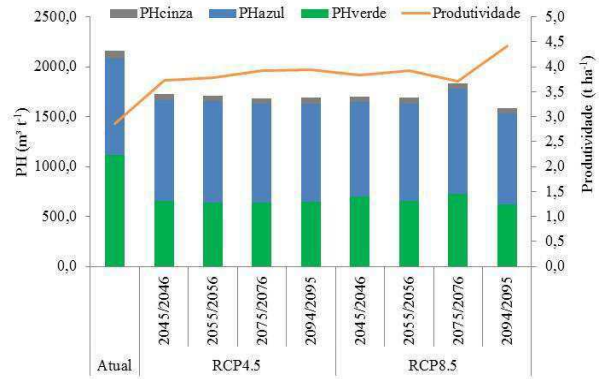
As PH_{azul} , projetadas através do modelo MIROC, são decrescente para Balsas – MA, Baixa Grande do Ribeiro - PI e Formosa do Rio Preto – BA ao longo dos dois períodos estudados, variando em intensidade para cada RCP e localidade. Assim como nas projeções do HadGEM2-ES, apenas Campos Lindos – TO apresenta comportamento distinto das demais localidades, com PH_{azul} crescente para o modelo MIROC5 e sob as duas RCPs. As projeções de PH_{azul} para Balsas são decrescentes, porém não muito acentuadas em ambas as RCP, com redução de apenas $31,17 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $133,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5. Em Campos Lindos – TO o aumento na PH_{azul} é de apenas $48,8 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $86,8 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ de sob a RCP 8.5. Baixa Grande do Ribeiro – PI, sofrerá decréscimo na PH_{verde} de $59,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $183,9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5. Formosa do Rio Preto também é de comportamento decrescente ao longo do tempo, com valores de $302,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de $212,5 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ sob a RCP 8.5.

Figura 18. Estimativa da PH azul, verde e cinza e a produtividade total para as cultivar de soja TMG 1288RR, projetada pelos modelos MIROC5 para o cenário de RCP 4.5 e RCP 8.5, para os três períodos: atual (utilizado como referência), médio prazo (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095) para as localidades de Balsas – MA (a), Campos Lindos- TO (b), Baixa Grande do Ribeiro – PI (c) e Formosa do Rio Preto –BA (d).

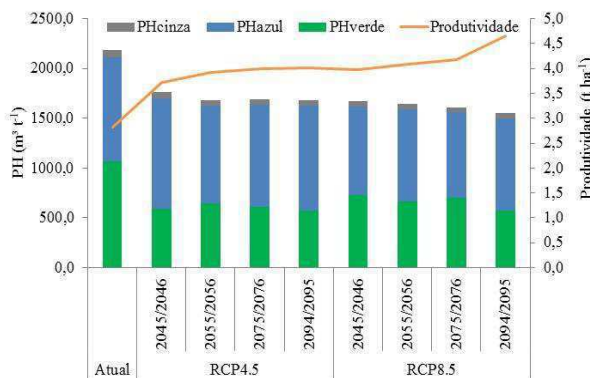
a)



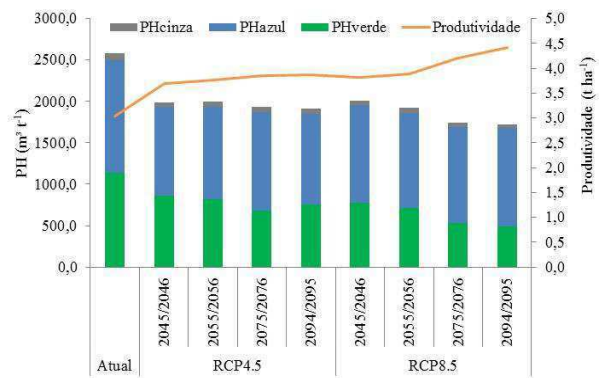
b)



c)



d)



Fonte: Elaborada pela autora.

A componente cinza da PH atual estimada a partir das projeções dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 apresentaram comportamento decrescente ao longo dos anos sob as duas RCP analisadas. Nota-se nas Figuras 17 e 18, que os valores de PH_{cinza} atual variam de 72,37 a 85,27 $m^3 ton^{-1}$ indicando a menor PH_{cinza} para a Balsas e a maior para Formosa do Rio Preto, respectivamente. As projeções geradas pelos dados do HadGEM2-ES indicam decréscimo da PH_{cinza} ao longo dos período, com valores variando de 56,99 a 59,62 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 e de 49,89 a 57,74 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 em Balsas- MA; de 57,29 a 60,44 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 de 50,0 a 57,44 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 em Campos Lindos - TO; de 55,70 a 59,30 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 48,57 a 56,41 sob a RCP 8.5 na Baixa Grande do Ribeira - PI; de 56,12 a 63,40 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 46,51 a 59,46 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 em Formosa do Rio Preto - BA. Os dados do MIROC5 projetaram PH_{cinza} , até o final deste século, variando de 55,70 a 58,20 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 49,22 a 56,41 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 em Balsas - MA; de 55,98 a 58,98 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 49,89 a 57,44 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 em Campos Lindos- TO; de 54,73 a 59,14 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 47,31 a 55,42 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 em Baixa Grande do Ribeira - PI; de 57,74 a 62,68 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 4.5 e de 46,22 a 60,11 $m^3 t^{-1}$ sob a RCP 8.5 em Formosa do Rio Preto – BA.

A contribuição atual da PH_{verde} e as projeções das contribuições geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 para Balsas – MA, Campos Lindos – TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto – BA, sob a RCP 4.5 e RCP 8.5 são exibidas nas Tabelas 10 e 11 respectivamente.

Tabela 10. Contribuição percentual da PH_{verde} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.

$PH_{\text{verde}}(\%)$	Período				
	Atual	Médio prazo		Longo prazo	
		2045/2046	2055/2056		2075/2076
HadGEM2 - ES					
Balsas – MA	46,9	40,0	38,1	39,3	40,8
Campos Lindos – TO	51,6	46,3	40,7	40,3	35,5
Baixa G. Ribeira – PI	48,7	42,2	44,8	40,7	38,8
Formosa do R. Preto – BA	43,9	50,6	50,1	50,2	43,3
MIROC5					
Balsas – MA	46,9	39,5	39,8	38,2	39,0
Campos Lindos – TO	51,6	37,8	37,4	38,1	38,1
Baixa G. Ribeira – PI	48,7	33,6	38,2	36,0	34,2
Formosa do R. Preto – BA	43,9	43,5	40,9	35,1	39,4

Fonte: Elaborada pela autora.

Nota-se que a contribuição atual da PH_{soja} de Balsas - MA está particionada em 47,0 % para a PH_{verde} , 49,5 % PH_{azul} e 3,6 % de PH_{cinza} . As projeções geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 para a componente verde são genéricas, com decréscimo de 9,0 % sob a RCP 4.5 e 10,0 % sob a RCP 8.5. Em Campos Lindos – TO a PH_{soja} atual está particionada em 51,6 % para a PH_{verde} , 44,8 % PH_{azul} e 3,5 % de PH_{cinza} . Quanto as projeções, o HadGEM2-ES projeta decréscimo na PH_{verde} de 16,0 % sob a RCP 4.5 e de 14,0 % sob a RCP 8.5 e o MIROC5 também projeta decréscimo na componente verde, de até 14,3 % sob a RCP 4.5 e 12,6 % de sob a RCP 8.5. Baixa Grande do Ribeiro – PI tem PH_{soja} atual particionada em 48,7 % para a PH_{verde} , 47,7 % PH_{azul} e 3,6 % de PH_{cinza} . As projeções geradas pelo modelo HadGEM2-ES são de redução em 10,0 % sob a RCP 4.5 e em até 12,0 % sob a RCP 8.5, o MIROC5 projetou reduções de até 15,0 % sob a RCP 4.5 e de 11,5 % sob a RCP 8.5. Formosa do Rio Preto – BA tem PH_{verde} decomposta em 44,0 % para a PH_{verde} , 53 % PH_{azul} e 3 % de PH_{cinza} , com projeções geradas pelo HadGEM2-ES de aumento em 6,3 % sob

a RCP 4.5 e redução em até 13,0 % sob a RCP 8.5. O MIROC5 projetou decréscimo de 5,1 % sob a RCP 4.5 e de 7,0 % sob a RCP 8.5.

Para todas as localidades a componente verde da PH_{soja} apresentou comportamento análogo, com decréscimo da contribuição percentual da PH_{verde} ao longo dos anos, redução de até 15% em comparação com a contribuição atual, sendo mais acentuado, entretanto, para o modelo MIROC5 e sob o cenário de RCP 8.5.

Tabela 11. Contribuição percentual da PH_{verde} da soja para cenário atual e projeções para os períodos a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.

$PH_{verde}(\%)$	Período				
	Atual	Médio prazo		Longo prazo	
		2045/2046	2055/2056	2075/2076	2094/2095
HadGEM2 - ES					
Balsas – MA	46,9	39,5	40,1	37,4	39,2
Campos Lindos – TO	51,6	52,1	33,2	38,3	37,8
Baixa G. Ribeira – PI	48,7	36,9	39,9	45,7	39,6
Formosa do R. Preto – BA	43,9	50,0	30,9	36,0	38,8
MIROC5					
Balsas – MA	46,9	36,8	40,2	44,7	40,6
Campos Lindos – TO	51,6	40,9	38,9	39,4	39,0
Baixa G. Ribeira – PI	48,7	40,2	43,4	37,2	43,5
Formosa do R. Preto – BA	43,9	38,4	36,9	30,3	28,7

Fonte: Elaborada pela autora.

O comportamento predominante da componente azul da PH_{soja} foi inverso ao observado na componente verde, para a PH_{soja} os modelos HadGEM2-ES e MIROC5 apresentaram incremento significativos ao longo dos anos e para ambas RCP 4.5 e 8.5 (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12. Contribuição percentual da PH_{azul} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.

$PH_{azul}(\%)$	Período				
	Atual	Médio prazo		Longo prazo	
		2045/2046	2055/2056	2075/2076	2094/2095
HadGEM2 - ES					
Balsas – MA	49,5	56,5	58,4	57,2	55,8
Campos Lindos – TO	44,8	50,2	43,1	56,3	61,1
Baixa G. Ribeira – PI	47,7	54,4	51,8	55,8	57,8
Formosa do R. Preto – BA	52,8	46,2	46,7	46,6	53,6
MIROC5					
Balsas – MA	49,5	57,1	56,8	58,5	57,7
Campos Lindos – TO	44,8	58,8	46,9	58,5	58,6
Baixa G. Ribeira – PI	47,7	63,0	58,5	60,7	62,6
Formosa do R. Preto – BA	52,8	53,4	56,0	61,9	57,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Balsas – MA apresenta projeção crescente ao longo dos anos em ambos os modelos e RCP's, com contribuições percentuais das projeções da PH_{azul} geradas através do HadGEM2-ES de 9% sob as RCP 4.5 e de 10% sob a RCP 8.5. O MIROC5 projetou para Balsas – MA incremento de 10 e 11% sob as RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. Em Campos Lindos – TO, as projeções das contribuições percentuais da PH_{azul} geradas pelo modelo HadGEM2-ES indicam incrementos de 16 e 18% para ambas as RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. As contribuições da PH_{azul} geradas pelo o modelo MIROC5 também são de incremento, de 14% sob a RCP 4.5 e de 13% sob a RCP 8.5. Em Baixa Grande do Ribeiro – PI as contribuições percentuais da PH_{azul} para o HadGEM2-ES sob as RCP 4.5 e RCP 8.5, é de incremento de 9,1 % e 16%, respectivamente. O MIROC5, também projeta incremento na contribuição percentual da PH_{azul} de 15,3% sob a RCP 4.5 e de 12,1 % sob a RCP 8.5. As contribuições percentuais da PH_{azul} em Formosa do Rio Preto – BA para o HadGEM2-ES indicam aumento de 14,0 % sob a RCP 4.5 e sob a RCP 8.5 a projeção é de incremento de até 13,1%. Através

do MIROC5 as contribuições percentuais foram de incremento na PH_{azul} de 9% sob a RCP 4.5 e de 16% sob a RCP 8.5.

Tabela 13. Contribuição percentual da PH_{azul} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.

$PH_{\text{azul}}(\%)$	Período				
	Atual	Médio prazo		Longo prazo	
		2045/2046	2055/2056		2075/2076
HadGEM2 - ES					
Balsas – MA	49,5	57,0	56,5	59,4	57,6
Campos Lindos – TO	44,8	44,5	63,5	58,5	59,0
Baixa G. Ribeira – PI	47,7	57,3	59,7	56,8	51,1
Formosa do R.Preto – BA	52,8	46,9	66,0	61,1	58,3
MIROC5					
Balsas – MA	49,5	59,8	56,5	52,1	56,3
Campos Lindos – TO	44,8	55,7	57,7	57,4	57,9
Baixa G. Ribeira – PI	47,7	53,2	56,5	53,4	59,8
Formosa do R. Preto – BA	52,8	58,6	60,1	66,8	68,6

Fonte: Elaborada pela autora.

A contribuição atual da PH_{cinza} e as projeções das contribuições geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 para Balsas – MA, Campos Lindos – TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto – BA, sob a RCP 4.5 e RCP 8.5 são exibidas nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. As contribuições percentuais da PH_{cinza} de todas as localidades foram praticamente constante ao longo dos períodos, com decréscimo insignificante ao longo do tempo para ambos os modelos e RCPs.

Tabela 14. Contribuição percentual da PH_{cinza} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 4.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.

$PH_{cinza}(\%)$	Período				
	Atual	Médio prazo		Longo prazo	
		2045/2046	2055/2056		2075/2076
HadGEM2 - ES					
Balsas – MA	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4
Campos Lindos – TO	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4
Baixa G. Ribeira – PI	3,6	3,5	3,5	3,4	3,4
Formosa do R.Preto – BA	3,3	3,2	3,2	3,2	3,1
MIROC5					
Balsas – MA	3,6	3,4	3,4	3,3	3,3
Campos Lindos – TO	3,5	3,4	3,4	3,3	3,3
Baixa G. Ribeira – PI	3,6	3,4	3,3	3,3	3,3
Formosa do R. Preto – BA	3,3	3,1	3,1	3,0	3,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 15. Contribuição percentual da PH_{cinza} da soja para cenário atual e projeções para o período a médio (2045/2046 e 2055/2056) e longo prazo (2075/2076 e 2094/2095), geradas pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 sob a RCP 8.5 para as localidades de Balsas – MA, Campos Lindos- TO, Baixa Grande do Ribeiro – PI e Formosa do Rio Preto –BA.

$PH_{cinza}(\%)$	Período				
	Atual	Médio prazo		Longo prazo	
		2045/2046	2055/2056		2075/2076
HadGEM2 - ES					
Balsas – MA	3,6	3,4	3,4	3,3	3,2
Campos Lindos – TO	3,6	3,4	3,3	3,2	3,5
Baixa G. Ribeira – PI	3,6	3,1	3,4	3,3	3,2
Formosa do R. Preto – BA	3,3	3,1	3,0	2,9	2,9
MIROC5					
Balsas – MA	3,6	3,4	3,3	3,2	3,2
Campos Lindos – TO	3,56	3,4	3,3	3,2	3,1
Baixa G. Ribeira – PI	3,6	3,3	3,3	3,3	3,1
Formosa do R. Preto – BA	3,3	3,0	3,0	2,8	2,7

Fonte: Elaborada pela autora.

Sumarizando, as projeções indicam redução da PH_{total} ao longo dos anos, com decréscimo mais acentuados sob a RCP 8.5 do que sob a RCP 4.5. Porém, quando se analisa separadamente as componentes da PH, verifica-se comportamento singular para cada umas dessas componentes.

As duas componentes principais no cálculo do PH, são a evapotranspiração da cultura e a produtividade. Como foi discutido anteriormente, os efeito das mudanças climáticas sobre essas duas componentes resultou em aumento não tão acentuado na evapotranspiração e sobre a produtividade, e diminuição da PH_{soja} para os períodos futuro. No entanto, pode ser observado a partir dos resultados que a componente azul da PH_{soja} aumentará significativamente no futuro, sendo as principais prováveis causas desse aumento nas projeções de PH_{azul} o aumento da temperatura e o declínio da precipitação ao longo dos anos.

Outra coisa que se identificou foi que a produtividade tem um papel significativo na diminuição do PH.

Verificou-se uma diminuição significativa na PH_{verde} , que pode ser atribuída ao aumento da temperatura e diminuição da precipitação durante o período de crescimento da cultura as soja, sugerindo a incapacidade da água verde em atender ao aumento demanda de evapotranspiração sob o efeito das mudanças climáticas. O incremento da proporção da PH_{azul} sobre a PH_{verde} para os cenários futuros pode indicar também que para se manter a sustentabilidade das culturas, essas exigirão mais água em comparação com a água disponível atualmente, de modo a manter um rendimento razoável. Consequentemente, será necessária uma grande quantidade água azul para atender a essa demanda. Assim, o aumento futuro projetado na PH_{azul} pode ser muito mais alto para a área de estudo.

Esses resultados também podem ser comparados com os obtidos por Sun et al. (2012), em estudo sobre a mudanças climáticas na China sob condição de irrigação, verificaram uma tendência de queda na evapotranspiração da cultura e o aumento exigência de água para irrigação devido a fatores climáticos. Além disso, identificou-se diminuição da evapotranspiração de cultura e o aumento do rendimento resultando em redução na PH total. Bocchiola et al. (2013), ao estudarem a PH do milho sobre condições mudança climáticas na Itália, encontraram resultados que evidenciam claramente que é provável que a demanda de água azul atinja seu pico no futuro. Esse estudo também indicou que o uso relativo da água tornou-se muito alto e a demanda de água para irrigação foi de até 230%. Os resultados também podem ser comparados com outro estudo de Bocchiola (2015), onde se verificou que o rendimento do arroz é afetado negativamente quando a temperatura aumenta, a PH_{azul} necessária para atender a demanda de evapotranspiração encontrado foi maior para a altas temperaturas e quando ao mesmo tempo a precipitação é baixa, são necessárias grandes quantidades de água azul para inundações durante a estação de cultivo. Shrestha et al. (2017), em estudo para quantificar a PH da produção de arroz na Tailândia sobre condições irrigadas e de sequeiro, verificaram que tanto a evapotranspiração da cultura quanto a produtividade aumentaram, e consequentemente, observou-se uma diminuição significativa da PH para os períodos futuros.

Devido ao aumento da temperatura e diminuição da precipitação durante o período de crescimento da cultura da soja, os resultados obtidos nessa pesquisa subentende-se que a componente verde será incapaz de atender ao aumento da demanda de evapotranspiração sob o efeito da mudança climática. Consequentemente, serão necessárias grandes quantidades de água azul para atender essa demanda. Como a soja é cultivada em condições de chuva, não se

deve descartar uma possível diminuição do rendimento da soja se for cultivadas sobre essas mesmas condições. Ressalta-se também que as projeções futuras especialmente na PH_{azul} podem ser muito mais elevada, pois a demanda por irrigação será mais acentuada. Portanto, considerando que a competição pelo uso da água azul é maior, este resultados reforçam a ideia de que o uso do valor da total da PH_{soja} não é recomendado, uma vez que, neste caso, fica claro que, apesar da diminuição da PH_{soja} , o aumento considerável da componente azul obviamente resulta em impactos mais significativos aos recursos hídricos.

A PH_{cinza} pouco influenciou na PH_{total} dos sistemas produtivos de grãos da região. Apesar do comportamento decrescente da PH_{cinza} futura, é provável que a componente cinza aumente ao longo dos cenários de mudanças climáticas, devido as simulações levarem em consideração apenas o volume de assimilação de fertilizantes nitrogenados, necessários para uma alta produtividade, deixando de lado os poluentes relevantes, como: fósforo e os pesticidas.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, foi possível concluir o seguinte:

- A calibração e validação do modelo AquaCrop, para a cultivar de soja TMG 1288 RR, apresentaram resultados satisfatórios, ilustrando a robustez e a aplicabilidade geral do modelo;
- O modelo AquaCrop subestima a produtividade de grãos de soja, para condições de estresse hídrico severo durante todo o ciclo de cultivo da soja TMG 1288 RR;
- O modelo AquaCrop estimou produtividade elevada de soja TMG 1288 RR, quando aplica-se irrigação com déficit apenas na fase vegetativa e sendo restabelecida a irrigação total da fase reprodutiva;
- Os resultados obtidos na validação indicam que o modelo AquaCrop pode ser usado para prever a produtividade de grãos de soja com uma precisão aceitável de confiabilidade em relação as mudanças climáticas na região do Matopiba;
- A produtividade de grãos de soja na região do Matopiba, projetadas pelo AquaCrop através dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 e sob os cenários de RCP 4.5 e 8.5, aumenta ao longo das quatro safras analisadas;
- O aumento da concentração de CO₂ e temperatura, projetada pelos modelos climáticos, contribuíram para o aumento da produtividade de soja até o final deste século;
- A PHsoja na região do Matopiba, obtida através das projeções de mudanças climáticas, sofre comportamento decrescente ao longo dos anos;
- A componente verde da PHsoja decresce ao longo dos anos na proporção que aumenta a componente azul, o que provavelmente demandará maior necessidade de irrigação no futuro;
- A componente cinza da PHsoja apresenta suave comportamento decrescente para a região do Matopiba, mas provavelmente a componente cinza aumentará sob cenários de mudanças climáticas, uma vez que neste estudo foi considerado apenas os fertilizantes nitrogenados e com valores praticamente constantes;
- Os resultados deste estudo podem ser usados para quantificar a produtividade futura da soja, a demanda de água e a sua utilização, bem como obter informações úteis para a gestão dos recursos hídricos na região de estudo.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abrha, B., Delbecque, N., Raes, D., Tsegay, A., Todorovic, M., Heng, L., Vanutrecht, E., Geerts, S., Garcia-Vila, M., Deckers, S. Sowing strategies for barley (*hordeum vulgare* L.) based on modelled yield response to water with aquacrop. *Exp. Agr.* v. 48, p. 252-271, 2012.
- Abedinpour, M.; Sarangi, A.; Rajput, T.B.S.; Singh, M.; Pathak, H.; Ahmad, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, v.110, p. 55-66. 2012.
- Abi Saaba, M.T. Todorovich, M. Albrizic, R. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agricultural Water Management*. v. 147, p. 21–33, 2015.
- Addiscot, T.; Smith, J.; Bradbury, N. Critical evaluation of models and their parameters. *J. Environ. Qual.* v. 24, p. 803–807. 1995.
- Agrostat – Estatística de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. Base de Dados do MAPA. [HTTP://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm](http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm). 29 de Jan de 2016.
- Alencar, L. P. de. Parametrização e validação do modelo aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar. 2014. 117 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Albuquerque, M. F. Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Brasil. Campina Grande: UFCG. 2013. Dissertação de Mestrado.
- Allen, R. G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, 300p. 1998.
- Anjos, F.A. Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Alagoas. 2011.
- Anuário Brasileiro da Soja 2015– Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2015. p. 124.
- Araya, A.; Habtub, S.; Hadguc, K.M.; Kebedea, A.; Dejened, T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agric. Water Manage.* 97, 1838–1846. 2010.
- Arena, A. P.; Piastrellini, R; Civit, B. Water Footprint of soybean production in Argentina. Life Cycle Management Conference, Berlim, Alemanha, 2011.

- Baumhardt, R. L.; Staggenborg, S. A.; Gowda, P. H.; Colaizzi, P. D.; Howell, T. A. Modelling irrigation management strategies to maximize cotton lint yield and water use efficiency. *Agronomy Journal*, p. 101, 460-468. 2009.
- Battistia, R.; Sentelhasa, P.C.; Boote K. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field Crops Research*. v. 200, p. 28–37, 2017.
- Bello, Z.A.; Walker, S. Evaluating AquaCrop model for simulating production of amaranthus (*Amaranthus cruentus*) a leafy vegetable, under irrigation and rainfed. *Agricultural and Forest Meteorology*.v. 247, p. 300–310, 2017.
- Bellouin, N.; Rae, J.; Jones, A.; Johnson, C.; Haywood, J.; Boucher, O. Aerosol forcing in the Climate Model Intercomparison Project (CMIP5) simulations by HadGEM2-ES and the role of ammonium nitrate. *Journal of Geophysical Research*. v. 116, d20206, 2011.
- Bitew, A.M. Strategies to adapt to climate change in the Central Rift Valley of Ethiopia: landscape impact assessment for on-farm adaptation. Thesis. Wageningen University. 2015.
- Bocchiola, D., 2015. Impact of potential climate change on crop yield and water footprint of rice in the Po valley of Italy. *Agric. Syst*. 139, 223–237.
- Bocchiola, D.; Nana, E.; Soncini, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, v. 116, p.50-61, 2013.
- Borges, C. J. R.; Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P.V.; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Silva, B. B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.393-399, 2008.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Projeções do Agronegócio: Brasil 2014/2015 a 2024/2025. Assessoria de Gestão Estratégica. Brasília, 2015. 133p.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Economia e emprego. Brasil lança plano agropecuário para a região do Matopiba. [HTTP://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/05/brasil-lanca-plano-agropecuário-para-região-do-Matopiba](http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/05/brasil-lanca-plano-agropecuário-para-região-do-Matopiba). 5 de Fev de 2016.
- Brunini, O.; Lisbão, R.S.; Bernardini, J.B.; Fornasier, J.B.; Pedro Junior, M.J. Temperaturas básicas para alface, cultivar White Boston, em sistemas de unidades térmicas. *Bragantia: Campinas*, v.19, n.35, p.213-219, 1976.

- Buainain, A. M.; Vieira, P. A. Seguro agrícola no Brasil: desafios e potencialidades. *Revista Brasileira de Risco e Seguro*, v. 7, n. 13, p. 36-98, 2011.
- Câmara, G. M. S. Fenologia da soja. *Informações Agronômicas*, n.82, 1998. p.1-6.
- Campos, J. H. B. C. Impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no Nordeste do Brasil usando modelagem hidrológica. Campina Grande: UFCG. 2010. Tese de Doutorado.
- Castillo, A. C. 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. Porto Alegre: UFRGS. 2016. Tese de Doutorado.
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A.Y. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water International*, v. 33, p. 19-32, 2008.
- Chistofidis, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, DF, ano 22, n. 1, p. 115-127, 2013.
- Collicchio, E. Zoneamento edafoclimático e ambiental para a cana-de-açúcar e as implicações das mudanças climáticas no estado do Tocantins. Piracicaba: ESALQ/USP. 2008. Tese de Doutorado.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília: Conab, 2014. Disponível em [HTTP://www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em 02 jun. 2015.
- CONAB. Levantamento de Safras. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>. Acesso em 02 jun. 2015.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2015/2016 – N.1, Primeiro Levantamento – Outubro/2015. Conab, 2015.
- Cunha, G.R.; Hass, J.C.; Dalmago, G.A.; Pasinato, A. 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, G. R. da; Bergamaschi, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: Bergamaschi, H. *Agrometeorologia aplicada à irrigação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p. 85-97.
- Doorenbos, J.; Kassam, A.H. Yield response to water. *Irrig. and Drainage Paper no. 33*. FAO, Rome. 1979. 235p.
- Dall’agnol, A.; Rosseing, A. C.; Lazzarotto, J. J.; Hirakuri, M. H.; Oliveira, A. B. de. O complexo agroindustrial da soja brasileira. *Circular Técnica*, Londrina, n. 3, p. 1-12, 2007.

- EMBRAPA. 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª Edição. 306 P. ISBN 85-85864-19-2.
- EMBRAPA SOJA, Tecnologias de Produção da soja no Paraná. Sistema de Produção 1. Londrina: Embrapa Soja. Disponível em: <http://www.cnpso.EmbrapaSoja.br/producaosojaPR/SojanoBrasil.htm>. Acesso em 05 de fevereiro de 2016.
- Empinotti, V. L.; Tadeu, N. D.; Martins, R. S. L. Análise crítica da Pegada Hídrica cinza na produção de celulose. *Ambiente e Água*, v. 8, n. 3, p. 166-177, dec. 2013.
- Ercin, A.E.; Hoekstra, A.Y.; Carbon and Water Footprints: Concepts, methodologies and policy responses. Unitec Nations World Water Assesment Programme, Side Publications Series n.4, UNESCO, Paris. 2012.
- Fader, M.; Gerten, D.; Thammer, M.; Lotze-Campen, H.; Lucht, W.; Cramer, W. Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations and related water and land savings through trade. *Hydrology and Earth System Science*, v. 15, p. 1641–1660, 2011.
- Fagundes, J. D.; Paula, G. M. de.; Lago, I.Â ; Streck, N. A.; Bisognin, D. A. Aquecimento global: efeitos no crescimento, no desenvolvimento e na produtividade de batata. *Ciência Rural*, v.40, p.1464-1472, 2010.
- FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. ETo Calculator. Manual (38p) e software Version 3.2. 2012.
- FAO. 2016. FAOSTAT. Base de dados. <HTTP://faostat3.fao.org/>. 30 de Jan de 2016.
- Farias, J. R. B.; Assad, E. D.; Almeida, I. R.; Evangelista, B. A.; Lazzarotto, C.; Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L. Caracterização do risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.
- Farias, J. R. B; Nepomuceno, A. L., Neumaier, N. *Ecofisiologia da soja*. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).
- Farias, J. R. B.; Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L. *Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola*. 1. ed. Brasília: INMET, 2009, p.261-277.
- Fehr, W.R. Caviness, C.E. Stage of soybean development. Iowa State University. Special report 80, March, 1977. p. 25-26p.
- Federizzi, Luiz Carlos. A soja como fator de competitividade no Mercosul: histórico, produção e perspectivas futuras. In. III Encontro CEPAN: Vantagens Competitivas dos Agronegócios no Mercosul, Porto Alegre, CD dos Anais, Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegocios – CEPAN/UFRGS, 2005.

- Fonseca, M. F.; Miranda, E. E. Matopiba: Caracterização do Quadro Agrário. Nota Técnica, Campinas, n. 6, p. 1-40, 2014.
- Falkenmark, M., and J. Rockström (2004), *Balancing Water for Humans and nature*, Earthscan Publications, London.
- Galli, A.; Wiedmann, T.; Ercin, E.; Knoblauch, D.; Ewing, B. Giljum, S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a “footprint family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet, *Ecological Indicators*, v. 16, p.100-112, 2011.
- Garcia-Vila, M., Fereres, E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron.* v. 36, p. 21–31, 2012.
- Geerts, S., D. Raes, M. Garcia Cardenas, O. Condori, J. Mamani, R. Miranda, J. Cusicanqui, C. Taboada, E. Yucra, and J. Vacher. 2008. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano? *Agric. Water Manage.*95:909–917.
- Habtemariam, L.T; Kassa, G.A; Gandorfer, M. Impact of climate change on farms in smallholder farming systems: Yield impacts, economic implications and distributional effects. *Agricultural Systems.* v. 152, p. 58-56, 2017.
- Hanks, J.R., 1983. Yield and water-use relationships: an overview. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA, pp. 393–411.
- Hartkamp, A.D.; White, J.W.; Hoogenboom, G. Comparison of three weather generators for crop modeling: a case study for subtropical environments. *Agricultural Systems*, Essex, v. 76, p. 539–560, 2003.
- Hargreaves, G. H.; Samani, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied. Engineering Agriculture*, v.1, n.2, p.96;99, 1985.
- Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., Steduto, P., 2009. Validating the FAOAquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agron. J.* 101,488–498.
- Hsiao, T. C.; Heng, L.; Steduto, P.; Rojas-Lara, B.; Raes, D.; Fereres, E. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, v. 101, p. 448–459. 2009.
- Hoekstra, A.Y., Hung, P.Q., 2002. Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series 11*, p. 166.

- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A. K. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, v.70, p 749-758, 2011.
- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. The water footprint assessment manual. 1.ed. London: Water Footprint Network, pp. 224, 2011.
- IBGE. 2002. Mapa de Clima do Brasil. Disponível em: <http://www.visualizador.inde.gov.br/>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (2014). Scenarios process for AR5: Representative concentration pathways (RCPs). Disponível em: <http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html>. Acesso e agosto de 2017.
- Jagtap, S. S., Jones, J. W. Adaptation and evaluation of CROPGRO-Soybean model to predict regional yield and crop production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.93, 73–85. 2002.
- Jones, P.G.; Thornton, P.K. Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems*, Amsterdam, v. 114, p. 1–5, 2013.
- Lamond, R. E.; Wesley, T. L. Adubação nitrogenada no momento certo para soja de alta produtividade. *Informações Agronômicas*, n. 95, p. 6-7, 2001.
- IBGE. Informações sobre os municípios brasileiros. <https://ibge.gov.br/cidadesat/xtras/fontes.php?lang=ES>. Acessando em junho de 2017.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.
- Iqbal, M.A.; Shen, Y.; Stricevic, R.; Pei, H.; Sun, H.; Amiri, E.; Penas, A.; del Rio, S. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the NorthChina Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, v.135, p. 61-72. 2014.
- Lamond, R.E.; Wesley, T.L. Adubação nitrogenada no momento certo para soja de alta produtividade. *Informações Agronômicas*, n. 95, p. 6-7, 2001.
- Landau, E. C.; Moura, L.; Guimarães, D. P.; Hirsch, A.; Pimenta, F. M. *Concentração geográfica de pivôs centrais no Brasil*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 37 p.

- Landau, E. C.; Guimarães, D. P.; Sousa, D. L. Caracterização Ambiental das Áreas com Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais na Região do Matopiba - Brasil. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 44 p.
- Karunaratne, A.S.; Azam-Ali, S.N.; Izzi, G.; Steduto, P. Calibration and validation of FAO-AquaCrop model for irrigated and water deficient Bambara groundnuts. *Exp. Agric.* v. 47, p. 509–527, 2011.
- Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A., and Rodriguez-Iturbe, I.: Water for food: The global virtual water trade network, *Water Resour. Res.*, 47, W05520, doi:10.1029/2010WR010307, 2011.
- Kotsuka, L. K. Avaliação dos conceitos de água virtual e pegada hídrica na gestão de recursos hídricos: Estudo de caso da soja e óleo de soja. Curitiba: UFPR. 2013. Dissertação de Mestrado.
- Mabhaudhia, T.; Modia, A.T.; Beletseb, Y.B. Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology*. 192–193, p. 132–139, 2014.
- Maciel, G. F. Impactos econômico-financeiros das variações climáticas sobre os cultivos de arroz e soja no estado do Tocantins. Campina Grande: UFCG. 2010. Tese de Doutorado.
- Machado Filho, Haroldo et al. (2016) : Climate change and impacts on family farming in the North and Northeast of Brazil, Working Paper, International Policy Centre for Inclusive Growth, No. 141.
- Magalhães, L. A.; Miranda, E. E. de. A. de. Matopiba: Quadro Natural. Nota Técnica, Campinas, n. 5, 1-41, 2014.
- Maracajá, K. F. B.; Silva, V. P. R.; Dantas Neto, J.; Araújo, L. E. Pegada hídrica como indicador de sustentabilidade ambiental. *REUNIR – Revista de administração, contabilidade e sustentabilidade*, v.2.2, p.113-125, 2012.
- Mekonnen, M.M. Hoekstra, A.Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, p. 1577-1600, 2011.
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. National Water Footprint Accounts: the green, blue and gray water footprint of production and consumption. Value of Water Research Report Series n. 50 Delft: UNESCO, 2011a. 94p.
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. Value of Water Research Report Series n. 48 Delft: UNESCO, 2010. 50p.

- Mingnoti, R.; Brasco, M. A.; Holler, W. A.; Lovis Filho, E.; Spadotto, C. A. Matopiba: Caracterização das áreas com grande produção de culturas anuais. Embrapa Gestão Territorial - Nota Técnica, n.6,1-40, 2014.
- Miranda, E. E. de.; Magalhães, L. A.; Carvalho, C. A. de. Proposta de Delimitação Territorial do Matopiba. Nota Técnica, Campinas, n. 1, 1-18, 2014a.
- Miranda, E. E. de.; Magalhães, L. A.; Carvalho, C. A. de. Um Sistema de Inteligência Territorial Estratégica Para o Matopiba. Nota Técnica, Campinas, n. 2, 1-26, 2014b.
- Muller, G.T. Emprego da pegada hídrica e da análise de ciclo de vida para a avaliação do uso da água na cadeia produtiva do biodiesel de soja. Porto Alegre. UFRS. 2012. Dissertação de Mestrado.
- Mundstock, C.; Thomas, A. L. Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Evangraf. 31p. 2005.
- Nain, A.; Kersebaum, K.. Calibration and Validation of CERES Model for Sim-ulating. Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil–Crop Systems., p.161–181. 2007.
- Nyakudya, I. W.; Stroosnijderb, L. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. Agricultural Water Management, v. 146, p. 280-296, 2014.
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. J. Hydrol. v. 10 (3), p. 282-290, 1970.
- Nunes, A. C.; Bezerra, F. M. L.; Silva, R. S.; Silva Júnior, J. L. C.; Gonçalves, F. B.; Santos, G. A. Agronomic aspects of soybean plants subjected to deficit irrigation. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 20, p. 654-659, 2016.
- Nogueira, A. M; Paço, T. A; Silvestre, J.C; Mota, M.; Gonzalez, L. F.; Santos, F.L.; Pereira, L. S. Pegada hídrica de um olival super-intensivo sob clima mediterrânico, utilizando medições de campo e detecção remota. VI Simpósio Nacional de Olivicultura. Mirandela. 2012.
- Oliveira, L.A. Manejo da irrigação no cultivo da cana-de-açúcar e milho sob cenários futuros: aplicação dos modelos DSSAT/CANEGRO e CERES-MAIZE. Piracicaba. USP. 2015. Dissertação de Mestrado.
- Parry, M.L.; Rosenzweig, A. I.; Livermore, M.; Fischer, G. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. Global Environmental Change, v. 14, n. 1, p. 53-67, 2004.

- Paredes, P.; Wei, Z.; Liu, Y.; Xu, D.; Xin, Y.; Zhang, B.; Pereira, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water, soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. *Agricultural Water Management*, v.152, p.57-71. 2015.
- Pascale, A. J. Tipos agroclimáticos para el cultivo de la soya en la Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía e Veterinaria, Buenos Aires*, v. 17, p. 31-38, 1969.
- PBMC, 2013: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil. 24 p.
- Porter, J., Semenov, M. Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360 (1463), 2021–2035. 2005.
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, v. 101, p. 438-447. 2009.
- Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T.; Fereres, E., 2012. Reference Manual AquaCrop (Version 4.0). AquaCrop (<http://www.fao.org/aquacrop/resources/traininghandbooks/en/>).
- Rebello, E. R.G.; Sales, N. D. Características Agroclimáticas de PALMAS (TO). In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo-SP. Anais... São Paulo, 2008. CD-ROM.
- Resop, J. P.; Fleiser, D. H.; Wang, Q.; Timlin, D. J.; Reddy, V. R. Combining explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-scale modeling units. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 89, p. 51-61. 2012.
- Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohrer, J., 2008. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research* 44, W09405, 17 pp.
- Sediyama, T.; Teixeira, R.C.; Reis, M.S. Melhoramento da soja. In: BORÉM, A. (ed). Melhoramento de espécies cultivadas. Viçosa: UFV, 1999. p.478-533.
- Shrestha, S.; Chapagain, R.; Babel, M.S. Quantifying the impact of climate change on crop yield and water footprint of rice in the Nam Oon Irrigation Project, Thailand. *Science of the Total Environment*. v. 599-600, 689-699, 2017.
- Seixas, V. S. C. Análise da pegada hídrica de um conjunto de produtos agrícolas. Lisboa: FCT. 2011. Dissertação de Mestrado.
- Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Azevedo, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. *Scientia Horticulturae*, v. 102, p. 467-472. 2009.

- Silva, V. P. R.; Silva, B. B.; Albuquerque, W. G.; Borges, C. J. R.; Sousa, I. F.; Dantas Neto, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 128, p. 102-109. 2013.
- Silva, V. P. R.; Albuquerque, M. F.; Araújo, L. E.; Campos, J. H. B. C.; Garcêz, S. L. A.; Almeida, R. S. R. Medições e Modelagem da pegada hídrica da cultivada cana-de-açúcar no Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente*, v.19, n.6, p.521-526. 2015.
- Silva, V. P. R.; Silva, R., A.; Maciel, G. F.; Braga, C. C.; Silva Júnior, J. L. C.; Souza, E. P.; Rodrigues, R. S.; Silva, M. T.; Holanda, R. M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. *Revista Ciência Rural*, v.48, n.1, e.20161118, 2018.
- Siqueira, O. J.; , Steinmetz, S.; Ferreira, M. F.; Costa, A. C.; Wozniak, M. A. 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.
- Silva, V.P.R.; Silva, R.S.; Maciel, G.F.; Braga, C.C.; Silva Júnior, J.L.C.; Souza, E.P.; Almeida, R.S.R.; Silva, M.T.; Holanda, R.M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. *Ciência Rural*. V. 48, 01, 2018.
- Soil Conservation Service. 1991. Soil–plant–water relationships. Section 15. Irrigation. p. 1-1–1-56. In *National engineering handbook*. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Sousa, E.S.; Borges, F.W.L.; Maciel, G.F.; Sousa, J.P.; Picanço, A.P. Balanço hídrico e classificação climática de Thornthwaite para a cidade de Palmas–TO. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. Anais... Belém-PA, 2010. CD-ROM.
- Steduto, P.; Raes, D. Hsiao, T. C.; Fereres, E. AquaCrop: concepts, rationale and operation. In: *Crop Yield Response to Water*. Irrigation & Drainage paper vol. 66. FAO, Rome, 2012.
- Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Raes, D.; Fereres, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, v. 101, p. 426-437. 2009.
- Strzepek, K., and B. Boehlert. 2010. Competition for water for the food system. *Philos. Trans. R. Soc. B* 365:2927–2940.
- Stricevic S.; Cosic, M.; Djurovic, N.; Pejic, B.; Maksimovic, L. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*, v.98, p.1615-1621. 2011.

- Sun, S.K.; Wu, P.T.; Wang, Y.B.; Zhao, X.N. Impacts of climate change on water footprint of spring wheat production: the case of an irrigation district in China. *Span. J. Agric. Res.* 10 (4), 1176–1187, 2012.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M.T., Stockle, C., Steduto, P. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agron. J.* v. 101, p. 509-521, 2009.
- Tongson, E.E.; Alejo, L.A.; Balderama, O.F. Simulating impacts of El Niño and climate change on corn yield in Isabela, Philippines. *Climate, Disaster and Development Journal.* v. 2, p. 29-39, 2017.
- USDA. 1964. Estimation of direct runoff from storm rainfall. p. 1–24. In *National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Tanner, C.B., Sinclair, C.R., 1983. Efficient water use in crop production research or research. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
- Vencato, A. Z., et al. Anuário Brasileiro da Soja 2010. Santa Cruz do Sul: Ed. Gazeta Santa Cruz, p. 144, 2010.
- Vivan, G. A. et al. Avaliação das variáveis referentes à produção de soja no Rio Grande do Sul para o período agrícola 2004-2007. *Geomática (Santa Maria. Online)*, 2010.
- Zeleke, K.T., Luckett, D., Cowley, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. *Agronomy Journal*, v. 103, p. 1610–1618. 2011.
- Xiangxiang, W.; Quanjiu, W.; Jun, F.; Qiuping, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, v.129, p. 95-104. 2013.
- Watanabe, S.; Hajima, T.; Sudo, K.; Nagashima, T. Takemura, T.; Okajima, H.; Nozawa, T.; Kawase, H.; Abe, M.; Yokohata, T.; Ise, T.; Sato, H.; Kato, E.; Takata, K.; Emori, S.; Kawamiya, M. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development.* v. 4, p: 845–872, 2011.
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L.O. 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods, *IPCC Reports*.
- Willmott, C. J.; Matsuura, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, v. 30, p. 79–82, 2005.

WWAP – World water assessment programme. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris: UNESCO; London: Earthscan, 2009.